

شبیه‌سازی پاسخ گیاه ریحان به شوری آب آبیاری

مهدی سرائی‌تبریزی، حسین بابازاده^{۱*}، مهدی همائی، فریدون کاوه و مسعود پارسی‌نژاد

دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی آب، تهران، ایران.

mahdisarai@yahoo.com

دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی آب، تهران، ایران.

h_babazadeh@srbiau.ac.ir

استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی، تهران، ایران.

mhomae@modares.ac.ir

دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی آب، تهران، ایران.

fhnkaveh@yahoo.com

استاد، دانشگاه تهران، پردیس کرج، دانشکده علوم و مهندسی آب، کرج، ایران.

parsinejadmasoud@gmail.com

چکیده

مدل‌های ریاضی چندی برای پاسخ گیاهان به شوری وجود دارد که در همه آنها شوری عصاره اشباع خاک مینای واکنش گیاه به شوری محیط ریشه در نظر گرفته می‌شود. چنانچه بتوان از شوری آب آبیاری به جای شوری عصاره اشباع خاک در این مدل‌ها استفاده کرد، گامی مؤثر در راستای کاربردی کردن این مدل‌ها برداشته می‌شود. هدف از این پژوهش، ارزیابی کمی پاسخ گیاه ریحان به شوری آب آبیاری و برآورد آستانه کاهش عملکرد آن و نیز بررسی کارایی مدل‌های ریاضی موجود برای برآورد عملکرد این گیاه نسبت به شوری آب آبیاری است. بدین منظور، آزمایشی با ۱۳ سطح شوری آب شامل شوری‌های ۱/۱۷۵ (تیمار شاهد)، ۱/۸، ۲، ۲/۲، ۲/۵، ۲/۸، ۳، ۳/۵، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر انجام شد. به منظور کمی کردن اثر شوری بر عملکرد محصول، از هفت مدل ریاضی استفاده شد. نتایج نشان داد آستانه کاهش عملکرد ریحان نسبت به شوری آب آبیاری ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شیب خط کاهش عملکرد ۸/۱ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر است. مدل ریاضی همایی و همکاران (۲۰۰۲) در شبیه‌سازی تابع کاهش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری دارای دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها بود. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های جذب همایی و همکاران (۲۰۰۲)، ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) و دو مدل آماری استپوهن و همکاران (۲۰۰۵) برای شبیه‌سازی واکنش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری از دقتی مناسب برخوردارند (کمترین مقدار $nRME$ و ME). همچنین، نتایج نشان داد که در شرایطی که آبشویی در حد مناسب اعمال شود، بین نتایج مدل‌ها نسبت به شوری عصاره اشباع و شوری آب آبیاری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی: آستانه کاهش عملکرد، مدل‌های جذب آب.

۱ - نویسنده مسئول، آدرس: تهران، انتهای بلوار شهیدستاری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی

آب، کد پستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵

* - دریافت: تیر ۱۳۹۳ و پذیرش: آبان ۱۳۹۳

مقدمه

درک پاسخ گیاه به سطوح مختلف شوری برای استفاده از منابع آب لب‌شور به منظور دستیابی به عملکرد اقتصادی محصول اهمیت فراوان دارد (جلالی و همایی، ۱۳۸۹؛ کیانی و همکاران، ۱۳۸۵؛ همایی، ۱۳۸۱).

سپاسخواه و بیروتی (۲۰۰۹) تحت شرایط گلخانه‌ای حد آستانه و شیب خط کاهش عملکرد رونس به ازای هر واحد شوری آب آبیاری را تعیین کردند. نتایج نشان داد که آستانه کاهش رونس به شوری آب آبیاری ۱۱/۶ دسی‌زیمنس بر متر و شیب خط کاهش عملکرد نیز ۳/۷ درصد می‌باشد.

رنجبر و بناکار (۱۳۸۹) آستانه تحمل به شوری چهار رقم تجاری گندم را برآورد کردند. نتایج نشان داد که آستانه کاهش عملکرد به شوری ارقام کویر، روشن، ماهوتی و مرودشت به ترتیب ۵/۰۰، ۴/۵۸، ۴/۳۴ و ۵/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. افزایش هر واحد شوری بیشتر از آستانه تحمل، عملکرد دانه را در ارقام کویر، روشن، ماهوتی و مرودشت به ترتیب ۴/۵۴، ۴/۰۷، ۴/۴۸ و ۵/۴۸ درصد کاهش داد. خوش‌خلق سیما و همکاران (۱۳۹۲) حد آستانه تحمل به شوری ارقام مختلف جو را تعیین کردند. نتایج نشان داد که رقم افضل با مقدار ۲۵/۲۴ دسی‌زیمنس بر متر و رقم نمونه با مقدار ۱۶/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب بیشترین و کمترین حد آستانه تحمل به شوری را نسبت به ارقام دیگر نشان دادند.

در اغلب این پژوهش‌ها، شوری عصاره اشباع خاک مبنای پاسخ گیاه به شوری در نظر گرفته شده است. با توجه به عمق کم ریشه ریحان، با لحاظ نیاز آبشویی مناسب می‌توان به جای استفاده از شوری عصاره اشباع (به عنوان یک پارامتر متغیر و با اندازه‌گیری هزینه‌بر و زمان‌بر) به طور مستقیم در مدل‌های جذب، از شوری آب آبیاری (یک پارامتر تقریباً ثابت، با اندازه‌گیری آسان و ارزان) استفاده کرد. این امر نقش موثری در کاربردی کردن مدل‌های جذب آب در مدیریت کیفی آب در مزرعه ایفا خواهد کرد. چرا که محاسبه واکنش گیاه بر اساس

رویکرد جهانی به استفاده از گیاهان دارویی و ترکیب‌های طبیعی در صنایع دارویی، آرایشی-بهداشتی و غذایی و به دنبال آن توجه مردم، مسئولین و صنایع داخلی به استفاده از گیاهان دارویی و معطر نیاز مبرم به پژوهش‌های پایه‌ای و کاربردی وسیعی را در این زمینه نمایان می‌سازد. گیاهان دارویی یکی از منابع بسیار ارزشمند در گستره وسیع منابع طبیعی ایران است که در صورت شناخت علمی، کشت، توسعه و بهره‌برداری صحیح می‌تواند نقش مهمی در سلامت جامعه، اشتغال‌زایی و صادرات غیر نفتی داشته باشد (سفیدکن، ۱۳۸۷). ریحان (*Ocimum basilicum*) به عنوان یکی از گیاهان دارویی مهم، گیاهی است علفی، یک‌ساله، معطر، دارای ساقه منشعب از قاعده، به ارتفاع ۱۵ تا ۴۵ سانتی‌متر و متعلق به خانواده نعناع (*Lamiaceae*) است (امیدبیگی، ۱۳۹۰).

در رابطه با واکنش گیاه ریحان به شوری مطالعات چندانی انجام نشده است. در حالی که بخش عظیمی از خاک‌ها و حجم چشمگیری از کل منابع آبی موجود کشور به درجات مختلف مبتلا به شوری است (امیدبیگی، ۱۳۹۰؛ سفیدکن، ۱۳۸۷). با افزایش شوری خاک، فشار اسمزی افزایش یافته و گیاه برای جذب مقدار معینی آب، باید انرژی حیاتی بیشتری صرف کند.

چون گیاه کل انرژی حیاتی خود را نمی‌تواند فقط صرف غلبه بر فشار اسمزی محلول خاک کند، با افزایش و بالا رفتن فشار اسمزی، هر چند هم که آب به قدر کافی در محیط ریشه وجود داشته باشد، جذب آن به‌وسیله گیاه کاهش می‌یابد. با کاهش پتانسیل اسمزی، انرژی آزاد آب کاهش یافته و گیاه برای به دست آوردن مقدار مشخصی آب باید انرژی حیاتی بیشتری صرف کند. بنابراین، بخشی از انرژی که خود گیاه برای رشد و نمو به آن نیاز دارد، صرف به دست آوردن آب شده و بدین ترتیب رشد عمومی آن کاهش می‌یابد. بنابراین،

برای بیان کمی S ، مدل‌هایی وجود دارند که می‌توان آنها را به دو گروه مدل‌های خرد^۱ و مدل‌های کلان^۲ تقسیم کرد. مدل‌های خرد به دلیل مبانی غیر واقعی و نیز غیرقابل اندازه‌گیری بودن پارامترهای آن، تا به حال به بوت‌ها که گذاشته نشده‌اند. به همین دلیل، گروه دیگری از مدل‌ها که به مدل‌های کلان شهرت دارند، طراحی و ارائه شده است (همایی، ۱۹۹۹؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲a؛ همایی و شومیدهانتر، ۲۰۰۸). در مدل‌های کلان، مقدار آب جذب شده به وسیله گیاه برابر با میزان تعرق واقعی^۳ و در شرایطی که هیچ‌گونه محدودیت آبی در خاک وجود نداشته باشد، برابر با تعرق پتانسیل^۴ در نظر گرفته شده و به صورت کلی زیر ارائه می‌شود (همایی، ۱۹۹۹):

$$S = S_{\max} = \frac{T_p}{Z_r} \quad (2)$$

که در آن:

S_{\max} حداکثر مقدار آب جذب شده به وسیله ریشه گیاه در واحد حجم خاک و زمان تحت شرایط عدم تنش ($L^3L^{-3}T^{-1}$)، Z_r عمق توسعه ریشه (L) و T_p تعرق پتانسیل (LT^{-1}) است. اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق (T_p) فراهم آورد، به اندازه‌ای که به آن تابع کاهش^۵ اطلاق می‌شود، از تعرق کاسته می‌شود (همایی، ۱۹۹۹). مهم‌ترین مدل‌های جذب، موسوم به مدل‌های کلان، توابعی تجربی است که جذب آب به وسیله گیاه را بر مبنای پاسخ گیاه به پتانسیل آب خاک توصیف می‌کند (همایی، ۱۹۹۹؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲a). در حال حاضر، این مدل‌ها به دلیل کاربردی بودن، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس این مدل‌ها، تابع جذب آب به وسیله گیاه به صورت تابعی از پتانسیل اسمزی محلول خاک تعریف و بر اساس آن رابطه کلی جذب آب از خاک‌های شور به صورت زیر ارائه می‌شود (همایی، ۱۹۹۹).

یک پارامتر ثابت، مدیریت آب در مزرعه را از سطوح پژوهشی به سطح کارشناسی و کاربردی (میراب و آبیاری در مزرعه) تغییر خواهد داد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی پاسخ گیاه ریحان به شوری آب آبیاری و برآورد آستانه کاهش عملکرد آن و نیز ارزیابی مقایسه‌ای کارایی مدل‌های ریاضی موجود برای برآورد عملکرد این گیاه نسبت به شوری آب آبیاری و شوری عصاره اشباع خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

مدل‌های مورد استفاده

گیاهان برای فتوسنتز و تعرق، به آب نیاز دارند. با افزایش شوری، جذب آب به وسیله گیاه کاهش می‌یابد. روش مناسب کمی کردن جذب آب به وسیله ریشه گیاهان، استفاده از معادله کلی جریان یا معادله ریچاردز است. تقریباً همه مدل‌های ریاضی حرکت آب و املاح در خاک به وسیله حل عددی معادله ریچاردز - داریسی با در نظر گرفتن ترم جذب آب برای جریان در بعد عمودی ارائه شده‌اند. از آنجا که جذب آب به وسیله گیاهان در رطوبت‌های غیر اشباع صورت می‌گیرد، بنابراین باید آن را در معادله ریچاردز لحاظ کرد. شکل معادله ریچاردز پس از لحاظ کردن ترم جذب آب به وسیله گیاه به صورت زیر است (ریچاردز، ۱۹۳۱؛ همایی، ۱۹۹۹):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S \quad (1)$$

که در آن:

θ درصد رطوبت حجمی خاک، h (L) بار فشاری آب خاک، t (T) زمان، Z (L) عمق خاک، K (LT^{-1}) هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و S (T^{-1}) منبع مصرف آب است. ترم جذب آب S به وسیله ریشه در رابطه (۱) تابعی از پتانسیل ماتریک، پتانسیل اسمزی، ویژگی‌های ریشه و شرایط آب و هوایی همچون نیاز تیخیری است (ریچاردز، ۱۹۳۱؛ همایی، ۱۹۹۹).

¹Microscopic Models

²Macroscopic Models

³Actual Transpiration (T_a)

⁴Potential Transpiration (T_p)

⁵Reduction Function (α)

(۱۹۸۸) رابطه (۵) را نسبت به آستانه شوری (h_o^*) تعدیل و رابطه زیر را پیشنهاد کرده‌اند:

$$\alpha(h_o) = \frac{I}{I + \left(\frac{h_o^* - h_o}{h_o^* - h_{o50}} \right)^P} \quad (6)$$

این مدل نسبت به مدل‌های قبلی می‌تواند با دقتی بیشتر واکنش گیاه به شوری را شبیه‌سازی کند، لیکن مهم‌ترین محدودیت آن تعیین پارامتر h_{o50} است. همچنین، پارامتر P به صورت فیزیکی و یا به صورت تجربی در آن تعریف نشده است. در واقع، P فاکتور شکل تابع است. با فرض این‌که P پارامتری وابسته به محصول، خاک و اقلیم است، همایی و همکاران (۲۰۰۲a) رابطه زیر را برای تعیین آن پیشنهاد نمودند:

$$P = \frac{h_{o50}}{h_{o50} - h_o^*} \quad (7)$$

به دلیل این‌که مشکل به دست آوردن h_{o50} تا بدین جا حل نشده باقی مانده بود، همایی و همکاران (۲۰۰۲a) مدل غیرخطی دیگری را ارائه کرده‌اند که در آن به جای h_{o50} پارامتر جدیدی بنام $h_{o max}$ معرفی شد. این مدل، تابعی غیرخطی است که دارای دو آستانه کاهش است (همایی، ۱۹۹۹؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲a):

$$\alpha(h_o) = \frac{I}{I + (I - \alpha_0) / \alpha_0 \left[(h_o^* - h_o) / (h_o^* - h_{o max}) \right]^P} \quad (8)$$

کاهش در مقدار α در شوری‌های بیشتر از h_o^* ادامه می‌یابد تا به یک شوری معین ($h_o max$) برسد. در شوری‌های بیشتر از $h_o max$ افزایش شوری نمی‌تواند با همان روند قبلی در مقدار α کاهش ایجاد کند. این واقعیت نشان می‌دهد که در $h_o > h_o max$ گیاه هنوز زنده بوده و در سطحی بسیار اندک به فعالیت‌های حیاتی خود ادامه می‌دهد. سپس، مقدار P با توجه به $h_o max$ به صورت زیر تعریف شد (همایی، ۱۹۹۹؛ همایی و همکاران، ۲۰۰۲a):

$$P = \frac{h_{o max}}{h_{o max} - h_o^*} \quad (9)$$

$$S = \alpha(h_o) S_{Max} = \alpha \cdot \frac{T_p}{Z_r} \quad (3)$$

که در آن:

α تابعی از پتانسیل اسمزی خاک بوده و آن را به صورت αh_o تابع بدون بعد پاسخ به تنش شوری نشان می‌دهند. رابطه (۳) شکل عمومی مدل‌های کلان تحت تنش شوری است (همایی، ۱۹۹۹). توابعی چند برای برآورد αh_o به وسیله پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است، ماس و هافمن (۱۹۷۷) تابعی خطی و دو تکه‌ای ارائه کرده‌اند که بر مبنای آن تا پیش از آستانه کاهش (h_o^*)، هیچ‌گونه کاهشی در جذب آب پدید نمی‌آید. لیکن، با افزایش h_o به مقادیر بالاتر از h_o^* ، مقدار جذب به طور خطی کاهش می‌یابد:

$$\alpha(h_o) = I - \frac{b}{360} (h_o^* - h_o) \quad (4)$$

که در آن:

b شیب خط یا مقدار کاهش عملکرد به ازای یک واحد افزایش شوری پس از آستانه شوری است. از آنجا که منحنی دقیق پاسخ گیاه به شوری، شکلی سیگموییدی و نه خطی دارد، به همین دلیل ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) معادله‌ای غیرخطی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$\alpha(h_o) = \frac{I}{I + \left(\frac{h_o}{h_{o50}} \right)^P} \quad (5)$$

که در آن:

h_{o50} مقدار پتانسیل اسمزی (L) است که در آن جذب آب به وسیله گیاه به اندازه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و P نیز ضریبی تجربی است که وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است.

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌است که جذب آب به وسیله گیاه تا رسیدن به یک شوری معین (h_o^*) کاهش نمی‌یابد، به همین دلیل دیرکسن و آگوستین

(استپوهن و همکاران، ۲۰۰۵a)؛ استپوهن و همکاران، ۲۰۰۵b). نیاز آبشویی در تیمارهای آزمایشی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (آیاز و همکاران، ۲۰۱۲):

$$LR = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}} \quad (13)$$

که در آن:

LR نیاز آبشویی، EC_{iw} هدایت الکتریکی آب آبیاری (dS/m) و EC_{dw} هدایت الکتریکی آب زهکشی (dS/m) (که در هر آبیاری اندازه‌گیری می‌شد)، است. نیاز آبشویی برای همه تیمارها بین ۱۶/۶ و ۲۵ درصد بدست آمد.

آزمایش‌ها در ۱۳ تیمار شوری شامل ۱/۱۷۵ (تیمار شاهد)، ۱/۸، ۲، ۲/۲، ۲/۵، ۲/۸، ۳، ۳/۵، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر در سه تکرار انجام شد. برای اعمال تیمار شوری از آب شور رودخانه شور واقع در منطقه بین پیک زرنند و ورامین استفاده شد. نتایج تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

در سال‌های اخیر مدل‌های دیگری نیز ارائه شده که بر خلاف مدل‌های کلان که مبنای فیزیکی-تجربی دارند، این مدل‌ها مبنای آماری دارند. شکل کلی این معادلات به صورت $Y_r = f(EC_e)$ تعریف شده و مهم‌ترین آن‌ها شامل ویبول تصحیح شده (۲۰۰۵a)، نمایه دوگانه (۲۰۰۵a) و گومپرتز (۲۰۰۵b) است:

$$Y_r = 100 \exp(C(EC)^a) \quad (10)$$

$$Y_r = 100 \exp(C(EC) - a(EC)^2) \quad (11)$$

$$Y_r = 100 [1 - \exp[C(\exp(a(EC)))] \quad (12)$$

که در آن‌ها:

Y_r و EC به ترتیب عملکرد نسبی (%)، متوسط شوری آب آبیاری طی فصل رشد (dS/m) و a و C ضرایب ثابت هر معادله است.

اجزای مجهول این معادلات ضرایب a و C است. این ضرایب از طریق برازش هر معادله بر مقادیر مشاهده‌ای عملکرد نسبی (Y_r) و EC مشخص می‌شود

جدول ۱- نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نمونه آب رودخانه شور

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

SAR* برحسب (milliequivalent/liter)^{۱/۵}

غیرخطی که به وسیله سازندگان دستگاه پیشنهاد شده، بیشترین دقت را در برآورد رطوبت دارا است ($RMSE=0.023$ و $R^2=0.935$). بنابراین، در این بررسی، از روش سازندگان دستگاه برای برآورد رابطه بین رطوبت و ثابت دی الکتریک استفاده شد.

تغرق نسبی با استفاده از تغییرات رطوبت روزانه خاک محاسبه شد. برای کاهش تبخیر از سطح خاک گلدان‌ها، یک لایه شن به ضخامت دو سانتی‌متر استفاده شد. در پایان آزمایش عملکرد ماده خشک در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری و عملکرد نسبی از تقسیم عملکرد

از روش‌های نسبتاً جدید برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده از دستگاه تئاپروب است. از مزایای این روش اندازه‌گیری سریع، دقت بالا، اندازه‌گیری مستقیم در صحرا و در شرایط طبیعی و قابلیت اندازه‌گیری رطوبت خاک از حد رطوبت پژمردگی تا رطوبت اشباع است. برای برنامه‌ریزی دقیق آبیاری از دستگاه تئاپروب استفاده شد که به روش وزنی نیز مورد واسنجی قرار گرفت. در این بررسی، دستگاه تئاپروب با روش‌های مختلف (خطی، غیرخطی و روش ویژه) واسنجی شد (رابینسن و همکاران، ۱۹۹۹). نتایج نشان داد که روش واسنجی

شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین است. مقدار EF بین $-\infty$ تا $+1$ متغیر است. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کارآتر است. در حالی که مقدار CRM نشان‌دهنده تمایل مدل برای بیش‌برآوردی^۶ و یا کم‌برآوردی^۷ در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. بیشترین مقدار برای EF برابر یک است. مقادیر EF و CRM می‌توانند منفی نیز باشد. آماره CRM بیان‌کننده تمایل مدل به تخمین بیشتر و یا کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. اگر تمامی داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده یکسان باشد، نتایج آماره‌ها به صورت ME ، CRM و $nRMSE$ برابر صفر و EF و d برابر یک خواهد بود. آماره d یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از $-\infty$ تا $+1$ متغیر است (لوگ و گرین، ۱۹۹۱).

با استفاده از آزمون مقایسه میانگین‌های t ، اختلاف نتایج حاصل از مدل‌های ریاضی نسبت به شوری عصاره اشباع خاک و مدل‌های ریاضی نسبت به شوری آب آبیاری تجزیه و تحلیل آماری انجام شد.

نتایج و بحث

در شکل (۱) واکنش گیاه ریحان به سطوح مختلف تنش شوری ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تا شوری $1/7$ دسی‌زیمنس بر متر، عملکرد نسبی ثابت و از آن به بعد با افزایش شوری عملکرد نسبی کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، آستانه کاهش عملکرد گیاه ریحان در مقابل تنش شوری $1/7$ دسی‌زیمنس است. با برآزش معادله ماس و هافمن (۱۹۷۷) بر داده‌های اندازه‌گیری شده، شیب خط کاهش عملکرد ریحان نسبت به شوری $1/1$ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. بر این اساس، ریحان در دسته گیاهان حساس به تنش شوری تقسیم‌بندی می‌شود.

ماده خشک تیمارها بر عملکرد ماده خشک تیمار بدون تنش (تیمار شاهد) محاسبه شد.

مقایسه کمی مدل‌های مورد استفاده با محاسبه آماره‌های بیشینه خطای نسبی (ME)^۱، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ($nRMSE$)^۲، کارآیی مدل‌سازی (EF)^۳، ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)^۴ و شاخص سازگاری (d)^۵ برای هر کدام از مدل‌ها انجام شد:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{O} \quad (14)$$

$$nRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \frac{100}{O} \quad (15)$$

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

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

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (18)$$

که در آن‌ها:

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

¹Maximum Error

²normalizedRoot Mean Square Error

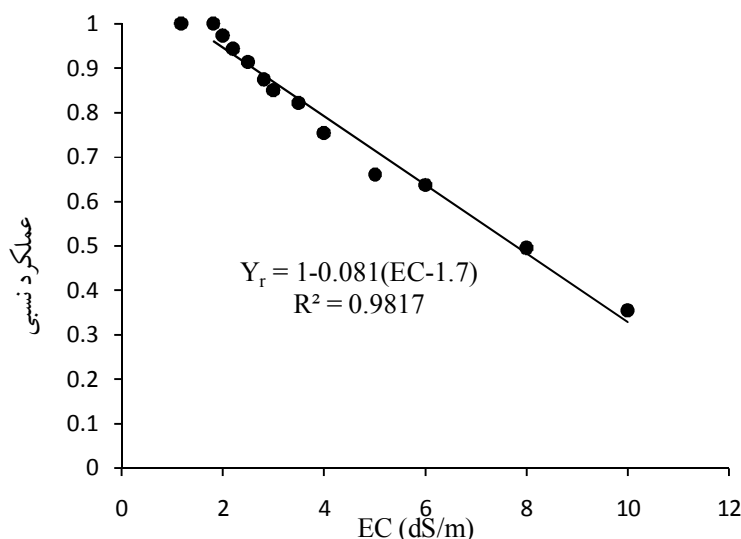
³Modeling Efficiency

⁴Coefficient of Residual Mass

⁵Index of Agreement

⁶Overestimate

⁷Underestimate



شکل ۱- واکنش گیاه ریحان در مقابل تنش شوری آب آبیاری

درصد کاهش می‌یابد (h_{050})، در مدل‌های ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) و دیرکسن و آگوستین (۱۹۸۸) در واکنش عملکرد به شوری آب آبیاری $2833/2$ سانتی‌متر محاسبه شد. مقدار پارامتر P مدل ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) و مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲a) در توابع کاهش عملکرد به ترتیب $2/1$ و $1/31$ و ضریب α_0 در مدل همایی و همکاران (۲۰۰۲a)، $0/26$ محاسبه شد.

به منظور مقایسه مدل‌ها، ابتدا پارامترهای آنها، از طریق روش بهینه‌سازی حداقل مجموع مربعات خطا و برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین شد. در جدول (۲) پارامترهای مدل‌های مورد استفاده ارائه شده است. بر این اساس، آستانه کاهش عملکرد ریحان نسبت به شوری آب آبیاری 612 سانتی‌متر و شیب خط کاهش عملکرد $8/1$ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر است. شوری که در آن عملکرد 50

جدول ۲- محاسبه ضرایب مدل‌های مورد مطالعه

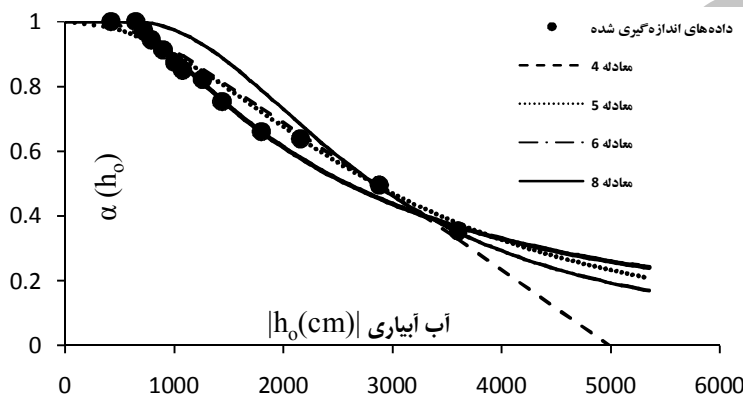
نوع مدل	نام مدل	شماره مدل	h_0^*	h_{0max}	h_{050}	b (%)	a	C	P	α_0
مدل‌های ریاضی	ماس و هافمن	۴	۶۱۲	-	-	۸/۱۰	-	-	-	-
	ون‌گنوختن و هافمن	۵	-	-	$2833/2$	-	-	-	$2/1$	-
	دیرکسن و آگوستین	۶	۶۱۲	-	$2833/2$	-	-	-	$2/1$	-
	همایی و همکاران	۸	۶۱۲	۴۹۸۶	-	-	-	-	$1/31$	$0/26$
مدل‌های آماری	ویبول تصحیح شده	۱۰	-	-	-	-	$-0/018$	$1/87$	-	-
	نمایه دوگانه	۱۱	-	-	-	-	$0/0085$	$0/015$	-	-
	گومپرتز	۱۲	-	-	-	-	$-10/50$	$-0/45$	-	-

اثر شوری بر جذب آب در مدل‌های آماری هدایت الکتریکی و در مدل‌های ریاضی جذب پتانسیل اسمزی است، مقایسه آن‌ها فقط از طریق آماره‌ها امکان‌پذیر است جدول (۲). به هر حال، نتایج نشان می‌دهد مدل همایی و

در شکل (۲) برازش توابع کاهش عملکرد شبیه‌سازی شده نسبت به شوری آب آبیاری بر داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه شده است. همچنین در جدول (۳) آماره‌های ارزیابی مدل‌ها ارائه شده است. از آنجاکه مبنای

دیرکسن و آگوستین (۱۹۸۸) دارا می‌باشند که از این نظر با نتایج پژوهش‌های همایی و همکاران (۲۰۰۲a)، کیانی و همکاران (۱۳۸۵) و سپاسخواه و بیروتی (۲۰۰۹) مطابقت دارد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که در بین مدل‌های آماری واکنش عملکرد به شوری آب آبیاری، مدل‌های آماری تصحیح شده ویبول (۲۰۰۵a) و گومپرتز (۲۰۰۵b) دارای دقت مناسب می‌باشند و مدل آماری ارائه شده دیگر شبیه‌سازی قابل قبولی را ارائه نمی‌کند.

همکاران (۲۰۰۲a) و ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) در شبیه‌سازی تابع کاهش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری بیشترین همخوانی و برازش بهتر (کمترین مقدار ME ، $RMSE$ و $d=1$) نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده را داشته است. در مجموع، با توجه به نتایج ارائه شده به نظر می‌رسد در بین مدل‌های جذب آب در شرایط وجود تنش شوری، مدل‌های همایی و همکاران (۲۰۰۲a) و ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) دقت بیشتری نسبت به مدل‌های خطی ماس و هافمن (۱۹۷۷) و حد آستانه



شکل ۲- توابع کاهش عملکرد نسبت به پتانسیل اسمزی آب آبیاری

جدول ۳- آماره‌های محاسبه شده برای مدل‌های مختلف برآورد توابع کاهش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری

d (%)	CRM (%)	ME (%)	EF (%)	nRMSE (%)	R ²	شماره مدل
۰/۹۹	-۰/۰۳	۹/۲۴	۰/۹۷	۴/۳۳	۰/۹۸۱	۴
۰/۹۹	-۰/۰۱	۷/۸۰	-/۹۸	۳/۸۹	۰/۹۸۹	۵
۰/۹۶	-۰/۰۸	۱۷/۰۸	-/۸۴	۹/۹۳	۰/۹۳۴	۶
۱/۰۰	-/۰۱	۲/۲۶	-/۹۹	۲/۸۴	۰/۹۹۲	۸
۰/۹۸	-۰/۰۵	۱۷/۱	-/۸۹	۸/۹	۰/۹۸۶	۱۰
۰/۸۰	-۰/۲۲	۲۸/۸۵	-/۸۷	۲۷/۲	۰/۹۸۵	۱۱
۰/۹۸	-۰/۰۵	۱۶/۵۶	-/۹۱	۱۰/۲۷	۰/۹۸۳	۱۲

داده‌های مشاهده‌ای در سطح یک درصد تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. همچنین، نتایج نشان داد که بین مدل‌های آماری و داده‌های مشاهده‌ای و همچنین بین دو گروه مدل‌ها در سطح یک درصد تفاوت معنی‌دار وجود ندارد.

برای مقایسه آماری بین دو گروه مدل‌های ریاضی و آماری با همدیگر و با داده‌های مشاهده‌ای از آزمون مقایسه میانگین جامعه آماری به روش t استفاده شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که بین مدل‌های ریاضی و

جدول ۴- آماره‌های محاسبه شده برای مدل‌های مختلف برآورد توابع

کاهش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری

مدل‌های ریاضی			داده‌های مشاهده‌ای			مقایسه با مدل‌ها
P _{value}	SD	درجه آزادی	P _{value}	SD	درجه آزادی	
۰/۳۱ ^{ns}	۰/۰۲	۱۲	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۰۳	۱۲	مدل‌های آماری
-	-	-	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۵	۱۲	مدل‌های ریاضی

ns تفاوت معنی‌دار وجود ندارد.

مدیریت آب در مزرعه را از سطوح پژوهشی به سطح کارشناسی و کاربردی (میراب و آبیاری در مزرعه) تغییر خواهد داد. در جدول (۵) آماره‌های محاسبه شده برای سنجش دقت نتایج مدل‌های ریاضی در دو حالت استفاده از شوری آب آبیاری و شوری عصاره اشباع به عنوان مبنای مدل‌سازی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در اغلب موارد مدل‌سازی واکنش گیاه ریحان بر مبنای شوری آب آبیاری دقت بالاتری نسبت به مدل‌سازی بر مبنای شوری عصاره اشباع خاک داشته است.

همان‌گونه که اشاره شد، شوری عصاره اشباع خاک طی فصل رشد تغییر نموده و اندازه‌گیری آن هم هزینه‌بر و هم زمان‌بر است. حال آنکه اندازه‌گیری شوری آب آبیاری، بسیار آسان و کم هزینه می‌باشد. با توجه به عمق کم ریشه ریحان، با لحاظ نیاز آبشویی مناسب می‌توان به جای استفاده از شوری عصاره اشباع به طور مستقیم در مدل‌های جذب از شوری آب آبیاری استفاده کرد. این امر نقش موثری در کاربردی کردن مدل‌های جذب آب در مدیریت آب در مزرعه ایفا خواهد کرد. چرا که محاسبه واکنش گیاه بر اساس یک پارامتر ثابت،

جدول ۵- آماره‌های محاسبه شده برای مدل‌های مختلف برآورد توابع کاهش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری و شوری عصاره اشباع خاک

شوری عصاره اشباع خاک				شوری آب آبیاری				سنجش نسبت به	
CRM (%)	ME (%)	nRMSE (%)	R ²	CRM (%)	ME (%)	nRMSE (%)	R ²	شماره مدل	
-۰/۱۰	۲۱/۰۶	۱۲/۲۵	۰/۹۷۰	-۰/۰۳	۹/۲۴	۴/۳۳	۰/۹۸۱	۴	
-۰/۰۰۳	۶/۹۱	۳/۵۸	۰/۹۸۶	-۰/۰۱	۷/۸۰	۳/۸۹	۰/۹۸۹	۵	
-۰/۰۵	۱۴/۰۷	۹/۴۹	۰/۹۰۰	-۰/۰۸	۱۷/۰۸	۹/۹۳	۰/۹۳۴	۶	
-۰/۰۸	۱۴/۵۴	۸/۹۲	۰/۹۸۷	-۰/۰۱	۲/۲۶	۲/۸۴	۰/۹۹۲	۸	
۰/۰۲	۱۰/۴۴	۴/۵۹	۰/۹۸۷	-۰/۰۵	۱۷/۱	۸/۹	۰/۹۸۶	۱۰	
-۰/۱۷	۳۴/۲۲	۲۰/۵۵	۰/۹۸۱	-۰/۲۲	۲۸/۸۵	۲۷/۲	۰/۹۸۵	۱۱	
۰/۰۳	۲۲/۷۲	۱۰/۴۰	۰/۹۸۲	-۰/۰۵	۱۶/۵۶	۱۰/۲۷	۰/۹۸۳	۱۲	

اهمیت فراوانی دارد (کیانی و همکاران، ۱۳۸۵). از سوی دیگر، با لحاظ نیاز آبشویی مناسب می‌توان به جای استفاده از شوری عصاره اشباع (به عنوان یک پارامتر متغیر و با اندازه‌گیری هزینه‌بر و زمان‌بر) به طور مستقیم در مدل‌های جذب از شوری آب آبیاری (یک پارامتر تقریباً ثابت، با اندازه‌گیری آسان و ارزان) استفاده کرد. این امر نقش موثری در کاربردی کردن مدل‌های جذب آب در مدیریت کیفی آب در مزرعه ایفا خواهد کرد. چرا که محاسبه واکنش گیاه بر اساس یک پارامتر ثابت، مدیریت آب در مزرعه را از سطوح پژوهشی به سطح کارشناسی و کاربردی (میراب و آبیاری در مزرعه) تغییر خواهد داد.

به منظور مقایسه آماری بین دو روش مدل‌سازی از آزمون t استفاده شد. نتایج آزمون t نشان داد که در تمام مدل‌ها بین دو روش مدل‌سازی (بر مبنای شوری عصاره اشباع خاک و شوری آب آبیاری) در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۶). بنابراین، می‌توان به جای استفاده از شوری عصاره اشباع به طور مستقیم در مدل‌های جذب از شوری آب آبیاری استفاده نمود. استفاده از شوری آب آبیاری به جای شوری عصاره اشباع می‌تواند به کاربردی کردن مدل‌های جذب آب در مدیریت آب در مزرعه کمک کند. مدل‌سازی پاسخ گیاه به سطوح مختلف تنش شوری برای استفاده از منابع آب لب‌شور برای دستیابی به عملکرد اقتصادی محصول

جدول ۶- نتایج آزمون t در مقایسه نتایج حاصل از شوری عصاره اشباع خاک با شوری آب آبیاری

شماره مدل	عصاره اشباع		آب آبیاری		df	P _{value}	معنی‌داری
	میانگین $\alpha(h_0)$	واریانس	میانگین $\alpha(h_0)$	واریانس			
۴	-/۸۱	-/۰۴	-/۸۷	-/۰۲	۱۲	-/۰۰۲	NS
۵	-/۸۰	-/۰۴	-/۷۹	-/۰۴	۱۲	-/۰۰۰	NS
۶	-/۸۵	-/۰۵	-/۸۳	-/۰۶	۱۲	-/۰۲۲	NS
۸	-/۸۵	-/۰۳	-/۷۹	-/۰۵	۱۲	-/۰۰۰	NS
۱۰	-/۷۲	-/۰۶	-/۷۷	-/۰۵	۱۲	-/۰۰۰	NS
۱۱	-/۸۵	-/۰۴	-/۸۹	-/۰۲	۱۲	-/۰۰۳	NS
۱۲	-/۷۱	-/۱۱	-/۷۷	-/۰۹	۱۲	-/۰۰۰	NS

نتیجه‌گیری

آبیاری، دو مدل آماری تصحیح شده ویبول (۲۰۰۵a) و گومپرتز (۲۰۰۵b) شبیه‌سازی قابل قبولی را ارائه می‌کند. با توجه به عمق کم ریشه ریحان، با توجه به این‌که اغلب از سیستم‌های آبیاری سطحی برای آبیاری آن استفاده می‌شود، نفوذ عمقی از نیاز آبتجویی بیشتر می‌باشد.

در نتیجه می‌توان به جای استفاده از شوری عصاره اشباع (به عنوان یک پارامتر متغیر و با اندازه‌گیری هزینه‌بر و زمان‌بر) به طور مستقیم در مدل‌های جذب از شوری آب آبیاری (یک پارامتر تقریباً ثابت، با اندازه‌گیری آسان و ارزان) استفاده کرد. این امر نقش موثری در کاربردی کردن مدل‌های جذب آب در مدیریت کیفی آب در مزرعه ایفا خواهد کرد. چرا که محاسبه واکنش گیاه بر اساس یک پارامتر ثابت، مدیریت آب در مزرعه را از سطوح پژوهشی به سطح کارشناسی و کاربردی تغییر خواهد داد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی پاسخ گیاه ریحان به شوری آب آبیاری و برآورد ضرایب گیاهی آستانه کاهش و شیب خط کاهش عملکرد ریحان و همچنین ارزیابی کارایی مدل‌های ریاضی موجود در برآورد عملکرد نسبی انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد آستانه کاهش عملکرد ریحان نسبت به شوری آب آبیاری ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر و شیب خط کاهش عملکرد ۸/۱ درصد بر دسی‌زیمنس بر متر است. در مجموع، با توجه به نتایج ارائه شده به نظر می‌رسد در بین توابع کاهش عملکرد، مدل ریاضی همایی و همکاران (۲۰۰۲a) و ون‌گنوختن و هافمن (۱۹۸۴) در شبیه‌سازی تابع کاهش عملکرد ریحان به شوری آب آبیاری دارای دقت بیشتری نسبت به مدل‌های خطی ماس و هافمن (۱۹۷۷) و حد آستانه دیرکسن و آگوستین (۱۹۸۸) می‌باشد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که در بین مدل‌های آماری واکنش عملکرد به شوری آب

فهرست منابع

۱. امیدبیگی، ر. ۱۳۹۰. تولید و فرآوری گیاهان دارویی. جلد سوم، چاپ ششم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، شماره نشر ۱۴۹، ۳۹۷ صفحه.
۲. جلالی، و. ر. و همایی، م. ۱۳۸۹. مدل‌سازی اثر زمان اعمال تنش محیط ریشه بر عملکرد گیاه کلزا. به‌زراعی کشاورزی، ۱۲ (۱): ۲۹-۴۰.
۳. خوش خلق سیما، ن. ا.، علی‌تبار، ر.، اقبالی نژاد، م.، بابازاده، پ. و طالع احمد، س. ۱۳۹۲. تأثیر شوری بر جوانه زنی و آستانه تحمل به شوری. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران، ۱۱ (۱): ۱۰۷-۱۲۰.
۴. رنجبر، غ. و بناکار، م. ح. ۱۳۸۹. آستانه تحمل به شوری چهار رقم تجاری گندم. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۲۴ (۳): ۲۳۷-۲۴۲.

۵. سفید کن، ف. ۱۳۸۷. برنامه راهبردی تحقیق پژوهش های گیاهان دارویی، موسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور، سازمان ترویج، آموزش و تحقیقات کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، ۴۰ صفحه.
۶. کیانی، ع.، همایی، م. و میر لطیفی، م. ۱۳۸۵. ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم آبی. مجله علوم خاک و آب، ۲۰ (۱): ۷۳-۸۳.
۷. همایی، م. ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره نشر ۵۸، ۹۷ صفحه.
8. Ayars, J.E., D.L. Corwin, and G.J. Hoffman. 2012. Leaching and root zone salinity control. ASCE Manual and Report Engineering Practice No 71 Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition), ASCE Riston. Chapter 12: 371-403.
9. Dirksen, C. and Augustijn, D. C. 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. Agric. Abstracts, pp. 188.
10. Homaei, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. PhD dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 173 pp.
11. Homaei, M., Dirksen, C. and Feddes, R. A. 2002a. Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. Agric. Water Manage. 57: 89-109.
12. Homaei, M. and Schmidhalter, U. 2008. Water integration by Plants root under non-uniform soil salinity. Irrigation Science. 27: 83-95.
13. 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.
14. Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. J. Irrig. and Drainage Div., ASCE, 103 (IR2): 115-134.
15. Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics. 1: 318-333.
16. 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. J. of Hydrology, 223: 198-211.
17. Sepaskhah, A. R. and Beirouti, Z. 2009. Effect of irrigation interval and water salinity on growth of madder (*Rubiatinctorum L.*). International Journal of Plant Production, 3 (3):1-16.
18. Steppuhn H. van Genuchten M. Th. and Grieve C. M. 2005a. Crop ecology, management and quality: Root-Zone Salinity: I. Selecting a Product-Yield Index and Response Function for Crop Tolerance. Crop Sci. 45(1):209-220.
19. Steppuhn H. van Genuchten M. Th. and Grieve C. M. 2005b. Crop ecology, management and quality: Root-Zone Salinity: II. Indices for Tolerance in Agricultural Crops. Crop Sci. 45(1):221-232.
20. 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.