

## ارزیابی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی توسط رقم روشن گندم

علی شهیدی<sup>۱</sup>، محمد جواد نحوی نیا<sup>۲\*</sup> و مسعود پارسی نژاد<sup>۳</sup>

### چکیده

برای تعیین چگونگی واکنش گیاهان به تنش همزمان شوری و خشکی و نقش هر یک از آن‌ها در کاهش جذب آب، مدل‌های ریاضی متعددی وجود دارد. مدل‌های جذب آب در شرایط تنش همزمان به سه دسته جمع‌پذیر، ضرب‌پذیر و مدل‌های مفهومی تقسیم می‌شود. در این مطالعه شش تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپی وان گنوختن (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، دیرکسن و آگوستیجن، وان دام و همکاران، اسکگرز و همکاران و همایی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای کشت گندم رقم روشن ارزیابی شد. آزمایش‌ها در قالب طرح فاکتوریل در پایه کرت‌های خرد شده اجرا شد. سطوح مختلف شوری ( $S_1, S_2, S_3$  بترتیب معادل ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی زیمنس بر متر) به عنوان کرت‌های اصلی و چهار سطح آبیاری ( $I_1, I_2, I_3, I_4$  بترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ در صد نیاز آبی گیاه)، به عنوان کرت‌های فرعی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ اجرا گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که در سطوح شوری کم واکنش گندم به تنش همزمان شوری و کم آبی مدل جمع‌پذیر وان گنوختن خیلی خوب می‌تواند الگوی جذب آب را شبیه‌سازی کند. در حالی که در سطوح شوری مدل مفهومی اسکگرز بیشترین برازش را با داده‌های مزرعه‌ای دارد. بنابراین به عنوان مدل بهینه جذب معرفی و توصیه می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تنش شوری، تنش خشکی، تابع کاهش، گندم و بیرجند.

**ارجاع:** شهیدی ع. نحوی نیا م. ج. و پارسی نژاد م. ۱۳۸۹. ارزیابی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی توسط رقم روشن گندم. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷): ۱-۱۲.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

\* نویسنده مسئول: [javad.nahvinia@gmail.com](mailto:javad.nahvinia@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۸/۳۰

## مقدمه

جذب آب توسط ریشه عامل مهمی در برآورد عملکرد گیاهان تحت شرایط خشکی و شوری و همچنین در چگونگی توزیع جریان آب و املاح در خاک، به ویژه در شرایط غیر اشباع به شمار می‌رود. پیش‌بینی چگونگی جریان آب به سمت ریشه‌ها مدت‌ها چالش علمی بوده است. چنانچه برآورد چگونگی جریان آب به سمت ریشه‌ها قابل پیش‌بینی باشد، دیگر به اندازه‌گیری مستقیم میزان جذب آب توسط ریشه‌ها نیاز نخواهد بود، بلکه با استفاده از شبیه‌سازی مدل‌ها قادر به تعیین مدیریت آبیاری در جهت حداکثر رشد خواهیم بود (گرین و همکاران، ۲۰۰۶). با وجود این مدل‌ها برای استفاده نیاز به تأیید با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای دارند. بررسی‌های کاردون و لی‌تی (۱۹۹۲) نشان می‌دهد که تقریباً همه مدل‌های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک به وسیله حل عددی معادله دارسی-ریچاردز با در نظر گرفتن عبارت جذب آب برای جریان در بعد عمودی نوشته شده‌اند. شکل معادله ریچاردز بعد از لحاظ جذب آب توسط گیاهان به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h)] - S \Rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} - \frac{dK}{dz} - S \quad (1)$$

که در آن:  $\theta$  درصد رطوبت حجمی،  $h(L)$  بار فشاری آب خاک،  $t(T)$  زمان،  $Z(L)$  عمق خاک ( $LT^{-1}$ )  $K$  هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و  $S(T^{-1})$  منبع مصرف آب است. عبارت جذب آب توسط ریشه  $S$  (در معادله ۱) تابعی از ارتفاع فشار آب خاک، ارتفاع فشار اسمزی، خصوصیات ریشه و شرایط آب و هوایی مانند نیاز تبخیری است (اسکگز و همکاران، ۲۰۰۶). مدل‌های جذب آب بر اساس چگونگی به کار بردن عبارت جذب آب در معادله عمومی جریان به دو گروه، مدل‌های میکروسکوپی براساس جریان آب به طرف تک ریشه و مدل‌های میکروسکوپی برداشت آب به وسیله کل ناحیه ریشه بدون در نظر گرفتن تأثیر تک تک ریشه‌ها، تقسیم می‌شوند (نیما و هنکز، ۱۹۷۳). براساس طبقه‌بندی دیگری که ماتور و راثو (۱۹۹۹) انجام داده‌اند، مدل‌های جذب آب توسط ریشه به سه دسته میکروسکوپی، میکروسکوپی و مدل‌های مرکب تقسیم می‌شود. مدل‌های مرکب مدل‌های میکروسکوپی‌ای هستند که در آنها از تحلیل‌های میکروسکوپی استفاده می‌شود (گرین و همکاران،

۲۰۰۶). مبنای کار مدل‌های میکروسکوپی معادله گاردنر (۱۹۶۴) است که در آن فرض بر جذب آب در واحد طول ریشه متناسب با ضریب آگذری 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 و برابر است، همه مکان‌های جذبی در سطح ریشه یکنواخت و جریان آب نیز ماندگار است. حرکت آب به سمت ریشه فقط به صورت شعاعی است، درصد رطوبت اولیه خاک یکنواخت است. در نتیجه پتانسیل ماتریک اولیه در حجم خاک یکسان است. مطالعات متعددی برای وارد کردن عبارت جذب به معادله عمومی جریان با روش‌های میکروسکوپی انجام شده است که در این میان می‌توان به مدل‌های گاردنر (۱۹۶۴)، ویسلر و همکاران (۱۹۶۸)، نیما و هنکز (۱۹۷۳)، فدس و همکاران (۱۹۷۴)، هیلل و همکاران (۱۹۷۶)، هرکلرات و همکاران (۱۹۷۷) و رز و همکاران (۱۹۷۸) اشاره کرد. دومین سری مدل‌های جذب آب، توابع تجربی است که جذب آب توسط گیاه را بر مبنای واکنش گیاه به پتانسیل توصیف می‌کنند (کاردون و لی‌تی، ۱۹۹۲). در حال حاضر این مدل‌ها بیشتر مورد توجه هستند (فدس و راتس، ۲۰۰۴). فرم عمومی مدل‌های میکروسکوپی که اولین بار توسط فدس و همکاران (۱۹۷۸) ارائه شد به صورت زیر است.

$$S = \alpha(h, \pi) \times S_{\max} = \alpha(h, \pi) \frac{T_p}{Z_r} \quad (2)$$

که در آن:  $\alpha(h, \pi)$  تابع بدون بعد پاسخ به تنش،  $Z_r$  عمق توسعه ریشه و  $T_p$  تعرق پتانسیل،  $h$  پتانسیل ماتریک و  $\pi$  پتانسیل اسمزی می‌باشد. مهمترین مدل‌هایی که بر مبنای معیارهای میکروسکوپی ارائه شده عبارتند از: فدس و همکاران (۱۹۷۶ و ۱۹۷۸)، مولز و رمسون (۱۹۷۱)، وان گنوختن (۱۹۸۷) و گاردنر (۱۹۹۱).

مزیت روش‌های میکروسکوپی در هندسه جریان آسانتر نسبت به روش‌های میکروسکوپی و همچنین اجتناب از مشکلات روش‌های میکرو برای شبیه‌سازی جذب ریشه‌های انفرادی در سیستم ریشه‌ها است (مالوا و ار، ۲۰۰۰؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲؛ گرین و همکاران، ۲۰۰۶؛ اسکگز و همکاران، ۲۰۰۶).

که در آن:  $\alpha(\pi)$  تابع کاهش جذب آب در اثر تنش شوری است. مدل شیب آستانه ماس و هافمن (۱۹۷۷) و مدل سیگموئیدی وان گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) معروفترین مدل‌های شبیه‌سازی جذب آب تحت شرایط تنش شوری می‌باشند.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک در اغلب موارد گیاهان به‌طور هم‌زمان تحت تأثیر تنش شوری و کم‌آبی قرار می‌گیرند. تأثیر توأم تنش شوری و کم‌آبی بر جذب آب و به تبع آن بر عملکرد محصولات در یک مکان خاص به نوع گیاه، تناوب آبیاری، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک و اقلیم و کیفیت آب آبیاری بستگی دارد (دودلی و شاینی، ۲۰۰۳).

درباره چگونگی پاسخ گیاهان به تنش هم‌زمان شوری و خشکی 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 جمع‌پذیر، ضرب‌پذیر و مدل‌های مفهومی تقسیم می‌شوند. در مدل‌های جمع‌پذیر فرض شده که آب تحت تأثیر تجمعی فشار آب خاک و فشار اسمزی جذب می‌شود. حال آنکه در مدل‌های ضرب‌پذیر ضرایب کاهش مربوط به تنش‌های آبی و شوری به‌طور جداگانه محاسبه و درهم دیگر ضرب می‌شوند (ون گنوختن، ۱۹۸۷؛ اسکگز و همکاران، ۲۰۰۶؛ گرین و همکاران، ۲۰۰۶). هدف از انجام این مطالعه بررسی و ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف جذب برای شبیه‌سازی اطلاعات جمع‌آوری شده از یک مطالعه صحرائی کشت گندم تحت شرایط توأم شوری و خشکی است.

## مواد و روش‌ها

### مشخصات محل مورد مطالعه

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی بیرجند با عرض جغرافیایی  $32^{\circ} 53'$  شمالی و طول جغرافیایی  $13^{\circ} -$   $55'$  شرقی و ارتفاع  $1480$  متر از سطح دریا، در سال زراعی  $1384-85$  اجرا شده‌است. قبل از کاشت گندم از اعماق مختلف خاک مزرعه جهت تعیین خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه نمونه‌گیری انجام گرفت (جدول ۱). برای تعیین منحنی خصوصیات رطوبتی، یک نمونه مرکب از چندین نقطه و سه عمق مختلف تهیه و در آزمایشگاه بررسی شد (شکل ۱). منبع آب قابل استفاده سه حلقه چاه با شوری

تنش آبی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان تعرق بیش از مقدار جذب آب باشد. هنگامی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک نباشد، مقدار آبی که گیاه جذب می‌کند معادل تعرق پتانسیل است و معادله کلی آن به‌صورت زیر است.

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

اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق فراهم آورد، متناسب با ضریب  $\alpha$  موسوم به تابع کاهش تعرق، از میزان تعرق پتانسیل کاسته می‌شود (فدس و همکاران، ۱۹۷۸).

$$T_p = T_{\max} \times \alpha(h) \Rightarrow S = S_{\max} \times \alpha(h) \quad (4)$$

فدس و همکاران (۱۹۷۸) گفته‌اند که تابع کاهش جذب در تنش خشکی به‌صورت 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 به‌صورت 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 به‌صورت خطی کاهش یافته و نهایتاً به صفر می‌رسد. یکی دیگر از معروف‌ترین تابع‌های کاهش جذب در اثر تنش خشکی تابع کاهش سیگموئیدی شکل وان گنوختن (۱۹۸۷) است.

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad (5)$$

که در آن:  $h_{50}$  پتانسیل ماتریکی است که به‌ازای آن جذب به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و معمولاً از طریق آزمون و خطا به‌دست می‌آید و  $P$  یک ضریب تجربی است که معمولاً مقدار آن ۳ در نظر گرفته می‌شود. دیرکسن و آگوستیجن (۱۹۹۳) معادله وان گنوختن را نسبت به مقدار پتانسیل ماتریک در آستانه کاهش  $h^*$  تعدیل کرده و آن را به‌صورت زیر ارائه کرده‌اند.

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}}\right)^p} \quad (6)$$

اگر به‌جای  $\alpha(h)$  ضریب کاهش را تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک قرار دهیم معادله جذب آب از خاک‌های شور به‌صورت زیر درمی‌آید (فدس و همکاران، ۱۹۷۸).

$$S = \alpha(\pi) S_{\max} \quad (7)$$

در سطوح مختلف شوری را به وجود آورد. نتایج تجزیه و تحلیل سه حلقه چاه فوق‌الذکر در جدول ۲ ارائه شده است.

مختلف در مزرعه آزمایشی موردنظر (با EC های متغیر از ۱/۴ تا ۹/۶ دسی زیمنس بر متر) بود که امکان تأمین آب با شوری‌های مختلف در مزرعه برای ارزیابی مدل‌های جذب

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق خاک (cm)	pH	EC (dS/m)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی متر مکعب)	درصد اندازه ذرات خاک		
				بافت خاک	شن	سیلت رس
۰-۳۰	۷/۶۱	۲/۱	۱/۵	C-L	۲۹/۷	۳۴/۶
۳۰-۶۰	۷/۷۲	۲/۷	۱/۴۵	Si-C-L	۱۰/۱	۵۲/۶
۶۰-۹۰	۷/۷۸	۲/۹	۱/۳۹	Si-C-L	۱۱/۲	۵۳/۶

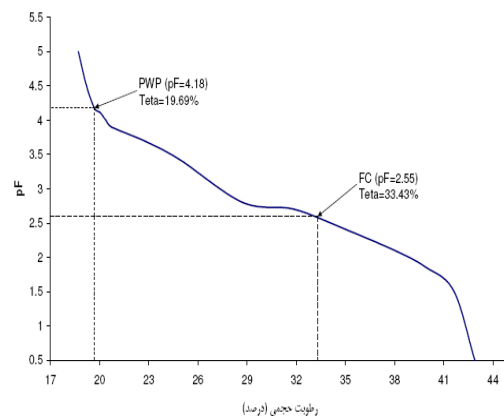
جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب سه حلقه چاه مورد استفاده

شماره چاه	(EC) ds/m	pH	SAR	کاتیون‌ها				آنیون‌ها			
				Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Hco <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Co <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
۱	۱/۴	۸/۰	۷/۴	۲/۲	۱/۷	۱۰/۲	۰/۰۵	۷/۲	۳/۱	۰	۴/۱
۲	۴/۵	۷/۸	۸/۶	۱۴/۰	۴/۸	۲۶/۵	۰/۳	۲۱/۲	۸/۳	۰	۱۶/۵
۳	۹/۶	۷/۷	۹/۷	۲۷/۶	۱۲/۸	۴۳/۸	۰/۸	۵۳/۵	۱۰/۶	۰	۲۰/۸

دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند در سال زراعی ۱۳۸۴-۸۵ اجرا شد.

روش کاشت به صورت دستی و در داخل کرت انجام شد و به منظور حصول یکنواختی در اعمال شوری، از روش آبیاری کرتی استفاده گردید که در این مطالعه ابعاد کرت‌ها ۳×۴ متر و فاصله کرت‌های فرعی ۵۰ سانتی‌متر و فاصله کرت‌های اصلی حداقل ۴/۵ متر در نظر گرفته شد. در هر کرت ده ردیف کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر و طول ۳ متر طوری کاشته شد که تراکم معمول ۴۰۰ بوته گندم در متر مربع حاصل شود.

برای تجهیز سیستم آبیاری به گونه‌ای که بتوان سطوح مختلف شوری آب آبیاری را در کرت‌های آزمایشی اعمال کرد، ابتدا سه منبع فلزی هریک با حجم ۲۸۰۰۰ لیتر بر روی سکویی به ارتفاع ۱/۵ متر احداث شد به طوری که بتوان آب را با شوری موردنظر از نهر بالادست مزرعه به داخل هر یک از منابع آب پمپ نمود و سپس از طریق خطوط لوله آب به ابتدای قطعه زراعی مورد آزمایش انتقال داده شود و آب موردنیاز هر کرت را از طریق کنتور حجمی دقیق به کرت منتقل کرد. دیگر نهاده‌های زراعی براساس توصیه



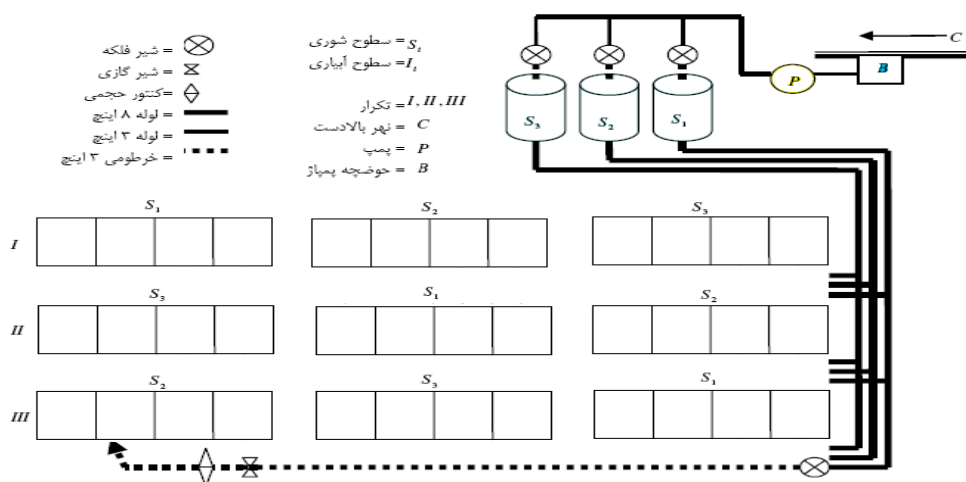
شکل ۱- منحنی مشخصه رطوبت حجمی خاک مزرعه آزمایشی به همراه نقاط پتانسیلی FC و PWP

### طرح آزمایشی

قالب طرح آزمایشی کرت‌های خرد شده به صورت فاکتوریل بود که در آن سطوح مختلف شوری ( $S_1, S_2, S_3$ ) به ترتیب معادل ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی زیمنس بر متر) به عنوان کرت‌های اصلی و چهار سطح آبیاری ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ ) به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه، به عنوان کرت‌های فرعی که در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی

معمول زارعین منطقه به صورت یکسان برای تیمارهای مختلف اعمال شد. برداشت محصول نیز به صورت دستی از ۴ ردیف وسط هر کرت و با طول ۲ متر (به مساحت  $1/6 \text{ m}^2$ )

انجام شد. آرایش قطعات زراعی، استقرار سیستم آبیاری و کرت‌های آزمایشی در شکل ۲ ترسیم شده است.



شکل ۲- نقشه شماتیک طرح آزمایشی

با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای رقم روشن گندم مورد ارزیابی قرار گرفت.

- مدل جمع‌پذیر وان گنوختن (۱۹۸۷) با عنوان مدل M1:

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{h(z, t) + \pi(z, t)}{h_{50}} \right]^p} \quad (8)$$

که در آن:  $\alpha(h, \pi)$  تابع بدون بعد پاسخ به تنش،  $Z$  عمق توسعه ریشه،  $t$  زمان،  $h$  پتانسیل ماتریک و  $\pi$  پتانسیل اسمزی است. در این تابع  $h_{50}$  پتانسیل ماتریکی است که به‌ازای آن جذب به‌میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و  $P$  پارامتری تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است. وان گنوختن (۱۹۸۷) و وان گنوختن و گاپتا (۱۹۹۳) معادله فوق را برای محصولات با دامنه شوری‌های مختلف به‌کار برده و مقدار تقریبی  $p$  را معادل ۳ به‌دست آوردند.

مدل ضرب‌پذیر وان گنوختن (۱۹۸۷):

معادله عمومی مدل‌های ضرب‌پذیر به صورت زیر است:

$$\alpha(h, \pi) = \alpha(h) \times \alpha(\pi) \quad (9)$$

- مدل ضرب‌پذیر وان گنوختن (۱۹۸۷) با عنوان مدل M2:

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{\pi_{50}}\right)^{p_2}} \quad (10)$$

- مدل دیرکسن و آگوستیچن (۱۹۹۳) با عنوان مدل M3:

برای برنامه‌ریزی و تعیین زمان آبیاری با معیار قرار دادن تیمار بدون تنش آبی و شوری (شاهد) از شاخص رطوبت خاک استفاده شد. بر این اساس رطوبت خاک تا عمق ریشه گیاه به‌ازاء هر ۲۰ سانتی‌متر در روزهای قبل از آبیاری اندازه‌گیری شد و زمانی که میانگین وزنی رطوبت حجمی خاک به حد تخلیه مجاز برای گندم (۵۰٪) رسید، (با معیار تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی) اقدام به اعمال رژیم‌های مختلف آب، براساس کمبود رطوبت خاک و ضرایب هر تیمار با استفاده از معادله زیر شد:

$$SMD = (W_{FC} - W_i) \cdot A_s \cdot D \cdot C \quad (7)$$

که در آن: SMD کمبود رطوبت خاک (mm)،  $W_i, W_{FC}$  به ترتیب درصد وزنی رطوبت در ظرفیت زراعی و موجود خاک،  $A_s$  جرم ظاهری خاک خشک ( $\text{g/m}^3$ )،  $D$  عمق توسعه ریشه (mm) و  $C$  ضرایب هر تیمار (٪).

#### مدل‌های مورد استفاده

در این مطالعه سه تابع کاهش جذب در شرایط تنش خشکی (فدس و همکاران، وان گنوختن و دیرکسن و آگوستیچن) و شش تابع کاهش جذب در شرایط تنش هم‌زمان (وان گنوختن (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، دیرکسن و آگوستیچن، وان دام و همکاران، اسکگر و همکاران و همایی)

- مدل همایی (۱۹۹۹) با عنوان مدل  $M_5$ :

$$\alpha(h, \pi) = \frac{h - (h_4 - \pi)}{h_3 - (h_4 - \pi)} \times \left[ 1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (13)$$

معادلهٔ اخیر در شرایط  $\pi < \pi^*$  و  $h_4 - \pi \leq h \leq h_3$  صادق است.

- مدل اسکگز و همکاران (۲۰۰۶) با عنوان مدل  $M_6$ :

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p_1}} \times \left[ 1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (14)$$

این مدل از تلفیق مدل وان گنوختن برای تنش خشکی و معادله ماس هافمن برای تنش شوری به دست آمده است. داده‌های مشاهده‌ای عبارتند از عملکرد دانه ارقام گندم و توزیع وزنی شوری و رطوبت تا عمق یک متری خاک (پتانسیل‌های اسمزی و ماتریک) طی سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ و سایر داده‌هایی که در مدل‌های مذکور موردنیاز هستند به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های مختلف جذب آب (cm)

$P_2$	$P_1$	$\alpha$	$\pi_{50}$	$h_{50}$	$h_4$	$\pi^*$	$h_3 = h^*$
۱/۷۳	۱/۱۳	۰/۰۷	-۱۱۰۰۰	-۸۵۰۰	-۱۵۰۰۰	-۴۱۷۰	-۱۰۰۰

که در آن  $\pi$  پتانسیل اسمزی برحسب بار و  $EC_e$  شوری عصاره اشباع خاک برحسب  $dS/m$  است. عزیزاده (۱۳۸۳) مقدار  $EC_{max}$  را برای گیاه گندم  $6 dS/m$  اعلام کرده است. فرانکوئیس و همکاران (۱۹۸۶) آستانه کاهش شوری برای دانه گندم را  $6/8 dS/m$  اعلام کرده‌اند. درحالی که زمانی و همکاران (۱۳۸۳) در منطقه بیرجند مشاهده کردند که عملکرد دانه گندم روشن در شوری  $5/5 dS/m$  کاهش یافت. هم‌چنین در بررسی اثرات شوری بر عملکرد دانه گندم روشن در تحقیق حاضر نیز مشاهده شد که عملکرد دانه در شوری  $5/5 dS/m$  شوری شروع به کاهش می‌کند. حال در صورتی که برای  $EC_{max}$  این مقدار را در نظر بگیریم، پتانسیل اسمزی برابر با  $4/17 bar$  یا معادل  $4170$  سانتی‌متر خواهد شد که این مقدار برای پارامتر  $\pi^*$  قرار داده شد.

$h_4$  همان پتانسیل ماتریک در نقطه پژمردگی بوده که عزیزاده (۱۳۸۳) آن را برابر  $15000$  سانتی‌متر گزارش کرده

دیرکسن و آگوستیچن (۱۹۸۸) ضرب‌های تابع کاهش وان گنوختن (۱۹۸۷) را نسبت به آستانه کاهش شوری ( $\pi^*$ ) و خشکی ( $h^*$ ) تعدیل و به صورت زیر ارائه کردند:

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left[ \frac{(h - h^*)}{(h^* - h_{50})} \right]^{p_1}} \times \frac{1}{1 + \left[ \frac{(\pi - \pi^*)}{(\pi^* - \pi_{50})} \right]^{p_2}} \quad (11)$$

- مدل وان دام و همکاران (۱۹۹۷) با عنوان مدل  $M_4$ :

ون دام و همکاران (۱۹۹۷) از تلفیق شاخه نزولی تابع کاهش فدس و همکاران (۱۹۷۸) برای تنش خشکی و تابع کاهش ماس و هافمن (۱۹۷۷) برای تنش شوری، تابع کاهش زیر را برای شرایط وجود هم زمان تنش های شوری و خشکی ارائه کردند.

$$\alpha(h, \pi) = \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \times \left[ 1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (12)$$

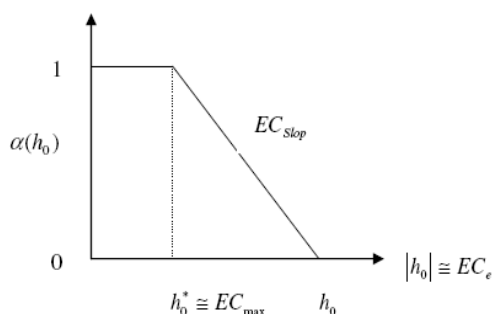
$h_3, h_4$  و  $b$  به ترتیب نقطه شروع تنش آبی، نقطه پژمردگی و درصد کاهش محصول به ازای افزایش واحد شوری است.

اطلاعات جدول ۳ با استفاده از منحنی خصوصیات رطوبتی خاک (شکل ۱) و طرح تحقیقاتی زمانی (۱۳۸۳) که در سال زراعی ۷۹-۱۳۷۸ در محل اجرای طرح حاضر اجرا شده بود، تعیین شد.

پارامتر  $h_3 = h^*$  مقدار پتانسیل ماتریک در آستانه کاهش محصول بوده که سینگ و همکاران (۲۰۰۶) مقدار آن را برای گیاه گندم  $1000 cm$  یعنی در حد  $PF=3$  گزارش نموده‌اند. با توجه به منحنی رطوبتی خاک قطعه زراعی مورد آزمایش (شکل ۱) برابر رطوبت حجمی معادل  $27/5$  درصد است. در این رابطه عباسی (۱۳۸۶) مقدار این پارامتر را برای گندم  $900 cm$  تعیین کرد.

$\pi^*$  پتانسیل اسمزی در آستانه کاهش محصول بوده که با توجه به آستانه شوری برای کاهش عملکرد گیاه گندم ( $EC_{max}$ ) و تبدیل آن به پتانسیل اسمزی با استفاده از رابطه زیر تعیین شد.

$$\pi = -0.725 \times (EC_e)^{1.06} \quad (15)$$



شکل ۴- منحنی مقادیر پتانسیل اسمزی در قابل ضریب کاهنده

$\alpha(\pi)$

پارامتر  $b$  که در مدل‌های جذب  $M_4$ ،  $M_5$ ،  $M_6$  مورد استفاده قرار می‌گیرد، با توجه به شکل (۵) در واقع همان شیب خط در مدل  $M_4$  بوده است که معادل  $EC_{slope}$  است. همایی و همکاران نیز مقدار  $b$  را برابر  $0.71$  در نظر گرفته‌اند.

- پارامترهای تجربی  $P_1$  و  $P_2$  نیز با توجه به مقادیر  $h_{50}$ ،  $\pi_{50}$ ،  $h^*$  و  $\pi^*$  از روابط ۱۶ و ۱۷ محاسبه شد.

در شرایطی که:  $\pi_{max} = \pi_{50}$ ،  $h_{max} = h_{50}$

$$P_1 = \frac{h_{max}}{h_{max} - h^*} \quad (16)$$

$$P_2 = \frac{\pi_{max}}{\pi_{max} - \pi^*} \quad (17)$$

#### شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها

شاخص‌های آماری متفاوتی برای سنجش اعتبار و درستی توابع تولید مدل‌ها وجود دارد. برای ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده استفاده می‌کنیم. شاخص‌های آماری لازم برای این کار عبارتند از:

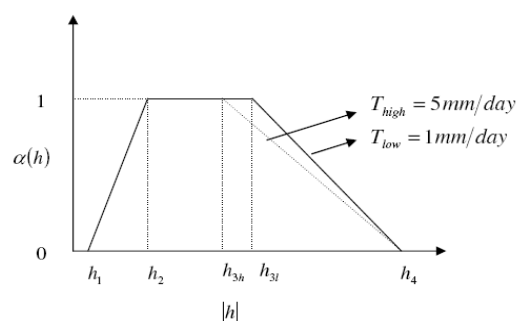
خطای متوسط<sup>۱</sup>، خطای ریشه حداقل مربعات<sup>۲</sup>، ضریب تغییرات<sup>۳</sup> (CV)، ضریب تعیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ )، کارایی مدل‌سازی یا راندمان مدل<sup>۵</sup> (EF) و ضریب باقیمانده<sup>۶</sup> (CRM) مورد استفاده قرار می‌گیرند. طبق تعریف هر یک از پارامترهای مذکور عبارتند از:

$$AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad \text{خطای متوسط (AE)}$$

- میانگین ریشه دوم خط (RMSE)

است. سینگ و همکاران (۲۰۰۶) برای اجرای مدل خود مقدار این پارامتر را  $16000$  - سانتی‌متر و فرانکوئیس و همکاران (۱۹۸۶) این مقدار را  $14000$  - سانتی‌متر گزارش کردند. عباسی (۲۰۰۶) نیز مقدار  $h_4$  را برابر  $16000$  - پیشنهاد کرده است. در این تحقیق با توجه به منحنی رطوبتی خاک مقدار پارامتر  $h_4$  برابر  $15000$  - سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

$h_{50}$  مکشی از خاک است که در آن آبی که گیاه جذب می‌کند.  $\alpha(h) = 0.5$  باشد. با توجه به شکل ۳ و پارامترهای  $\alpha(h) = 0.5$  با قرار دادن  $h^* = -1000$  و  $h_4 = -15000$  مقدار  $h_{50}$  به دست آمد.



شکل ۳- منحنی مقادیر مطلق مکش ماتریک خاک در مقابل

ضریب کاهنده  $\alpha(h)$

$\pi_{50}$  مقدار فشار اسمزی است که در آن جذب آب توسط گیاه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. یا به عبارتی مقدار پتانسیل اسمزی در شرایطی که مقدار  $\alpha(h) = 0.5$  باشد. از طرفی شیب  $EC_{slope}$  (شکل ۵) برای گندم توسط علیزاده و همکاران (۱۳۸۳) و سینگ و همکاران (۲۰۰۶) برابر  $0.71$  گزارش شده است. که در واقع  $EC_{slope}$  شیب خط (درصد کاهش عملکرد به ازاء هر واحد افزایش شوری  $dS/m$  عصاره اشباع خاک) است. با توجه به شکل ۴ و قرار دادن مقادیر  $\pi^* = -4170$  و  $EC_{slope}$  برابر  $0.71$  و در نظر گرفتن  $\alpha(h) = 0.5$  مقدار  $\pi_{50}$  برابر با  $11000$  - به دست آمد.

<sup>1</sup>- Average Error

<sup>2</sup>- Root mean square error

<sup>3</sup>- Coefficient Variation

<sup>4</sup>- Coefficient of Determination

<sup>5</sup>- Modeling Efficiency

<sup>6</sup>- Coefficient of Residual Mass

هم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های RMSE، ME، CRM برابر با صفر و مقدار CV و EF به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۱ خواهد بود.

### نتایج و بحث

عملکرد نسبی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با مدل‌های مختلف در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریک در جدول ۴ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در یک پتانسیل اسمزی ثابت با کاهش پتانسیل ماتریک مقدار جذب آب به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد (به عنوان مثال شکل ۱) و در یک پتانسیل ماتریک معین با کاهش پتانسیل اسمزی مقدار جذب آب به صورت خطی یا غیر خطی کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد که مدل جمع‌پذیر عملکرد نسبی را در اکثر موارد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. به عبارت دیگر اثر تنش همزمان شوری و کم آبی کمتر از مجموع اثرات آنهاست. اثر تنش آبی بیشتر از تنش شوری است. مثلاً هنگامی که شوری کمتر از حد آستانه کاهش عملکرد قرار داشته باشد ( $S_1$ ) اگر پتانسیل ماتریک  $-4396 \text{ cm}$  باشد عملکرد نسبی  $42\%$  کاهش می‌یابد در حالی که اگر تنش آبی محدود کننده نباشد ( $I_4$ ) به ازای پتانسیل اسمزی  $-4609 \text{ cm}$  کاهش عملکرد نسبی فقط  $10\%$  است (جدول ۴). این نتیجه با نتایج کیانی و همکاران (۱۳۸۵) و سپاسخواه و بورسما (۱۹۷۹) مطابقت دارد.

بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده هر یک از مدل‌ها رتبه‌بندی شدند. به این صورت که به مدلی که در آن هر یک از شاخص‌های آماری (RMSE، ME، CV و CRM) حداقل و یا EF آن نزدیک به یک باشد، رتبه یک اختصاص می‌گرفت (همایی و همکاران، ۲۰۰۲؛ لیگو و گرین، ۱۹۹۹). پس از رتبه‌بندی هر یک از شاخص‌های آماری، میانگین رتبه‌های هر تابع با توابع دیگر مقایسه شد. پارامترهای آماری محاسبه شده مربوط به هر یک از توابع کاهش جذب آب و رتبه مربوط به آنها در جدول ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای کلیه شاخص‌های آماری که مبنای ارزیابی قرار گرفتند، مدل جذب  $M_6$  با کسب رتبه نهایی (۱) نسبت به سایر مدل‌ها برتری نسبی دارد. مدل  $M_5$  با فاصله بسیار کم از مدل  $M_6$  در رتبه بعدی قرار دارد. مقدار

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right]^{1/2}$$

- ضریب تغییرات (CV)

$$CV = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right] \times \frac{100}{\bar{Q}}$$

- ضریب تعیین ( $R^2$ )

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

- کارایی مدل سازی (EF)

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{Q})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

- ضریب باقیمانده (CRM)

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

که در آن‌ها:  $P_i$  مقادیر که پیش‌بینی شده،  $Q_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)،  $n$  تعداد نمونه‌های به کار رفته،  $\bar{Q}$  مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده. حداقل مقدار ME، RMSE و CV صفر است. حداکثر مقدار EF برابر با یک است. EF و CRM می‌توانند مقادیری منفی داشته باشند. مقدار زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است در حالی که RMSE نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) چقدر است. شاخص CV نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. شاخص EF، مقادیر پیش‌بینی را با میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، برآوردی بهتر از مقادیر پیش‌بینی شده دارد. در نهایت CRM شاخصی است که درجه بالا یا پائین تخمین زدن مدل را نشان می‌دهد. یعنی اینکه چه میزان اختلاف مابین داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و مشاهدات واقعی وجود دارد. شاخص CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنان‌چه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با



نشان می‌دهد. با توجه به رتبه‌بندی‌های انجام شده، مدل جمع‌پذیر در رتبه آخر قرار دارد. بنابراین پاسخ گندم به تنش هم‌زمان شوری و خشکی از مجموع اثرات تک تک آنها بیشتر است.

CRM منفی در مدل‌های جذب  $M_4, M_5, M_6$  و  $M_3$  نشان می‌دهد که این مدل‌ها در اکثر موارد عملکرد نسبی گندم را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. در صورتی که مدل‌های  $M_1$  و  $M_2$  در اکثر موارد عملکرد نسبی را کمتر از مقدار واقعی

جدول ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد نسبی گندم در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف

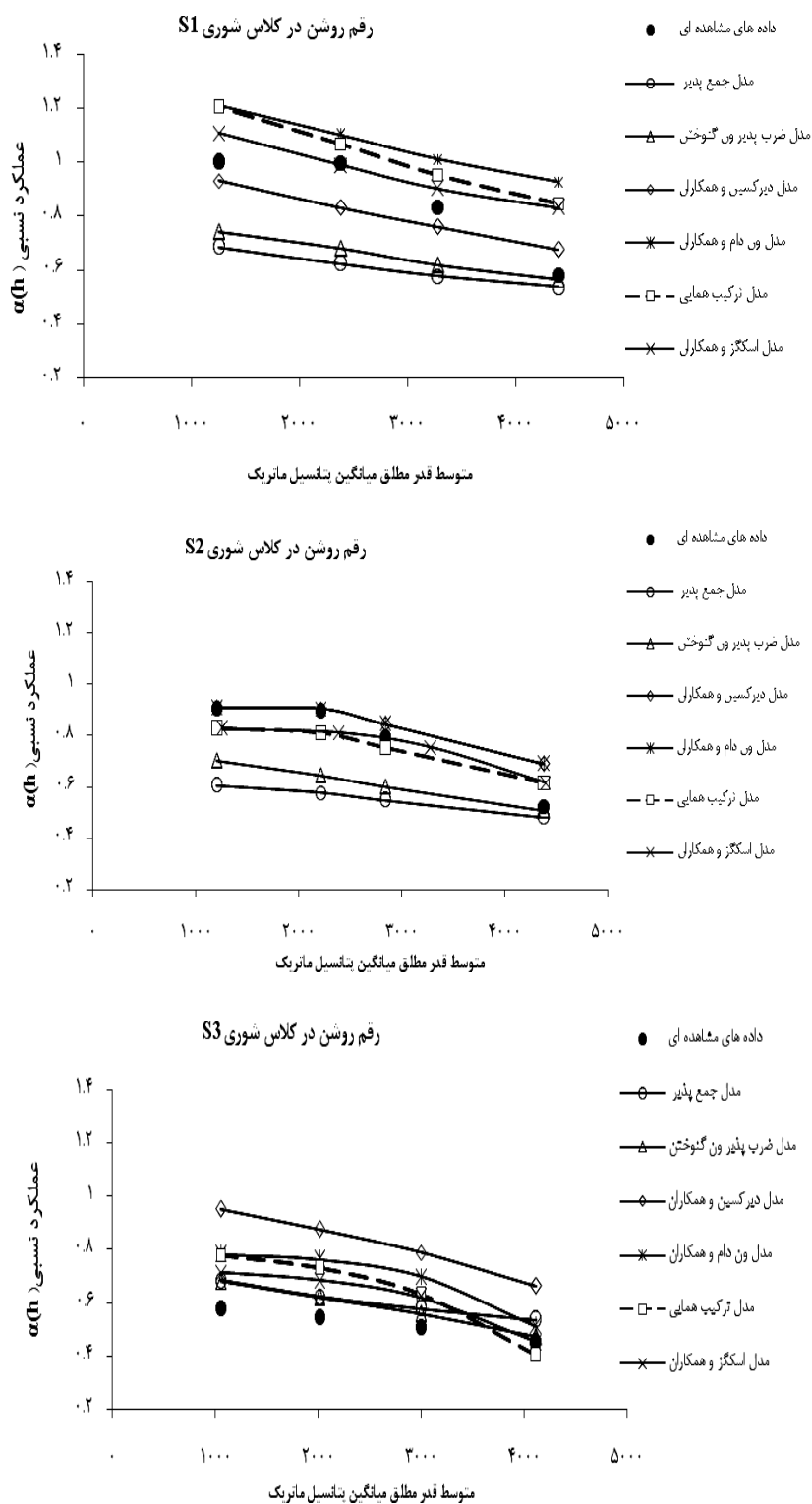
عملکرد نسبی پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها						عملکرد نسبی مشاهده‌ای	$\pi$ (cm)	h(cm)	سطوح آبی	سطوح شوری
$M_6$	$M_5$	$M_4$	$M_3$	$M_2$	$M_1$					
۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۹۳	۰/۶۸	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۵۸۲	-۳۰۳۵	-۴۳۹۶	$I_1$	$S_1$
۰/۹۰	۰/۹۶	۱/۰۱	۰/۷۶	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۸۳۵	-۳۱۲۵	-۳۲۸۴	$I_2$	
۰/۹۹	۱/۰۷	۱/۱	۰/۸۳	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۹۹۹	-۳۰۵۱	-۲۳۸۵	$I_3$	
۱/۱۱	۱/۲۱	۱/۲۱	۰/۹۳	۰/۷۴	۰/۷۳	۱/۰۰	-۲۹۹۹	-۱۲۵۴	$I_4$	
۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۵۲۳	-۴۶۶۷	-۴۳۸۵	$I_1$	$S_2$
۰/۷۶	۰/۷۹	۰/۸۴	۰/۸۳	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۷۹۱	-۴۳۳۲	-۲۸۴۱	$I_2$	
۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۹۰	۰/۸۸	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۸۹۴	-۴۲۵۴	-۲۲۱۵	$I_3$	
۰/۸۳	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۷۰	۰/۶۶	۰/۹۰۲	-۴۶۰۷	-۱۲۰۶	$I_4$	
۰/۴۶	۰/۴۱	۰/۵۱	۰/۶۷	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۴۴۲	-۵۹۴۷	-۴۱۱۲	$I_1$	$S_3$
۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۷۰	۰/۷۹	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۶۸۹	-۵۱۴۳	-۲۹۹۵	$I_2$	
۰/۶۹	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۸۱۷	-۵۰۹۸	-۲۰۱۲	$I_3$	
۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۸۱۳	-۵۲۹۶	-۱۰۵۳	$I_4$	

جدول ۵- ارزیابی مدل‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری محاسبه شده

$M_6$	$M_5$	$M_4$	$M_3$	$M_2$	$M_1$	توابع جذب
۰/۰۸۵ (۲)	۰/۰۷۹ (۱)	۰/۱۰۴ (۴)	۰/۱۰۳ (۳)	۰/۱۶۱ (۵)	۰/۱۷۶ (۶)	AE
۰/۱۰۵ (۱)	۰/۱۱۱ (۲)	۰/۱۴۳ (۴)	۰/۱۱۹ (۳)	۰/۱۸۷ (۵)	۰/۲۰۳ (۶)	RMSE
۱۳/۶ (۱)	۱۴/۳۵ (۲)	۱۸/۵۱ (۴)	۱۵/۴۵ (۳)	۲۴/۲۲ (۵)	۳۸/۵ (۶)	C.V
۰/۹۸۷ (۱)	۰/۶۳۴ (۳)	۰/۵۷۹ (۴)	۰/۷۵۹ (۲)	۰/۳۲۹ (۳)	۰/۳۲۳ (۶)	$R^2$
۰/۶۹ (۱)	۰/۶۵ (۲)	۰/۴۳ (۴)	۰/۶۱ (۳)	۰/۰۳ (۵)	-۰/۱۳۹ (۶)	EF
-۰/۱۲۱ (۱)	-۰/۱۷۳ (۲)	-۰/۲۴۵ (۵)	-۰/۱۸۸ (۳)	۰/۱۹۹ (۴)	۰/۲۷۵ (۶)	CRM
۱/۱۶	۲	۴/۱۶	۲/۸۳	۴/۵	۶	میانگین رتبه‌ها
(۱)	(۲)	(۴)	(۳)	(۵)	(۶)	رتبه نهایی

در شرایط تنش شدید آبی همه مدل‌ها (به استثنای مدل جمع‌پذیر) مقدار عملکرد نسبی را بیش از مقدار واقعی تخمین می‌زنند. با افزایش مقدار شوری دقت مدل‌های  $M_5$  و  $M_6$  در برآزش با داده‌های اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد.

شکل ۵ برآزش مقادیر عملکرد پیش‌بینی شده به وسیله توابع مختلف جذب در شرایط شوری کم ( $S_1$ )، شوری متوسط ( $S_2$ ) و شوری زیاد ( $S_3$ ) را با عملکرد نسبی اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که



درحالی است که با افزایش مقدار شوری از  $S_1$  به  $S_3$  این اختلاف کاهش می یابد. مدل دیرکسن و همکاران (۱۹۹۲) در شوری های کم، برآورد قابل قبولی با داده های اندازه گیری

همان طور که مشاهده می شود در تیمار شوری  $S_1$  با کاهش مقدار پتانسیل ماتریک اختلاف مقادیر پیش بینی شده با این مدل ها از مقادیر اندازه گیری شده افزایش می یابد. این

نسبت به آب شور، شرایط جذب آب بیشتر را فراهم کند. در این شرایط، پاسخ گیاه به افزایش یک سانتی متر فشار اسمزی با کاهش یک سانتی متر مکش ماتریک یکسان نیست. بنابراین در شوری‌های زیاد پاسخ گیاهان به شوری جمع‌پذیر نیست (کاردون و لتی، ۱۹۹۲). در مجموع استفاده از مدل اسکگز و همکاران (۲۰۰۶) به علت دقت بیشتر، سادگی کاربرد و نیاز به پارامترهای ورودی کمتر نسبت به مدل همایی (۱۹۹۹) توصیه می‌شود.

### منابع

- ۱- عباسی ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. دانشگاه تهران، چاپ اول. ۲۵۰ ص
- ۲- عزیزاده ا. ۱۳۸۳. رابطه آب و خاک و گیاه. دانشگاه امام رضا چاپ چهارم.
- ۳- زمانی غ.ر. ۱۳۸۳. مطالعه جنبه‌های اکوفیزیولوژیکی رقابت یولاف وحشی با گندم تحت تنش شوری. پایان‌نامه دکتری زراعت. دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۴- کیانی ع. همایی م. و میرلطیفی م. ۱۳۸۵. ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم آبی. مجله علوم خاک و آب. ۲۰ (۱): ۷۳ - ۸۳.
- ۵- همایی م. ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۵۸.

- 6- Cardon G.E. Letey J. 1992. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. Soil Sci. Soc. Am. J. 32. 1876-1880.
- 7- Kroes J.G. and Van Dam, J.C. 2003. Reference manual SWAP version 3.0.3. Alterra Green World Research. Wageningen. Available at: [www.alterra.nl/models/swap](http://www.alterra.nl/models/swap).
- 8- Dirksen C. and Augustijn D.C. 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. Agric. Abstracts. pp. 188.
- 9- 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.
- 10- Feddes R.A. Bresler, E. and Neuman S.P. 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root system. Water Resources Research 10(6): 1199-1206.

شده ارائه می‌دهد. اما با افزایش مقدار شوری این مدل اثر هم‌زمان تنش شوری و خشکی را بسیار کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. مدل ضرب‌پذیر ون گنوختن (۱۹۸۷) و مدل ون دام و همکاران (۱۹۹۷) نیز در شوری‌های بیشتر عملکرد بهتری ارائه می‌دهند. این نتایج با نتایج کاردون و لی تی (۱۹۹۲) مینی بر این که در شوری‌های زیاد پاسخ گیاهان به شوری بیشتر ضرب‌پذیر است، مطابقت دارد. اگر چه نتایج کلی ارزیابی حکایت از برتری مدل‌های اسکگز و همکاران (۲۰۰۶) و همایی و همکاران (۱۹۹۹) نسبت به سایر مدل‌ها دارد، لیکن مدل‌های وان گنوختن (۱۹۸۷) و وان دام و همکاران (۱۹۹۷) نیز نتایج نسبتاً قابل قبولی ارائه داده‌اند. اساساً ساختار مدل‌های همایی (۱۹۹۹) و وان دام و همکاران (۱۹۹۷) یکسان بوده ولی در نگرش تحلیلی به  $h_4$  متفاوت هستند. مدل وان دام و همکاران (۱۹۹۷) مقدار  $h_4$  را در هر شرایطی (شور و غیر شور) ثابت در نظر می‌گیرد، در حالی که مدل همایی و همکاران (۱۹۹۹) مقدار  $h_4$  را ثابت ندانسته و به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که با افزایش شوری مقدار آن در فشار کمتری رخ می‌دهد. با افزایش شوری در نیمرخ خاک، جذب گیاه نسبت به شرایط غیر شور کمتر بوده، در نتیجه رطوبت بیشتری در محیط باقی می‌ماند. به‌همین دلیل، مبنای تحلیل مدل همایی و همکاران (۱۹۹۹) برای  $h_4$  با واقعیت سازگارتر است.

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که سهم تنش خشکی در کاهش عملکرد گندم از سهم تنش شوری بیشتر است. مقایسه مدل‌های ریاضی ارائه شده نشان داد که در بیشتر موارد مدل اسکگز و همکاران (۲۰۰۶) کاهش عملکرد نسبی گندم در منطقه خراسان جنوبی در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی بهتر از سایر مدل‌ها پیش‌بینی می‌کنند، هر چند که مدل همایی (۱۹۹۹) نیز از دقت قابل قبولی برخوردار است. در تبیین این موضوع می‌توان گفت که با کاهش پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریک، انرژی آزاد آب در خاک و به تبع آن میزان جذب آب توسط گیاه کاهش می‌یابد. هنگامی که گیاه تحت تأثیر تنش شوری قرار می‌گیرد می‌تواند خود را تا حدی با املاح محلول سازگار کند و یا اینکه در شوری‌های بالاتر، با افزایش نفوذپذیری ریشه‌ها

- 24- Mathur S. and Rao S. 1999. Modeling water uptake by plant roots. *J. Irrigation Drainage Eng.* 125: 159–165.
- 25- Mmolawa K. and D. Or. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant Soil* 222:163–190.
- 26- Molz F.J. Remson I. 1971. Application of an extraction term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agron. J.* 63: 72–77.
- 27- Nimah, M.N., Hanks, R.J. 1973. Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37: 522–527.
- 28- Rowse H.R. Stone D.A. Gerwitz A. 1978. Simulation of the water distribution in soil. 2. The model for cropped soil and its comparison with experiment. *Plant Soil* 49: 500–534.
- 29- Sepaskhah A.R. and Boersma L. 1979. Shoot and root growth exposed to several levels of matric potential and NaCl induced osmotic potential of soil water, *Agronomy Journal*, 71:746-752.
- 30- Singh R. Van Dam J.C. and Feddes R. A. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district India. *J. of Agricultural Water Management*, 82: 253-278.
- 31- Skaggs T.H. Van Genuchten M. Th. Shouse. P.J. Poss, J.A. 2006. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigations. *Agric. Water Manage.* 86: 140–179.
- 32- 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 pp.
- 33- Van Genuchten M. Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, U. S. Salinity Lab. Riverside CA.
- 34- Van Genuchten M. Th. and Hoffman G.J. 1984. Analysis of crop production, in: Shainberg, I. and Shalhevet, J. (Eds.), soil salinity under irrigation, pp. 258-271, Springer-Verlag.
- 35- Van Genuchten M.Th. and Gupta. S.K. 1993. A reassessment of the crop salt tolerance response function. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 41: 730–737.
- 36- Wesseling J.G. and Feddes R.A. 2006. Assessing crop water productivity from field to regional scale. *Agric. Water Manage* 86: 30–39
- 11- Feddes R.A. Kowalik P.J. and Zaradny H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Prudoc, Wageningen. 189 pp.
- 12- Feddes R.A. Raats P.A.C. 2004. Parameterising the soil–water– plant–root system. In: Feddes, R.A., et al. Eds. *Unsaturated Zone Modelling: Progress. Challenges and Applications.* Wageningen Frontis Series. 6: 95–141.
- 13- Francois L. E. Mass, E. V. Donovan T. J. and Youngs U. L. 1986. Effects of salinity on grain yield and quality, vegetative growth and germination of semi-dwarf and durum wheat, *Agron. J.*, 78: 1053-1058.
- 14- Gardner W.R. 1991. Modeling water uptake by roots. *Irrigation Sci.* 12: 109–114.
- 15- Gardner W.R. 1964. Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agron.* 56: 41–45.
- 16- Green S.R. Kirkham M.B. Clothier E. 2006. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigation. *Agric. Water Manage.* 86: 165–176.
- 17- Herkelrath W.N. Miller E.E. Gardner W.R. 1977. Water uptake by plants. 2. The root contact model. *Soil Sci. Soc. Am.* 41: 1039–1043.
- 18- Hillel D. Van Bakle C.G.E.M. and Talpaz H. 1975. A microscopic- scale model of soil water uptake and salt movement to plant roots. *Soil Sci.* 120: 385-399.
- 19- Homae M. Dirksen C. and Feddes R.A. 2002. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agric. Water Manage.* 57: 89 -109.
- 20- Homae M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. Thesis , Wageningen Agricultural University. 173 pp.
- 21- 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.
- 22- League K. and Green R.E. 1999. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application, *J. Contaminant Hydrology.* 7: 51-73.
- 23- Maas E.V. and Hoffman G.J. 1977. Crop salt tolerance Current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 103:115–134.