



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

صفحه‌های ۱۶۷-۱۵۳

# مدل‌سازی جذب آب به‌وسیله گیاه ریحان در شرایط تنش‌های هم‌زمان آب، شوری و کمبود نیتروژن

حسین بابازاده\*<sup>۱</sup> و مهدی سرائی تبریزی<sup>۲</sup>

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

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۶/۲۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۴/۴/۲۰

### چکیده

منطقه غیراشباع خاک یکی از بخش‌های مهم چرخه هیدرولوژی است که نقش درخور توجهی در مدیریت منابع آب کشاورزی دارد. هدف از این پژوهش، تعیین میزان جذب آب به‌وسیله گیاه تحت شرایط تنش‌های هم‌زمان آب، شوری و نیتروژن غالب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. بدین منظور، آزمایشی با چهار سطح کمی آب آبیاری شامل ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، چهار سطح کیفی آب آبیاری شامل ۱/۲، ۳، ۵ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و چهار سطح کود نیتروژن شامل ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۰ درصد نیاز کودی انجام شد. نتایج نشان داد که بر اساس آماره‌های محاسبه‌شده، واکنش گیاه ریحان به تنش‌های هم‌زمان سه‌گانه آب، شوری و نیتروژن با استفاده از مدل MB-MB-EXP، مناسب‌ترین شبیه‌سازی را به همراه دارد ( $nRMSE=7/22$  و  $ME=19/05$ ). تحلیل حساسیت مدل‌ها نشان داد که مدل MB-MB-VG با کم‌ترین پارامتر ورودی و حساسیت نسبتاً کم به این پارامترها ( $S_e < 1/5$ ) بیش از دیگر مدل‌های بررسی شده دقت دارد ( $nRMSE=7/45$  و  $ME=19/75$ ).

کلیدواژه‌ها: تحلیل حساسیت، ریحان، مدیریت آب کشاورزی، مدل MB-MB-EXP، مدل MB-MB-VG.

## مقدمه

گیاه ریحان بیش از ۳۰ گونه دارد که از بین آن‌ها، ریحان معمولی (*O. basilicum*) مهم‌ترین گونه اقتصادی است و کشت آن در سرتاسر دنیا انجام می‌گیرد. این گونه شامل بیش از ۶۰ اریته است و تقریباً در بیشتر نقاط ایران از جمله شمال غربی (تبریز و ارومیه)، شمال (مازندران)، شمال شرقی (خراسان)، غرب (همدان و خرم‌آباد) و حوالی تهران (ورامین، شهرری و کرج) کشت می‌شود. با توجه به تنوع آب‌وهوایی و شرایط اکولوژیکی متنوع در سراسر ایران، لزوم پژوهش‌های همه‌جانبه و بهره‌برداری بهینه از این نوع گیاهان دارویی ضروری است (۸،۱).

برای دستیابی به کشاورزی پایدار و مدیریت زیست‌محیطی، نیاز مبرمی به شناخت مدل‌سازی ریاضی برای ارزیابی اثرهای سطوح مختلف نهاده‌های تولید شامل کمیت و کیفیت منابع آب و کود بر عملکرد محصول وجود دارد (۱۹،۱۱). از مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده برای برآورد انرژی و شار جریان آب با بیان رفتار فیزیولوژیکی گیاه در رابطه با فرایندهای اتمسفر و خاک استفاده می‌شود. یکی از این نوع مدل‌ها در مقیاس مزرعه، مدل‌های جذب آب به‌وسیله گیاه است (۱۹،۱۱،۲۳).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه مدل‌سازی ریاضی پاسخ گیاهان مختلف به تنش انفرادی کم‌آبی و شوری و تنش هم‌زمان دوگانه انجام شده است. این پژوهش‌ها گستره وسیعی از مطالعات را در بر می‌گیرد که عبارت است از: مدل‌سازی پاسخ گیاه به کم‌آبی (۱۶)، مدل‌سازی پاسخ گیاه به شوری در مراحل مختلف رشد (۲، ۱۵، ۶، ۲۵)، مدل‌سازی پاسخ گیاه به شوری در کل فصل رشد (۱۲، ۱۳، ۱۴، ۵)، مدل‌سازی پاسخ گیاه به تنش‌های هم‌زمان شوری و کم‌آبی (۷، ۹، ۱۷، ۲۶، ۲۸)، مدل‌سازی پاسخ گیاه به تنش‌های هم‌زمان شوری و مواد مغذی (۳، ۱۸، ۲۷) و مدل‌سازی

پاسخ گیاه به تنش هم‌زمان دوگانه آب و شوری در سطوح مختلف تنش کمبود نیتروژن با استفاده از مدل‌های هم‌زمان کم‌آبی و شوری (۱۰).

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌رغم نیاز مبرم مناطق خشک و نیمه‌خشک به شناخت همه‌جانبه مدل‌سازی ریاضی پاسخ گیاه به تنش‌های هم‌زمان آب، شوری و کمبود نیتروژن برای مدیریت بهتر کمی و کیفی آب آبیاری و کود نیتروژن در شرایط آب و خاک شور، به دلیل پیچیدگی این گونه پژوهش‌ها، مطالعه جامعی در این زمینه انجام نشده است.

به‌منظور بررسی اثر کمیت و کیفیت آب آبیاری در سطوح مختلف کود نیتروژن، تابع کاهش جذب آب ذرت تحت شرایط تنش توأمان آب و شوری در سطوح مختلف کود نیتروژن، آزمایش مزرعه‌ای توسط عزیزیان و سپاسخواه (۲۰۱۴) انجام شد. نتایج ایشان نشان داد که بین مدل‌های جذب آب، مدل تنش توأمان آب و شوری همایی و همکاران (۲۰۲۰) در سطوح مختلف کود نیتروژن، برآورد قابل‌قبول‌تری از دیگر توابع کاهش جذب آب دارد (کمترین RMSE و ME و بیشترین ضریب تبیین) (۱۰).

بنابراین، نوآوری پژوهش حاضر، ارائه مدل‌های اشتقاقی ضریبی تنش توأمان سه‌گانه آب، شوری و کمبود نیتروژن بر اساس مدل‌سازی ریاضی با استفاده از داده‌های آزمایشی حاصل از آزمایش گلدانی و تجزیه و تحلیل آن است.

هدف از این پژوهش، مدل‌سازی جذب آب به‌وسیله گیاه تحت شرایط تنش هم‌زمان آب، شوری و نیتروژن و در نهایت، ارزیابی و تحلیل حساسیت این مدل‌های اشتقاقی پیشنهادی است.

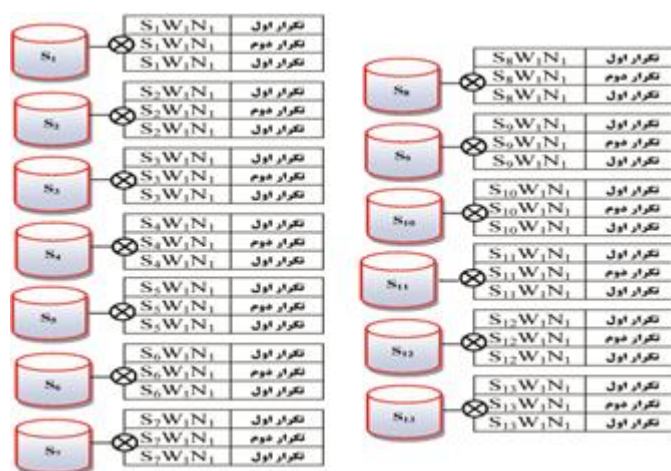
## مدیریت آب و آبیاری

## مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت گلدانی با انجام دو آزمایش جداگانه و در محیط گلخانه انجام شد. منطقه مورد مطالعه در موقعیت طول جغرافیایی  $42^{\circ} 35'$  عرض جغرافیایی  $28^{\circ}$  و ارتفاع  $1209$  متر از سطح دریا در جنوب شرقی تهران قرار گرفته است.

با توجه به نداشتن مقادیر اندازه‌گیری شده حد آستانه

شوری و شیب خط کاهش عملکرد ریحان در نشریات تخصصی فائو، در گام اول برای تعیین این پارامترهای گیاهی، آزمایشی با ۱۳ سطح مختلف شوری شامل شوری‌های  $(S_1)$   $1/2$ ،  $(S_2)$   $3$ ،  $(S_3)$   $5$ ،  $(S_4)$   $8$ ،  $(S_5)$   $1/8$ ،  $(S_6)$   $2$ ،  $(S_7)$   $2/2$ ،  $(S_8)$   $2/5$ ،  $(S_9)$   $2/8$ ،  $(S_{10})$   $3/5$ ،  $(S_{11})$   $4$ ،  $(S_{12})$   $6$  و  $(S_{13})$   $10$  دسی‌زیمنس بر متر صورت گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. نقشه شماتیک طرح آزمایشی اولیه برای تعیین پارامترهای گیاهی (حد آستانه شوری و شیب خط کاهش عملکرد ریحان)

جدول ۱. نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه آب رودخانه شور\* و چاه سایت پژوهشی دوشان تپه\*\*

T.D.S (mg/lit)	EC (dS/m)	pH	meq/L					meq/L					SAR***	٪ Na	منبع آب
			CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	مجموع آنیون‌ها	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	مجموع کاتیون‌ها			
۷۵۲۰	۱۰/۵	۷/۹	۰/۰۴	۴	۷۰	۴۹/۱	۱۲۳/۱	۱۰/۴	۳۱/۶	۷۶/۵	۰/۱۷	۱۱۸/۷	۱۶/۷	۶۴/۶	رودخانه
۸۵۹/۴	۱/۲	۸/۲۰	۰/۹	۶/۶۰	۳/۰	۰/۱۷	۱۰/۶۷	۴/۸۰	۱/۲	۶/۵۰	۰/۱	۱۲/۶	۳/۸۱	۵/۵۶	چاه

\* رودخانه شور در منطقه بین پیک زرنند و ورامین واقع شده است.

\*\* برای تهیه تیمارهای شوری آب آبیاری، با توجه به مشخص بودن  $V_h$  حجم آب حاصل از اختلاط (لیتر) (بشکه ۲۲۰ لیتری)، غلظت شوری آب چاه (میلی‌گرم بر لیتر) ( $C_w$ ) و غلظت شوری آب رودخانه (میلی‌گرم بر لیتر) ( $C_r$ )، بر اساس دو معادله و دو مجهول دو پارامتر مجهول مورد نیاز شامل حجم آب چاه (لیتر) ( $V_w$ ) و حجم آب شور طبیعی رودخانه شور (لیتر) ( $V_r$ ) تعیین شد که با هم باید اختلاط داده شوند.

\*\*\* SAR برحسب  $(meq/L)^{1/2}$

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک استفاده شده در این تحقیق

جرم مخصوص	رطوبت حجمی در	رطوبت حجمی	رطوبت	کلاس بافت	رس	سیلت	شن	کربن آلی
ظاهری	مکش ۱۵ اتمسفر	در مکش ۰/۳	اشباع (%)		(%)	(%)	(%)	(%)
(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	اتمسفر (%)						
۱/۵۴	۱۱/۰	۲۵/۴	۴۱/۴	Sandy loam	۱۳	۷	۸۰	۰/۴۹

مساوی، در طول دوره آزمایش به گلدان‌ها اضافه شد. پس از افزودن عناصر غذایی به خاک درون کیسه‌ها و رسیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی، خاک درون کیسه‌ها به هم زده و سعی شد تا عمل مخلوط شدن خاک با عناصر غذایی اضافه شده به طور کامل انجام پذیرد. سپس خاک‌ها با چگالی ظاهری یکسان (۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر) در گلدان‌ها قرار داده شد. ۱۵ عدد بذر ریحان (Ocimum basilicum) توده مازندران در هر گلدان کاشته شد. همه گلدان‌ها در دو هفته اول استقرار گیاهچه و تا رسیدن به مرحله سه‌برگی شدن با آب تیمار شاهد (۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر) آبیاری شدند. پس از این مرحله، تعداد گیاهان هر گلدان به ۷ بوته کاهش یافت. برای کاهش تبخیر، سطح خاک هر گلدان با ۲۸۰ گرم شن درشت پوشانیده شد. به منظور اعمال تیمارهای شوری، ابتدا آب شور منتقل شده به گلخانه، متناسب با هر تیمار آب شور رقیق شد. سپس، آبیاری گلدان‌ها با استفاده از آب شور مربوطه و تا رسیدن به FC با رعایت جزء آب‌شویی مناسب انجام گردید. طی آزمایش، پیوسته حجم و EC زهاب اندازه‌گیری شد. بنابراین میزان جزء آب‌شویی به صورت روزانه با استفاده از نسبت هدایت الکتریکی آب آبیاری (EC<sub>iw</sub>) به هدایت الکتریکی زهاب (EC<sub>dw</sub>) محاسبه و به همراه آب آبیاری در هر نوبت آبیاری به صورت تجمعی برآورد شد و به هریک از تکرارهای تیمارهای طرح آزمایشی داده می‌شد.

پس از گل‌دهی کامل (به گل رفتن ۸۰ درصد بوته‌ها)

سپس آزمایش اصلی با تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح کمی آب آبیاری شامل (W<sub>1</sub>) ۱۲۰، (W<sub>2</sub>) ۱۰۰، (W<sub>3</sub>) ۸۰ و (W<sub>4</sub>) ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، چهار سطح کیفی آب آبیاری شامل (S<sub>1</sub>) ۱/۲ (تیمار شاهد)، (S<sub>2</sub>) ۳، (S<sub>3</sub>) ۵ و (S<sub>4</sub>) ۸ دسی‌زیمنس بر متر، چهار سطح نیتروژن شامل (N<sub>1</sub>) ۱۰۰ درصد، (N<sub>2</sub>) ۷۵ درصد، (N<sub>3</sub>) ۵۰ درصد و (N<sub>4</sub>) ۰ درصد نیتروژن توصیه شده بر اساس آزمایش حاصلخیزی خاک انجام شد. آزمایش در سه تکرار به صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و خاک استفاده شده در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

برای انجام این آزمایش، گلدان‌های ۸ لیتری تهیه و کف آن‌ها با مته سوراخ شد. پس از آماده‌سازی گلدان‌های آزمایشی، ۶ کیلوگرم خاک خشک وزن و در کیسه‌های پلاستیکی بزرگ ریخته شد. سپس، مقادیر مناسب عناصر غذایی ضروری بر اساس توصیه کودی مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای گیاه ریحان، به صورت محلول و با توجه به ظرفیت زراعی خاک مورد آزمایش به خاک درون کیسه‌ها اضافه شد (۵،۴،۳،۱). در این مرحله، فقط یک پنجم مقادیر محاسبه شده تیمارهای نیتروژن به خاک اضافه شد. چهار نوبت دیگر آن، هر ۸ روز یکبار از طریق آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد. دلیل تعداد زیاد تقسیط نیتروژن‌دهی، تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه با توجه به اعمال جزء آب‌شویی بود. همچنین مقادیر پتاسیم و فسفر در سه نوبت

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

ناقل پروتئینی ریشه با آن عنصر می‌شود که انتقال‌دهنده عنصر از سطح ریشه به داخل ریشه است. این امر، پاسخ نزولی عملکرد محصول به کاربرد آن عنصر را به دنبال دارد. در این مدل، اگر چند عامل رشد را با مفهوم میچرلیخ با هم در نظر بگیریم، این عوامل رشد به‌طور هم‌زمان رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به‌صورت تجمعی عمل می‌کنند. بدین ترتیب، مدل MB را با فرض خطی بودن پاسخ گیاه به تنش شوری، برای تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن می‌توان به‌صورت زیر تعدیل کرد (۲۷):

$$Y_r = (1 - e^{-C_N N}) (1 - e^{-C_{EC} (EC - EC_{max})}) \quad (2)$$

در این رابطه،  $EC_{max}$  مقدار هدایت الکتریکی آب شور است که در آن عملکرد محصول برابر صفر است.  $EC$  و  $N$  مقادیر عامل‌های مؤثر بر رشد و  $C_N$  و  $C_{EC}$  عامل کارایی یا ضریب میچرلیخ برای عامل‌های مؤثر رشد مربوطه فرض می‌شود که برای هر عامل رشد ثابت است.

برای برنامه‌ریزی آبیاری از دستگاه تتاپروب<sup>۳</sup> استفاده شد. دستگاه تتاپروب با روش‌های مختلف (خطی، غیرخطی و ویژه) واسنجی شد. نتایج نشان داد که روش واسنجی غیرخطی که سازندگان دستگاه پیشنهاد کرده‌اند، بیشترین دقت را در برآورد رطوبت داشته است ( $RMSE = 0.023$  و  $R^2 = 0.935$ ). بنابراین، در این مطالعه از روش سازندگان دستگاه برای برآورد رابطه رطوبت و ثابت دی‌الکتریک استفاده شد. برای تبدیل رطوبت به پتانسیل ماتریک نیز از منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شد (۲۴).

برای تدوین تقویم آبیاری و تعیین زمان و مقدار آبیاری با معیار قراردادن تیمار بدون تنش آبی از روش بیلان رطوبتی آب در خاک استفاده شد. نخست باید مقدار

بوته‌ها از بالای دو گره انتهایی (۶ سانتی‌متری سطح خاک) کف‌بر و در پاکت مقوایی قرار داده شدند. طی انجام آزمایش، به همین ترتیب تا سه چین محصول برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه عملکرد ماده خشک محاسبه شد.

دو مدل تعدیل‌یافته برای بررسی پاسخ گیاه در شرایط تنش هم‌زمان عنصر غذایی همچون نیتروژن و شوری وجود دارند که شامل مدل‌های لیبیگ-اسپرینگل<sup>۱</sup> و میچرلیخ-بال<sup>۲</sup> است. بر مبنای مدل LS در هر زمان، عامل رشدی که محدودکننده‌ترین آن‌ها است، مقدار عملکرد را تعیین می‌کند و پاسخ گیاه به این عامل رشد خطی است. به‌صورت زیر مدل تعدیل‌یافته لیبیگ-اسپرینگل بیان می‌شود (۲۲، ۲):

$$Y_r = \min \begin{cases} 1 & ; EC < EC_{cr} \\ a - b \cdot (EC - EC_{cr}) & ; EC \geq EC_{cr} \\ 1 & ; N \geq N_{cr} \\ n \cdot N & ; N < N_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه،  $EC_{cr}$  و  $N_{cr}$  عامل‌های تنش‌زا، به‌ترتیب حد آستانه گیاه ریحان به شوری (۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر) و حد آستانه گیاه به کمبود نیتروژن است. نیز  $a$  و  $b$  به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب تابع پاسخ عملکرد به عامل  $EC_{cr}$  (۱/۸ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر) و  $n$  شیب پاسخ عملکرد به عامل  $N_{cr}$  است.  $\min$  در حقیقت مفهوم قانون حداقل را بیان می‌کند و  $Y_r$  عملکرد نسبی گیاه است.

مدل MB در اصل از مبنای فیزیولوژیک تبعیت می‌کند که می‌گوید افزودن هر عنصر به محیط ریشه، سبب اشباع

3. Theta Probe (Delta-T Devices, 3118-ML2, Dynamax, Inc., Houston, Tex)

1. LS (Liebig-Sprengel)  
2. MB (Mitscherlich-Baule)

نسبی،<sup>۳</sup> ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده،<sup>۴</sup> کارایی مدل سازی<sup>۵</sup> و ضریب جرم باقی مانده<sup>۶</sup> (CRM) برای هر یک از مدل ها انجام شد. بیان ریاضی آماره های یاد شده به صورت زیر است (۲۱):

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{O} \quad (۶)$$

$$nRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{100}{O} \quad (۷)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (۸)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (۹)$$

در این روابط،  $P_i$  مقادیر برآورد شده،  $O_i$  مقادیر اندازه گیری شده،  $n$  تعداد مشاهدات و  $\bar{O}$  میانگین مقادیر  $O_i$  است.

آماره  $nRMSE$  نشان دهنده مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر برآورد شده از مقادیر اندازه گیری شده و نبود اطمینان مطلق مدل است. هرچه  $nRMSE$  به صفر نزدیک تر باشد، عملکرد شبیه سازی مدل بهتر است. کمترین مقدار برای  $ME$  و  $nRMSE$  صفر است. مقدار زیاد  $ME$  نمایانگر بدترین حالت برآورد مدل است. ضریب  $EF$  بیان کننده نسبت انحراف مقادیر شبیه سازی شده از اندازه گیری شده به انحراف مقادیر اندازه گیری شده از مقادیر میانگین است. مقدار  $EF$  بین  $-\infty$  تا  $+1$  متغیر است.

رطوبت قابل جذب گیاه ( $\theta_{CEC}$ ) محاسبه شود (رابطه ۳) و سپس هر وقت رطوبت به حدود آن رسید، آبیاری انجام شود. به عبارت دیگر، هرگاه رطوبت روزانه ( $\theta_i$ ) برابر رطوبت قابل جذب گیاه ( $\theta_{CEC}$ ) شد، عملیات آبیاری انجام می شود. برای تعیین مقدار عمق آب آبیاری از رابطه ۴ استفاده شد. میزان ضریب مدیریتی تخلیه مجاز رطوبتی برابر ۳۰ درصد در نظر گرفته شد (۱۳).

$$\theta_{CEC} = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times MAD \quad (۳)$$

که در آن  $\theta_{CEC}$  رطوبت حجمی قابل جذب گیاه،  $\theta_{FC}$  رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی<sup>۱</sup> و  $\theta_{PWP}$  رطوبت حجمی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم<sup>۲</sup> و  $MAD$  ضریب حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی است (۱۳، ۵).

$$d_n = (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times MAD \times D_{rc} \quad (۴)$$

که در آن،  $d_n$  عمق آب آبیاری (mm) و  $D_{rc}$  عمق منطقه توسعه ریشه ها (mm) است.

مقدار مصرف آب توسط گیاه از طریق اندازه گیری اجزای بیلان آب بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید (۵):

$$I = (ET_c + D_d + R_o) \pm \Delta S \quad (۵)$$

که در آن،  $I$  عمق آب آبیاری (mm)،  $ET_c$  تبخیر و تعرق گیاه (mm)،  $D_d$  عمق آب زهکشی (mm)،  $R_o$  عمق رواناب (mm) و  $\Delta S$  تغییرات ذخیره رطوبتی خاک (mm) است.

تغرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه شد. برای کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان ها، یک لایه شن به ضخامت ۲ سانتی متر استفاده شد. در پایان آزمایش، عملکرد ماده خشک در تیمارهای مختلف اندازه گیری و عملکرد نسبی از تقسیم عملکرد ماده خشک تیمارها بر عملکرد ماده خشک تیمار بدون تنش (تیمار شاهد) محاسبه شد.

مقایسه کمی مدل ها با محاسبه آماره های پیشینه خطای

3. Maximum Error (ME)

4. Normalized Root Mean Square Error (nRMSE)

5. Modeling Efficiency (EF)

6. Coefficient of Residual Mass (CRM)

1. Field Capacity (FC)

2. Permanent Wilting Point (PWP)

جدول ۳. دامنه تغییرات ضریب حساسیت ( $S_c$ )

$S_c > 1/5$	$0/3 < S_c < 1/5$	$0 < S_c < 0/3$	$S_c = 0$	دامنه تغییرات
حساسیت زیاد	حساسیت متوسط	حساسیت کم	بدون حساسیت	شدت حساسیت

اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی،  $\bar{W}$  متوسط مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی،  $\Delta P$  اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و  $\bar{P}$  متوسط مقادیر ورودی هر پارامتر به مدل است (۲۰) به منظور شبیه سازی اثرهای همزمان تنش های کم آبی، شوری و کمبود نیتروژن، هشت مدل ضرب پذیر اشتقاقی به ترتیب شامل MB-MB-H، MB-MB-VG، MB-MB-F، MB-Modified، MB-Conceptual H، MB-MB-D، Conceptual H و MB-MH-EXP و MB-MB-EXP توسعه داده شد (روابط ۱۱ تا ۱۸).

هرچه مقدار آن به یک نزدیک تر باشد، مدل کاراتر است؛ در حالی که مقدار CRM نشان دهنده تمایل مدل برای بیش برآوردی<sup>۱</sup> یا کم برآوردی<sup>۲</sup> در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده است. اگر تمامی داده های برآورد شده و اندازه گیری شده یکسان باشند، نتایج آماره ها به صورت ME، CRM و nRMSE برابر صفر و EF برابر یک خواهد بود (۲۱). تمام مدل های ریاضی تنش همزمان سه گانه با استفاده از رابطه ضریب حساسیت تحلیل حساسیت شدند.

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{\bar{W}}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \quad (10)$$

در این رابطه،  $S_c$  ضریب حساسیت بدون بعد،  $\Delta W$

$$\alpha(h, h_o, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times (1 - e^{C_{EC}(EC - EC_{max})}) \times \frac{h - h_f}{h_r - h_f} \quad (11)$$

$$\alpha(h, h_o, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times (1 - e^{C_{EC}(EC - EC_{max})}) \times \frac{1}{1 + (\frac{h}{h_{50}})^p} \quad (12)$$

$$\alpha(h, h_o, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times (1 - e^{C_{EC}(EC - EC_{max})}) \times \frac{h - (h_f - h_o)}{h_r - (h_f - h_o)} \quad (13)$$

$$\alpha(h, h_o, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times (1 - e^{C_{EC}(EC - EC_{max})}) \times \frac{1}{1 + (\frac{h^* - h}{h^* - h_o})^p} \quad (14)$$

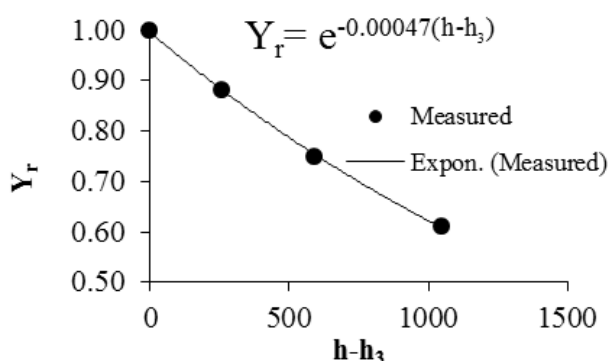
$$\alpha(h, h_o, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times \frac{h - (h_f - h_o)}{h_r - (h_f - h_o)} \times \left[ 1 - \frac{b}{360} (h^* - h) \right] \quad (15)$$

1. Overestimation
2. Underestimation

$$\alpha(h, h_0, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times \frac{h - (h_r - h_0)}{h_r^*} \times \left[ 1 - \frac{b}{36} (h_0^* - h_0) \right] \quad (16)$$

$$\alpha(h, h_0, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times \left[ 1 - \frac{b}{36} (h_0^* - h_0) \right] \times e^{\beta(h-h_r)} \quad (17)$$

$$\alpha(h, h_0, N) = (1 - e^{-C_N N}) \times (1 - e^{C_{EC}(EC - EC_{max})}) \times e^{\beta(h-h_r)} \quad (18)$$



شکل ۲. برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش آبی

و شوری در سطوح مختلف تنش کمبود نیتروژن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در این شرایط، همه سطوح تنش مواد غذایی، با افزایش مکش ماتریک و مکش اسمزی عملکرد نسبی کاهش پیدا می‌کند. کاهش عملکرد محصول با افزایش مکش ماتریک (h) و هدایت الکتریکی آب آبیاری (EC) خطی نیست. شیب کاهش عملکرد در ابتدا زیاد و سپس کاهش پیدا می‌کند. اثر افزایش مکش ماتریک در سطوح کم آبی شدید (مکش ۱۴۰۰ سانتی‌متر) کمتر از تنش‌های آبی ملایم است. به عبارت دیگر، در تنش‌های آبی شدید به علت محدودیت جرم آب، اثر تنش شوری کاهش پیدا می‌کند. با کاهش میزان کود مصرفی، متوسط عملکرد محصول در تیمارهای بدون تنش کم آبی و شوری  $S_1N_1W_1$ ،  $S_1N_2W_1$ ،  $S_1N_3W_1$  و  $S_1N_4W_1$  به ترتیب به میزان ۱۲۱/۸۴، ۱۱۸/۰۲، ۱۱۳/۱۲ و ۱۰۱/۲۱ گرم در سطح گلدان به دست می‌آید که با نتایج تحقیق عزیزیان و سپاس‌خواه (۲۰۱۴) مطابقت دارد.

در شکل ۲، برازش تابع نمایی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تیمارهای تنش آبی در مرحله بعد این مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی شده است. در جدول ۴، شاخص‌های آماری ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی اثر تنش‌های هم‌زمان کم آبی، شوری و مواد غذایی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد واکنش گیاه ریحان به تنش توأمان سه‌گانه ضرب‌پذیر است.

برای تحلیل حساسیت مدل‌ها از زیربرنامه Sensit استفاده شد که در نرم‌افزار Excel در محیط ماکرو کار می‌کند. پارامترهای مدل‌ها با روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید. نرم‌افزارهای آماری استفاده‌شده در این پژوهش، نرم‌افزارهای SPSS، MS Excel و MATLAB بودند.

## نتایج و بحث

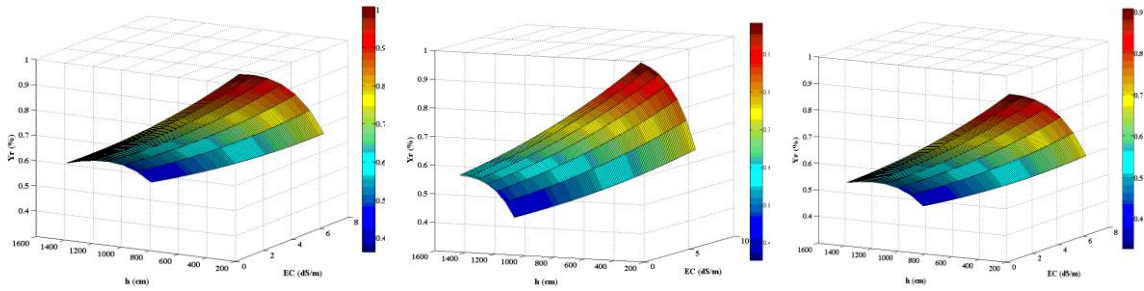
### معرفی و ارزیابی مدل‌های پیشنهادی

در شکل ۳ واکنش عملکرد ریحان به تنش هم‌زمان کم آبی

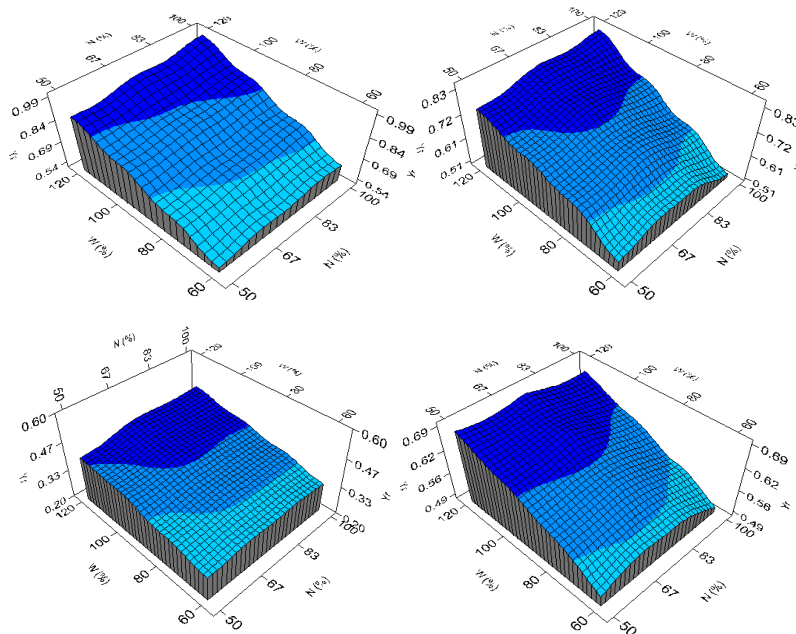
## مدیریت آب و آبیاری



مدلسازی جذب آب به وسیله گیاه ریحان در شرایط تنش های هم زمان آب، شوری و کمبود نیتروژن



شکل ۳. واکنش گیاه به سطوح مختلف تنش آبی و شوری به ترتیب از سمت راست در شرایط بدون تنش کودی ( $N_1$ )، ۲۵ درصد ( $N_2$ ) و ۵۰ درصد تنش کودی ( $N_3$ ) ( $Y_r$  عملکرد نسبی ریحان،  $h$  پتانسیل ماتریک (cm) و EC هدایت الکتریکی آب آبیاری (dS/m))



شکل ۴. واکنش گیاه به سطوح مختلف تنش آبی و مواد غذایی در شرایط نبود تنش شوری به ترتیب از سمت بالا و سمت راست به چپ در سطح شوری  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$  و  $S_4$

ریحان به تنش هم زمان کم آبی و کودی در شرایط مختلف تنش شوری ارائه شده است. نتایج نشان می دهد در این شرایط، همه سطوح تنش شوری با افزایش مقدار آب مصرفی و کود مصرفی عملکرد محصول افزایش پیدا می کند. به عنوان مثال، در تیمارهای

بیشترین و کمترین عملکرد محصول به ترتیب در تیمار شاهد ( $S_1N_1W_1$ ) و تیمار ( $S_4N_4W_4$ ) به میزان ۱۲۰/۸۳ و ۲۱/۲۰ گرم به دست آمد که روند تغییرات تیمارهای تنش هم زمان با نتایج پژوهش عزیزیان و سپاس خواه (۲۰۱۴) همخوانی خوبی دارد. همچنین در شکل ۴ واکنش عملکرد

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

از میان همه مدل‌های ضرب‌پذیر ارائه‌شده، مدل MB-EXP دارای بهترین برازش (کمترین nRMSE و ME) است. بنابراین، بر اساس آماره‌های محاسبه‌شده، واکنش گیاه ریحان به تنش‌های هم‌زمان سه‌گانه کم‌آبی، شوری و کمبود نیتروژن با استفاده از مدل MB-MB-EXP مناسب‌ترین شبیه‌سازی را به همراه دارد. در این پژوهش، این نکته قابل ذکر است که مدل پیشنهادی MB-MB-EXP با ساختار نمایی خود به استناد آماره‌های محاسبه‌شده، بهتر از مدل مفهومی تنش توأمان همایی و همکاران (۲۰۰۲a) که عزیزیان و سپاس‌خواه (۲۰۱۴) در سطوح مختلف تنش کودی آزمودند، شبیه‌سازی جذب آب به‌وسیله گیاه را تحت شرایط تنش هم‌زمان سه‌گانه آب، شوری و کمبود نیتروژن انجام می‌دهد.

$S_2N_1W_1$  و  $S_2N_2W_2$ ,  $S_2N_3W_3$ ,  $S_2N_4W_4$  عملکرد محصول به‌ترتیب برابر ۰/۳۵، ۰/۳۰، ۰/۴۵، ۰/۱۶، ۰/۹۲ گرم به دست آمد. شیب افزایش عملکرد در تنش‌های ملایم شوری بیشتر از تنش‌های شدید است. اثر تنش کودی کمتر از تنش آبی و تنش شوری است. در تنش‌های شوری ملایم افزایش کود مصرفی باعث افزایش عملکرد می‌شود؛ لیکن در تنش‌های شوری شدید، افزایش کود مصرفی کمک چندانی به افزایش عملکرد محصول نمی‌کند. از طرف دیگر، در تنش‌های شوری شدید افزایش مقدار مصرف آب باعث افزایش عملکرد محصول می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت تنش آبی نسبت به تنش مواد غذایی است که با نتایج پژوهش عزیزیان و سپاس‌خواه (۲۰۱۴) و Ekren و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی دارد.

جدول ۴. آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه مدل‌ها تحت شرایط تنش توأمان آبی، شوری و مواد غذایی

مدل‌ها	nRMSE	ME	EF	CRM	R <sup>2</sup>
MB-MB-F	۷/۲۵	۱۹/۰۹	۰/۹۳	-۰/۰۱	۰/۹۸
MB-MB-VG	۷/۴۵	۱۹/۷۵	۰/۹۰	۰/۰۲	۰/۸۰
MB-MB-H	۹/۸۸	۱۹/۱۷	۰/۹۹	۰/۰۳	۰/۹۸
MB-MB-D	۲۳/۲۰	۵۵/۷۸	۰/۹۲	-۰/۰۸	۰/۹۶
MB-Conceptual H	۱۷/۹۳	۳۹/۷۸	۰/۹۶	۰/۱۲	۰/۹۸
MB-Modified Conceptual H	۱۴/۲۰	۳۱/۱۹	۰/۷۵	-۰/۰۸	۰/۹۲
MB-MH-EXP	۱۱/۲۴	۲۳/۰۸	۰/۸۴	۰/۰۲	۰/۹۶
MB-MB-EXP	۷/۲۲	۱۹/۰۵	۰/۹۸	۰/۰۱	۰/۹۹

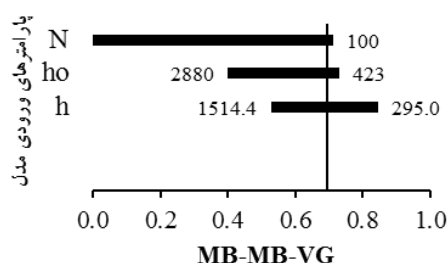
را دارد؛ زیرا در این مدل، با واردکردن مقادیر مختلف پارامترهای ورودی شامل کود نیتروژنه ( $N$ )، پتانسیل ماتریک ( $h$ ) و پتانسیل اسمزی ( $h_0$ )، میزان متوسط ضریب تحلیل حساسیت به‌ترتیب برابر ۱، ۰/۳۴ و ۰/۳۹ به دست می‌آید ( $S_c < 1/5$ ). و به استناد آماره‌های محاسبه‌شده نیز این مدل در مقایسه با مدل‌های مورد مطالعه در این

### تحلیل حساسیت مدل‌های پیشنهادی

در جدول ۵، تحلیل حساسیت مدل‌های ریاضی پیشنهادی بر اساس پارامترهای مختلف ورودی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین مدل‌های ریاضی جذب، مدل MB-MB-VG کمترین میزان حساسیت در شبیه‌سازی میزان جذب آب به‌وسیله ریشه نسبت به پارامترهای ورودی

مدل‌سازی جذب آب به وسیله گیاه ریحان در شرایط تنش‌های هم‌زمان آب، شوری و کمبود نیتروژن

۰/۸۵ متغیر بود. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل MB-MB-VG به ترتیب به تغییرات میزان کود نیتروژن، پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریک حساسیت بیشتری دارد (شکل ۵). همچنین به‌عنوان یکی از خروجی‌های تحلیل حساسیت در تمام نقاط قابل پیش‌بینی مدل‌ها در بازه پیوسته، دامنه تغییرات مقادیر شبیه‌سازی هر یک از مدل‌های ریاضی جذب نسبت به هر یک از پارامترهای ورودی در جدول ۵ و شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۵. روند تغییرات مقادیر پارامترهای ورودی نسبت به تغییرات خروجی مدل MB-MB-VG

پژوهش، جذب آب را نسبتاً قابل قبول شبیه‌سازی می‌کند ( $nRMSE=7/22$  و  $ME=19/05$ ). به استناد ضریب حساسیت مدل‌ها ( $S_c$ )، این مدل با کمترین پارامتر ورودی، دقت مناسبی در مقایسه با دیگر مدل‌های مورد مطالعه دارد (جدول ۵). بنابراین، به ترتیب سه مدل MB-MB-VG، MB-MB-F و MB-MB-EXP به استناد آماره‌های محاسبه شده و تحلیل حساسیت از بین هشت مدل اشتقاقی پیشنهادی انتخاب شدند.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در مدل MB-MB-VG با تغییر مقادیر ورودی کود نیتروژن بین ۰ تا ۱۰۰ درصد نیاز کودی، مقادیر خروجی مدل که همانا مقادیر عملکرد نسبی پیش‌بینی شده با مدل منتخب MB-MB-VG باشد، بین ۰ تا ۰/۷۱ تغییر می‌کند. همچنین اگر مقدار پارامتر ورودی پتانسیل اسمزی بین بازه پیوسته حد بالا و پایین مقادیر از ۴۲۳ تا ۲۸۸۰ سانتی‌متر و مقادیر پتانسیل ماتریک بین ۲۹۴ تا ۱۵۱۴/۴ سانتی‌متر تغییر کند، مقادیر خروجی مدل به ترتیب بین ۰/۴ تا ۰/۷۳ و ۰/۵۳ تا

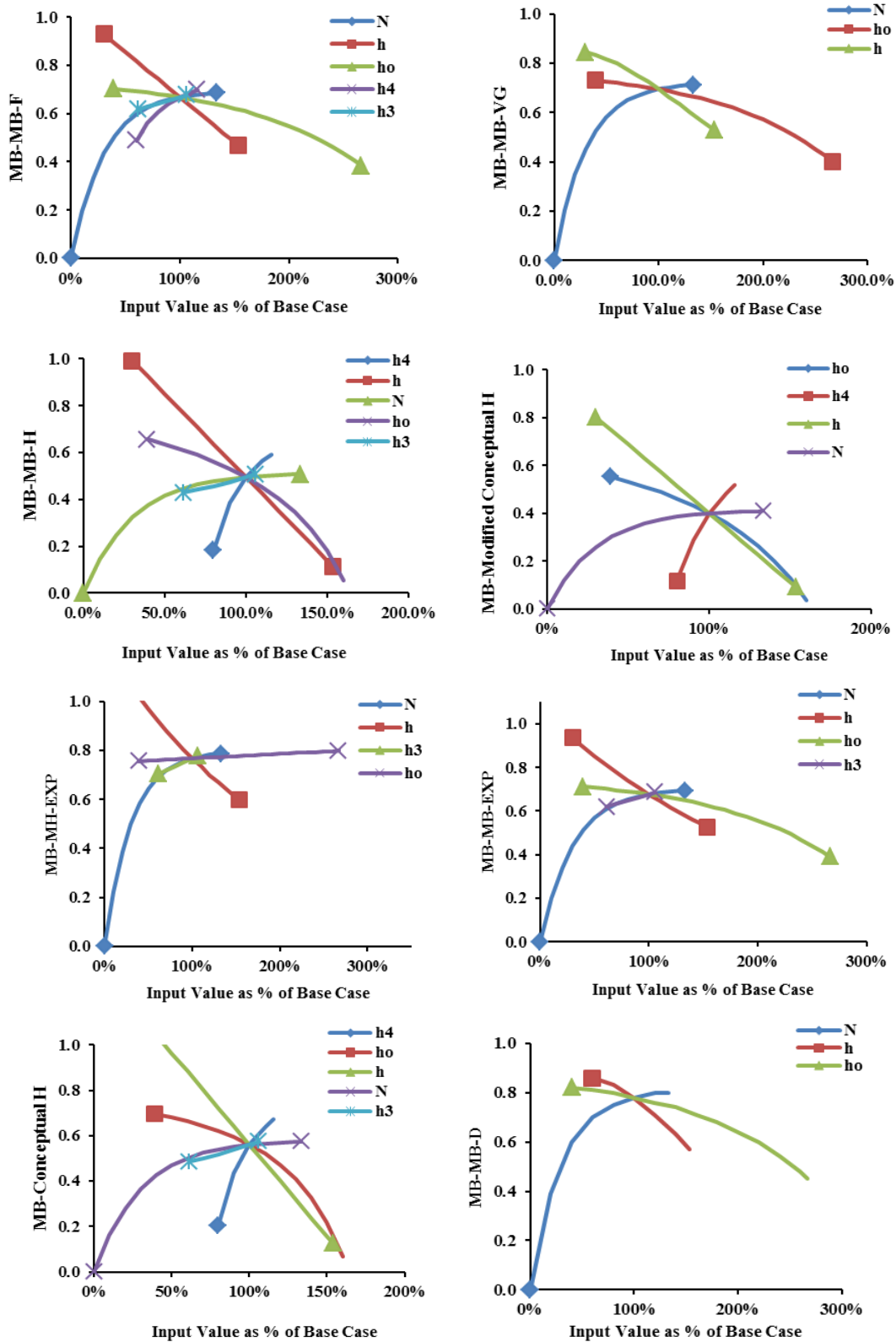
جدول ۵. تجزیه و تحلیل حساسیت مدل‌های ریاضی جذب آب تحت شرایط تنش‌های توأمان سه‌گانه

نام مدل	پارامترهای ورودی مدل	مقدار متوسط پارامتر $S_c$	درجه حساسیت مدل
MB-MB-F	N	۱	متوسط
	h	۰/۴۹	متوسط
	h <sub>o</sub>	۰/۳۹	متوسط
	h <sub>4</sub>	۰/۵۶	متوسط
MB-MB-VG	h <sub>3</sub>	۰/۱۷	کم
	N	۱	متوسط
	h	۰/۳۴	متوسط
MB-MB-H	h <sub>o</sub>	۰/۳۹	متوسط
	N	۱	متوسط
	h	۱/۱۸	متوسط
	h <sub>o</sub>	۱/۴۲	متوسط
	h <sub>4</sub>	۲/۹۱	زیاد
	h <sub>3</sub>	۰/۳۲	متوسط

ادامه جدول ۵. تجزیه و تحلیل حساسیت مدل‌های ریاضی جذب آب تحت شرایط تنش‌های توأمان سه‌گانه

نام مدل	پارامترهای ورودی مدل	مقدار متوسط پارامتر $S_c$	درجه حساسیت مدل
MB-MB-D	$N$	۱	متوسط
	$h$	۰/۴۶	متوسط
	$h_0$	۰/۳۹	متوسط
MB-Conceptual H	$N$	۱	متوسط
	$h$	۱/۱۸	متوسط
	$h_0$	۱/۳۵	متوسط
	$h_4$	۲/۸۶	زیاد
	$h_3$	۰/۳۲	متوسط
MB-Modified Conceptual H	$N$	۱	متوسط
	$h$	۱/۱۹	متوسط
	$h_0$	۱/۴۲	متوسط
	$h_4$	۳/۴۲	زیاد
MB-MH-EXP	$N$	۱	متوسط
	$h$	۱/۴۱	متوسط
	$h_0$	۰/۰۴۲	کم
	$h_3$	۰/۲	کم
MB-MB-EXP	$N$	۱	متوسط
	$h$	۰/۴۱	متوسط
	$h_0$	۰/۳۹	متوسط
	$h_3$	۰/۲	کم

مدلسازی جذب آب به وسیله گیاه ریحان در شرایط تنش های همزمان آب، شوری و کمبود نیتروژن



شکل ۶. روند تغییرات مقادیر پارامترهای ورودی نسبت به تغییرات خروجی مدل های ریاضی جذب آب

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۵ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۴

## نتیجه گیری

بر اساس نتایج پژوهش حاضر، اگر جذب آبی که گیاه بر اثر تنش‌های شوری و کم‌آبی شبیه‌سازی کرده است، بیشتر یا مساوی  $0/9$  باشد، توصیه می‌شود که کود مورد نیاز گیاه کامل مصرف شود. همچنین مناسب‌ترین مدل پیشنهادی تنش سه‌گانه از بین هشت مدل بررسی شده، مدل ضرب‌پذیر MB-MB-EXP است که دارای کمترین nRMSE و ME بین مدل‌های پیشنهادی و بهترین برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده است. مدل MB-MB-VG با کمترین تعداد و مقدار حساسیت به پارامترهای ورودی، دارای دقتی مناسب در شبیه‌سازی جذب آب به‌وسیله گیاه است. با توجه به اینکه مطالعه مشابهی در مورد مدل‌سازی ریاضی تنش هم‌زمان آب، شوری و کمبود نیتروژن انجام نشده است، می‌توان بر اساس انطباق درخور ملاحظه داده‌های آزمایشی بر مدل‌های ضربی اشتقاقی پیشنهادی این پژوهش و همخوانی این نتایج مطالعات انجام گرفته در مورد واکنش گیاه ریحان به تنش‌های محیطی با نتایج پژوهش‌های امیدبگی (۱۳۹۰) و Ekren و همکاران (۲۰۱۲)، می‌توان به ترتیب استفاده از مدل‌های ریاضی MB-MB-EXP و MB-MB-VG را توصیه کرد.

## منابع

۱. امیدبگی، ر. ۱۳۹۰. تولید و فراوری گیاهان دارویی. جلد سوم، چاپ ششم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، شماره نشر ۱۴۹، ۳۹۷ صفحه.
۲. جلالی و ر. و هماییم (۱۳۸۹) مدل‌سازی اثر زمان اعمال تنش محیط ریشه بر عملکرد گیاه کلزا. به‌زراعی کشاورزی، ۱۲ (۱): ۲۹-۴۰.
۳. حسینی ی. هماییم. کریمیان ن ع. و سعادت س (۱۳۸۷) مدل‌سازی واکنش کلزا به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن. علوم و فنون کشاورزی. جلد ۱۲ شماره ۴۶. ص ۷۲۱-۷۳۵.
۴. سرائی تبریزیم (۱۳۹۳) مدل‌سازی جذب آب به‌وسیله گیاه ریحان به شوری و نیتروژن. رساله دکتری جهت دریافت درجه دکتری تخصصی مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۴۰ صفحه.
۵. سرائی تبریزیم. بابازاده ح. هماییم. کاوه ف. و پارسی‌نژاد م (۱۳۹۳) شبیه‌سازی پاسخ گیاه ریحان به شوری آب آبیاری. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸ (۴): ۶۹۱-۷۰۱.
۶. سعادت س. هماییم. و لیاقت ع (۱۳۸۴) اثر شوری محلول خاک بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه سورگوم علوفه‌ای. علوم خاک و آب، ۱۹ (۲): ۲۴۳-۲۵۴.
۷. علیزاده ح. لیاقت ع م و نوری محمدیه م (۱۳۸۸) ارزیابی توابع کاهش جذب آب توسط گوجه فرنگی در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳ (۳): ۸۸-۹۷.
۸. سفیدکن ف (۱۳۸۷) برنامه راهبردی تحقیق پژوهشات گیاهان دارویی. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان ترویج، آموزش و تحقیقات کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، ۴۰ صفحه.
۹. کیانی ع. هماییم. و میرلطیفی م (۱۳۸۵) ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم‌آبی. علوم خاک و آب، ۲۰ (۱): ۷۳-۸۳.
10. Azizian A and Sepaskhah A R (2014) Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. International Plant Production. 8 (2): 183-214.

## مدیریت آب و آبیاری

11. Bonan G B (1996) A Land Surface Model (LSM Version 1.0) for Ecological, Hydrological, and Atmospheric Studies: Technical Description and User's Guide. NCAR Tech. Note NCAR/TN-417+STR, 150 pp.
12. Dirksen C and Augustijn D C (1988) Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. Agricultural Abstracts, pp. 188.
13. Ekren S, Sonmez C, Ozcakal E, Kukul Kurttas Y S, Bayram E, Gurgulu H (2012) The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum L.*). Agricultural Water Management. 57 (2): 111-126.
14. Francois L E (1996) Salinity effects on four sunflower hybrids. Agronomy. 88: 215-219.
15. 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.
16. 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: 111-126.
17. 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.
18. Hosaini Y, Homae M, Karimian N A and Saadat S (2009) Modeling vegetative stage response of Canola (*Brassica napus L.*) to combined salinity and boron stresses. International Plant Production. 4 (3):175-186.
19. Kustas W P, Humes K S and Norman J M (1996) Single- and dual-source modeling of surface energy fluxes with radiometric surface temperature. Applied Meteorology. 35(1): 110-121.
20. Liu H F, Genard M, Guichard S and Bertin N (2007) Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes, Experimental Botany. 58 (13): 3567-3580.
21. Loague K and Green R E (1991) Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Contaminant Hydrology. 7: 51-73.
22. Maas E V and Hoffman G J (1977) Crop salt tolerance-current assessment. Irrigation and Drainage Division, ASCE. 103: 115-134.
23. Richards L A (1931) Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics. 1: 318-333.
24. Robinson, D. A., Gardner, C. M. K. and J. D. Cooper. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. Hydrology, 223: 198-211.
25. Saadat S and Homae M (2015) Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. Agricultural Water Management. 152:119-124.
26. Sepaskhah A R and Beirouti Z (2009) Effect of irrigation interval and water salinity on growth of madder (*Rubia tinctorum L.*). International Plant Production. 3(3):1-16.
27. Shenker M, Ben-Gal A and Shani U (2003) Sweet corn response to combined nitrogen and salinity environmental stresses. Plant Soil. 256: 139-147.
28. 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.