



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۱۶۱-۱۴۹

ارزیابی توابع کاهش جذب آب گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) در شرایط تنش هم‌زمان کم‌آبی و شوری

حسین اردلانی^۱، حسین بابازاده^{۲*}، حسین ابراهیمی^۳

۱. دانشجوی دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه علوم و مهندسی آب، تهران، ایران
۲. دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه علوم و مهندسی آب، تهران، ایران
۳. دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرقدس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

چکیده

واکنش گیاهان به تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی و نقش هر یک از آن‌ها در کاهش جذب آب با مدل‌های ریاضی متعددی بیان می‌شود. 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 ون گنوختن (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، دیرکسن و آگوستین، ون‌دام و همکاران، اسکگز و همکاران و همایی با استفاده از داده‌های گلخانه‌ای گیاه گوجه‌فرنگی (رقم رد استون) ارزیابی شد. آزمایش به‌صورت طرح فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش سطح شوری (۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) و چهار سطح کمی آب آبیاری (شامل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی گیاه) و در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد در سطوح شوری کم، واکنش گیاه به تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی جمع‌پذیر بود و مدل جمع‌پذیر ون گنوختن به‌خوبی الگوی جذب آب را شبیه‌سازی می‌کند، در حالی که در سطوح شوری بالاتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر مدل‌های ضرب‌پذیر برازش بهتری دارد و مدل اسکگز و همکاران و همایی بهترین برازش را با داده‌های گلخانه‌ای در گیاه گوجه‌فرنگی داشت.

کلیدواژه‌ها: تنش‌های توأمان، تنش خشکی، تنش شوری، مدل‌های جذب، مدیریت آبیاری.

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک، همچنین روند رو به رشد مصرف آب ناشی از افزایش جمعیت و توسعه صنعتی، به سیاست‌های جدید مبنی بر استفاده کارا از منابع موجود توجه شده است، از جمله استفاده از آب‌های با کیفیت نامناسب و استفاده از آب‌های مصرف‌شده. طبیعتاً، وقتی از آب‌های با کیفیت کم مانند پساب‌ها استفاده شود، وضع بدتر هم می‌شود. بنابراین، در مناطق خشک و نیمه‌خشک علاوه بر شوری، مسئله کمبود آب عامل محدودکننده حفظ و توسعه کشاورزی است (۸).

در زمینه چگونگی پاسخ گیاهان به تنش هم‌زمان شوری و خشکی و سهم هر یک از آن‌ها در کاهش جذب آب نظریه‌ها و مدل‌های ریاضی زیادی وجود دارد. بر مبنای این نظریه‌ها مدل‌های جذب آب به سه دسته کلی جمع‌پذیر، ضرب‌پذیر و مدل‌های مفهومی تقسیم می‌شود. در مدل‌های جمع‌پذیر فرض شده که جذب آب تحت تأثیر تجمعی فشار آب خاک و فشار اسمزی انجام می‌شود. حال آنکه در مدل‌های ضرب‌پذیر ضرایب کاهش مربوط به تنش‌های آبی و شوری به‌طور جداگانه محاسبه و در همدیگر ضرب می‌شود. مدل‌های شبیه‌سازی از آن جهت اهمیت می‌یابد که اگر این مدل‌ها جریان آب را به سمت ریشه‌ها به‌درستی پیش‌بینی کند، بدون نیاز به اندازه‌گیری صحرائی می‌توان زمان آبیاری برای حداکثر رشد را با استفاده از خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آب و خاک و پارامترهای مشخص گیاهی تعیین کرد (۸، ۱۹).

شوری از سه راه رشد و عملکرد گیاه را محدود می‌کند. اثر نخست و غالب مربوط به زیادهای غلظت نمک‌های محلول در خاک است که کاهش پتانسیل اسمزی را به دنبال دارد. با کاهش پتانسیل اسمزی، انرژی آزاد آب کاهش می‌یابد و گیاه برای به‌دست آوردن مقدار مشخص

آب باید انرژی حیاتی بیشتری مصرف کند. بنابراین، بخشی از انرژی مورد نیاز گیاه برای رشد و نمو صرف به‌دست آوردن آب می‌شود و به این ترتیب رشد آن کاهش می‌یابد (۳، ۵، ۱۰، ۱۱، ۲۳). اثر دوم مربوط به وجود یون‌های ویژه در محلول خاک شور است؛ یون‌هایی همچون Na^+ ، Cl^- و B به تنهایی به‌طور مستقیم موجب بروز سمیت در گیاه می‌شود و یا در فرایند جذب آب اختلال پدید می‌آورد. اثر سوم شوری در حقیقت زائیده اثر نوع دوم است: برهم‌زدن تعادل تغذیه‌ای؛ بدین معنا که وجود یون‌هایی چون Cl^- ، Na^+ و B در محلول خاک شور، باعث اختلال در جذب و انتقال سایر عناصر غذایی از جمله نیتروژن (به صورت یون‌های نیترات و آمونیم) از خاک به گیاه می‌شود (۱، ۳، ۵، ۹، ۱۱).

مدل‌های جذب آب بر اساس چگونگی به‌کار بردن ترم جذب آب به دو گروه تقسیم می‌شود: مدل‌های میکروسکوپی که به جریان آب به‌طرف تکریشه رسیدگی می‌کند؛ و مدل‌های ماکروسکوپی که برداشت آب در کل ناحیه ریشه را بدون در نظر گرفتن تأثیر تکریشه‌ها بررسی می‌کند (۸، ۲۷). مبنای کار مدل‌های میکروسکوپی مدل گاردنر (۱۸) است که در آن فرض شده است جذب آب در واحد طول ریشه متناسب با ضریب آب‌گذری خاک و تفاوت بار هیدرولیکی بین خاک و گیاه است (۸، ۲۸). مدل‌های میکروسکوپی عموماً به‌وسیله جریان شعاعی و جذب آب در ریشه انفرادی توصیف می‌شود. مبنای کار این روش‌ها مقاله‌های گاردنر (۱۷، ۱۸) و توصیف خصوصیات جریان آب از خاک به ریشه و داخل ریشه‌های گیاه است.

دومین تیپ مدل‌های جذب آب، توابع تجربی است که جذب آب در گیاه را بر مبنای پاسخ گیاه به پتانسیل ماتریک توصیف می‌کند (۴). در حال حاضر، به این مدل‌ها بیشتر توجه می‌شود (۵). مدل‌های ماکروسکوپی را اولین بار

مدیریت آب و آبیاری

کاهش گفته می‌شود از میزان تعرق کاسته می‌شود (۸). هدف از انجام این پژوهش، شناسایی و بررسی چگونگی پاسخ گیاه گوجه‌فرنگی به تنش‌های هم‌زمان شوری و کم‌آبی، همچنین ارزیابی کارایی مدل‌های فوق بود.

مواد و روش‌ها

مدل‌های کاهش جذب آب

در این پژوهش شش مدل کاهش جذب آب و ن‌گنوختن (۳۱، ۳۲)، دیرکسن و آگوستین (۱۳)، ون‌دام و همکاران (۳۰)، اسکگر و همکاران (۲۹) و همایی (۲۰) ارزیابی شده است. ون‌گنوختن تأثیر هم‌زمان خشکی و شوری را در جذب در ریشه به‌صورت جمع فشار اسمزی و مکش ماتریک به‌صورت زیر پیشنهاد کرد (۷).

$$\alpha(h, \pi) = \frac{S_{max}}{1 + \left[\frac{h + \pi}{h_{50} + \pi_{50}} \right]^p} \quad (1)$$

در این رابطه، S_{max} تعرق پتانسیل h_{50} و π_{50} به‌ترتیب پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریکی است که به‌ازای آن میزان جذب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و P پارامتری تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است.

ون‌گنوختن (۳۲) و ون‌گنوختن و گاپتا (۳۳) رابطه (۱) را برای محصولات با دامنه شوری‌های مختلف به‌کار بردند و مقدار P را تقریباً ۳ به دست آوردند.

معادله عمومی مدل‌های ضرب‌پذیر به‌صورت زیر است.

$$\alpha(h, \pi) = \alpha(h) \times \alpha(\pi) \quad (2)$$

در این رابطه، $\alpha(h)$ تابع کاهشی به تنش خشکی و $\alpha(\pi)$ تابع کاهش به تنش شوری است.

از آنجا که جمع‌پذیری و خطی‌بودن رابطه بین مکش ماتریک و فشار اسمزی فرض منطقی نیست (۷)، مدل‌های ضرب‌پذیر را اولین بار ون‌گنوختن (۳۲) پیشنهاد کرد و در

فدس و همکاران (۱۵) مطرح کردند. این مدل‌ها انتقال عمودی آب از خاک پایدار و یکنواخت به ریشه را بررسی می‌کند. مدل‌ها مخزن انتشار آب برای هر لایه یکنواخت خاک در نظر گرفته می‌شود (۱۵). مهم‌ترین مدل‌های مطرح بر مبنای معیارهای ماکروسکوپی عبارت است از مولز و رمسون (۲۶)، فدس و همکاران (۱۴، ۱۵، ۱۶)، ون‌گنوختن (۳۱) و گاردنر (۱۸). مهم‌ترین مدل‌های جذب، موسوم به مدل‌های کلان، توابعی تجربی است که جذب آب در گیاه را بر مبنای پاسخ آب خاک توصیف می‌کند. یکی دیگر از معروف‌ترین مدل‌ها در تعیین ضریب کاهش جذب هنگام تنش آبی را ون‌گنوختن (۳۱) پیشنهاد کرد. او با فرض تأثیر یکسان تنش ناشی از شوری آب آبیاری بر محصول و در نتیجه بر تعرق، تابع سیگموییدی را پیشنهاد کرد که در آن مقدار جذب به اندازه ۵۰ درصد حداکثر جذب کاهش می‌یابد.

حساسیت روش‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی نسبت به شوری و درصد رطوبت‌ها بررسی شده است. نتایج نشان داد که مدل‌های میکروسکوپی به شوری ناساس است، به‌طوری که این مدل‌ها با افزایش شوری از صفر تا ۶ دسی‌زیمنس بر متر (آب کاربردی برابر تعرق پتانسیل بود) هیچ کاهش تعرقی نشان نداد (۱۲). با کاهش پتانسیل ماتریک، جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد. تخمین مقدار آب جذب شده در ریشه گیاهان برای پیش‌بینی چگونگی پاسخ محصولات زراعی و باغی به کمیت و کیفیت آب آبیاری بسیار مهم است. تنش آبی زمانی اتفاق می‌افتد که میزان تعرق بیش از میزان جذب آب باشد. هنگامی که هیچ‌گونه آبی در خاک وجود نداشته باشد، مقدار آب جذب‌شده در گیاه معادل تعرق پتانسیل خواهد بود و مقدار آب جذب‌شده در گیاه در واحد حجم خاک و زمان تحت شرایط عدم تنش، عمق توسعه ریشه و تعرق پتانسیل است. اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق (T_p) فراهم آورد، به اندازه‌ای که به آن تابع

مدیریت آب و آبیاری

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{P_1}} \times \left[1 - \frac{b}{360}(\pi^* - \pi)\right] \quad (6)$$

در این رابطه، مدل از تلفیق مدل ون گنوختن برای تنش خشکی و معادله ماس هافمن برای تنش شوری به دست آمده است.

همایی نیز پس از مواجه با نارسایی‌های رابطه‌های ارائه شده در بالا برای $\alpha(h, \pi)$ ، تأثیر هم‌زمان خشکی و شوری را بر جذب آب در ریشه به صورت ترکیبی از رابطه ماس و هافمن (۲۵) و فدس و همکاران (۱۶) بیان کرد (۷).

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

در این رابطه، h مکش ماتریک خاک است و معادله اخیر وقتی معتبر است که شرایط $\pi < \pi^*$ و $h \leq h_3$ باشد (۷).

آزمایش‌ها

آزمایش به صورت گلدانی و در شرایط گلخانه‌ای روی گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) رقم 'Red Stone' انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل شش سطح شوری (آب غیرشور ۱، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) و چهار سطح آبیاری (۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی گیاه) بود. آزمایش در سه تکرار به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. مقداری کافی خاک با بافت لوم شنی از افق سطحی مزارع دماوند جمع‌آوری شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی خاک مورد آزمایش

رطوبت ظرفیت مزرعه	CU	K ⁺	N	P	OC	ZN	EC	pH
بافت خاک (درصد وزنی)	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	ds/m	
۱۴/۹۶	۱/۱۸	۵۵۵	۲۰۵۰	۲/۰۵	۳/۷۳	۳/۷۳	۳/۵۳	۷/۲۴

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی شده عددی جذب آب در ریشه به کار گرفته شده است.

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{P_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{\pi_{50}}\right)^{P_2}} \quad (3)$$

در این رابطه، P_1 و P_2 پارامترهای تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است.

دیرکسن و آگوستین (۱۳) مضرب‌های تابع کاهش ون گنوختن (۳۲) را نسبت به آستانه کاهش شوری (π^*) و خشکی (h^*) تعدیل و به صورت زیر ارائه کردند (۴).

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h - h^*}{h^* - h_{50}}\right)^{P_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi - \pi^*}{\pi^* - \pi_{50}}\right)^{P_2}}$$

در این رابطه، P_1 و P_2 پارامترهای تجربی وابسته به گیاه، خاک و اقلیم است.

ون دام و همکاران (۳۰) و اسکگز و همکاران (۲۹) از تلفیق شاخه نزولی تابع کاهش فدس و همکاران (۱۶) برای تنش خشکی و تابع کاهش ماس و هافمن (۲۵) برای تنش شوری، توابع کاهش زیر را برای شرایط وجود هم‌زمان تنش‌های شوری و خشکی ارائه دادند.

$$\alpha(h, \pi) = \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \times \left[1 - \frac{b}{360}(\pi^* - \pi)\right] \quad (5)$$

در این رابطه، h_4 ، h_3 و b به ترتیب نقطه شروع تنش آبی، نقطه پژمردگی و درصد کاهش محصول به‌ازای افزایش واحد شوری است.

منطقه گرمابسر دماوند تهیه و به محل حمل شد. برخی ویژگی‌های شیمیایی این آب در جدول ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش استفاده از آب شور طبیعی نسبت به آب شور مصنوعی ترجیح داده شد. بدین منظور، آب شور به‌منظور اعمال تیمارهای شوری از یک حلقه چاه واقع در

جدول ۲. برخی ویژگی‌های شیمیایی آب مورد آزمایش

K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	CO ₃	CL ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	EC	pH
meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	ds/m	
۰/۲	۱۵/۵	۱۰	۵۶	۰/۶۵	۴۲۷	۷/۳	۳۰/۹۴	۱۸/۲	۷/۳

به‌منظور اعمال تیمارهای شوری، آب شور منتقل شده به گلخانه متناسب با هر تیمار رقیق شد. آبیاری گلدان‌ها با استفاده از آب شور مربوط و تا رسیدن به ظرفیت زراعی با رعایت جزء آبشویی مناسب انجام شد. رطوبت خاک هر روز در یک ساعت مشخص با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد. به‌منظور واسنجی به روش وزنی، وزن گلدان‌ها نیز در یک ساعت مشخص با یک ترازوی دقیق (با دقت ۰/۰۰۱ کیلوگرم) اندازه‌گیری می‌شد (گلدان لایسیمترهای وزنی در نظر گرفته شد). برای برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین زمان و مقدار آبیاری با معیار قراردادن تیمار بدون تنش آبی از روش بیلان رطوبتی آب در خاک استفاده شد.

مقدار تعرق روزانه با استفاده از اختلاف وزن گلدان‌ها در دو روز متوالی و ضریب کاهش جذب آب با استفاده از نسبت تعرق روزانه به تعرق پتانسیل محاسبه شد. در همه مدل‌ها، مقدار π_{50} با استفاده از معادله ماس و هافمن (۲۵) با شیب کاهش عملکرد ۱۰ درصد، شوری آستانه ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر (۶) و ۵۰ درصد کاهش عملکرد $(\frac{y}{y_p} = 0.5)$ در شوری ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. در این مطالعه، سه تابع کاهش جذب در شرایط تنش خشکی فوس و همکاران (۱۶)، ون‌گونختن (۳۱)، دیرکسن و اگوستین (۱۳) و شش تابع کاهش جذب در شرایط تنش

برای انجام این آزمایش، گلدان‌های ۱۰ لیتری تهیه و کف آن‌ها با مته سوراخ شد. پس از آماده‌سازی گلدان‌ها، ۱۱ کیلوگرم خاک خشک وزن و در کیسه‌های پلاستیکی بزرگ ریخته شد. سپس، مقادیر مناسب عناصر ضروری بر اساس توصیه آزمایشگاه، به‌صورت محلول و با توجه به ظرفیت زراعی خاک مورد آزمایش به خاک درون کیسه‌ها اضافه شد. همچنین، مقادیر پتاسیم و فسفر در سه نوبت مساوی در طول دوره آزمایش به گلدان‌ها اضافه شد. برای تعیین وزن خشک خاک، ۱۱ کیلوگرم (وزن خاک مورد استفاده در هر یک از گلدان‌ها) از خاک مورد استفاده در آون گذاشته و وزن خشک آن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و بعد از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. برای حذف تبخیر از سطح گلدان‌ها، سطح آن‌ها با شن پوشانده شد. تیمارهای اعمال‌شده به مدت یک ماه و از مرحله گلدهی تا میوه‌دهی اعمال شد. در همه گلدان‌ها به‌منظور اندازه‌گیری پتانسیل ماتریک، نخست منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری^۱ و نرم‌افزار RETC تعیین، سپس با جایگزینی مقادیر رطوبت‌های روزانه‌ای اندازه‌گیری‌شده در منحنی مشخصه خاک قدرمطلق پتانسیل ماتریک محاسبه شد.

1- Pressure Plate

شکل های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است. این نتایج نشان می دهد که در پتانسیل اسمزی ثابت با کاهش پتانسیل ماتریک مقدار جذب آب به صورت غیرخطی کاهش می یابد (شکل ۱). در پتانسیل ماتریک معین با کاهش پتانسیل اسمزی مقدار جذب آب به صورت خطی یا غیرخطی کاهش می یابد. وجود هر دو تنش به دلیل فزاینده، هر کدام در کاهش انرژی آب نسبت به نبود هر یک، در جذب آب در گیاه اختلال بیشتری ایجاد می کند. در نهایت، بر عملکرد تأثیر بیشتری می گذارد.

شکل ۱ برآزش مدل های مختلف بر داده های اندازه گیری شده از تیمارهای بدون تنش (تیمار ۱، ۲ و ۲/۵ دسی زیمنس بر متر) را نشان می دهد. نتایج شکل ۱ و جدول ۱ نشان می دهد که در شرایطی که گیاه فقط تحت تأثیر تنش خشکی (عدم وجود تنش شوری) قرار می گیرد، همه مدل های شبیه سازی برآزش نسبتاً خوبی با داده های اندازه گیری شده دارد. همچنین، شکل ۱ نشان می دهد که مدل فدس و همکاران (۱۵) در مکش های رطوبتی پایین تر برآزش بهتری نسبت به مدل ون گنوختن (۳۲) و دیرکسن و آگوستین (۱۳) دارد. جدول ۱ ارزیابی این مدل ها را بر اساس پارامترهای آماری نشان می دهد. این نتایج نشان می دهد که مدل فدس و همکاران (۱۵) نسبت به سایر مدل ها بهترین برآزش را دارد و مدل های دیرکسن و همکاران و ون گنوختن در رتبه های بعدی قرار می گیرد (۸).

در شکل ۲ برآزش مدل های مختلف بر داده های اندازه گیری شده از تیمار با شوری ۴ دسی زیمنس بر متر و در جدول ۴ ارزیابی مدل های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری نشان داده شده است. این نتایج نشان می دهد که در شوری ۴ دسی زیمنس بر متر تابع کاهش جذب آب در شرایط وجود هم زمان شوری و خشکی جمع پذیر است (۲). همچنین، مدل مفهومی همایی (۲۲) نیز برآزش نسبتاً خوبی ارائه می دهد (۸).

هم زمان خشکی و شوری جمع پذیر ون گنوختن (۳۱)، ضرب پذیر ون گنوختن (۳۱)، دیرکسن و آگوستین (۱۳)، ون دام و همکاران (۳۰)، اسکگز و همکاران (۲۹) و همایی (۲۰) با استفاده از داده های گلخانه ای گوجه فرنگی ارزیابی شد.

شاخص های ارزیابی مدل ها

شاخص های آماری متفاوتی برای سنجش اعتبار و درستی توابع تولید مدل ها وجود دارد. برای ارزیابی مدل ها، از پارامترهای آماری ریشه دوم میانگین قدرمطلق خطاها (RMSE) و قدرمطلق بیشینه خطاها (ME) و پارامتر توصیفی (d) به صورت زیر استفاده شد.

$$ME = \text{MAX} |P_i - O_i|_{i=1}^n \times \frac{100}{O} \quad (8)$$

$$RSME = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

در این روابط، P_i مقادیر برآورد شده با مدل های مورد بررسی در این تحقیق، O_i مقادیر اندازه گیری شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مقادیر O_i است. کمترین مقدار برای ME و RMSE صفر است. هر چه مقدار ME بیشتر باشد، مناسب بودن مدل کمتر می شود، در حالی که مقدار RMSE نشان می دهد که برآوردها چه مقدار بیش برآوردی یا کم برآوردی نسبت به مقادیر اندازه گیری شده دارد.

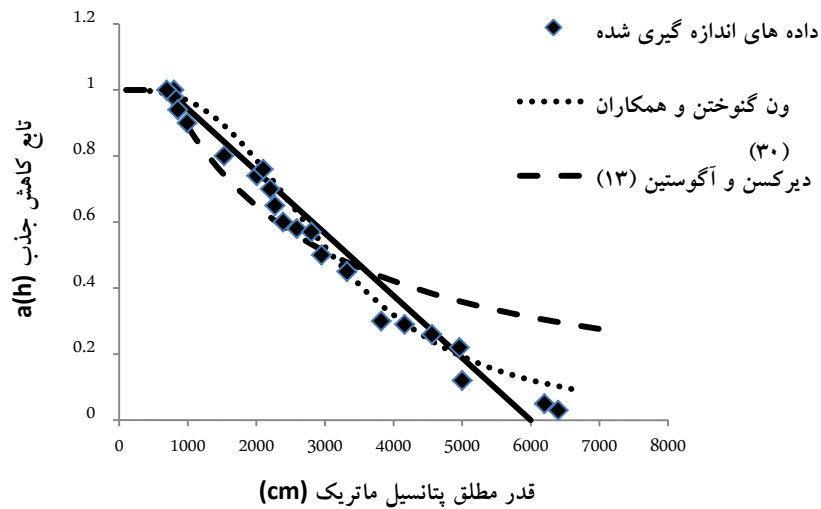
نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از طرح، ضرایب کاهش جذب آب اندازه گیری شده و پیش بینی شده با مدل های مختلف در سطوح مختلف پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریک در

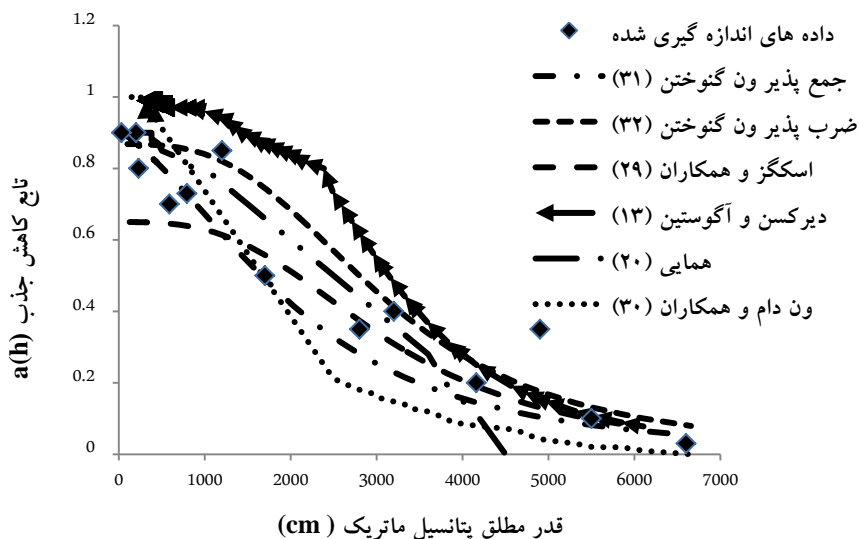
ارزیابی توابع کاهش جذب آب گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) در شرایط تنش هم‌زمان کم‌آبی و شوری

جدول ۳. آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه مدل‌ها در تیمارهای بدون تنش شوری

مدل	RMSE (%)	ME (%)	d (%)
فدس و همکاران (۱۵)	۳/۷	۰/۰۱	۰/۹۹
ون‌گنوختن (۳۲)	۴/۶	۰/۰۳	۰/۰۰
دیرکسن و آگوستین (۱۳)	۷/۴	۰	۰/۹۷



شکل ۱. نمودار تابع کاهش جذب آب گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط عدم‌وجود تنش شوری (۱، ۲ و ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر)



شکل ۲. برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده از تیمار با شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر

مدیریت آب و آبیاری

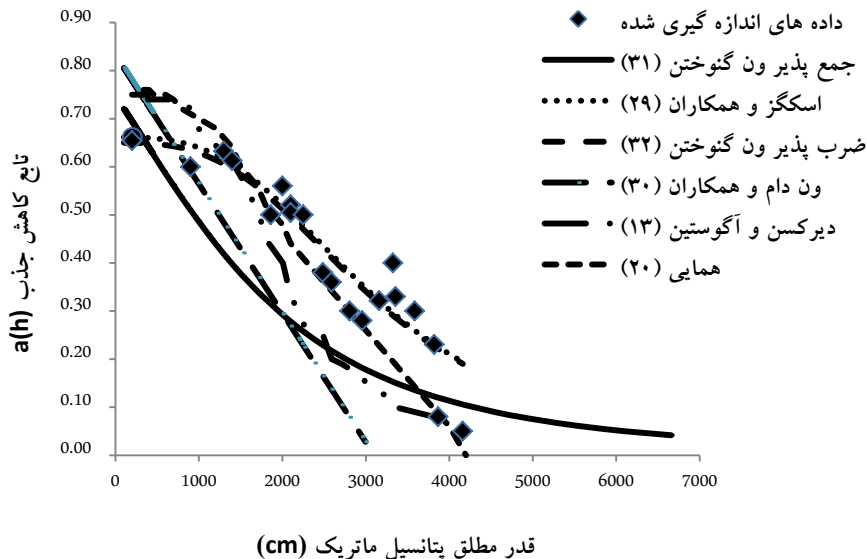
دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

جدول ۴. آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه مدل‌ها در تیمار با شوری ۴ دسی‌زیمنس بر متر

مدل	RMSE (%)	ME (%)	d (%)
جمع پذیر و ن‌گنوختن (۳۱)	۱۰/۷	۰/۰۵	۰/۹۷
همایی (۲۰)	۱۲/۵	۰/۰۶	۰/۹۸
ضرب پذیر و ن‌گنوختن (۳۲)	۱۴/۵	۰/۰۸	۰/۹۳
اسکگز و همکاران (۲۹)	۱۴/۵	۰/۰۹	۰/۹۲
دیرکسن و آگوستین (۱۳)	۱۵/۵	۰/۱	۰/۹۳
ون‌دام و همکاران (۳۰)	۱۹	۰/۰۲	۰/۸۸

شرایط وجود هم‌زمان شوری و خشکی ضرب‌پذیر است. و با توجه به نتایج مقایسه آماری مدل‌ها، مدل‌های ضرب‌پذیر همایی (۲۴) و اسکگز و همکاران (۲۹) مناسب‌ترین برآزش را ارائه می‌دهد.

شکل ۳ برآزش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده از تیمار با شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر و جدول ۵ ارزیابی مدل‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که در شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر تابع کاهش جذب آب در



شکل ۳. نمودار تابع کاهش جذب آب گیاه گوجه‌فرنگی در تیمار با شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر

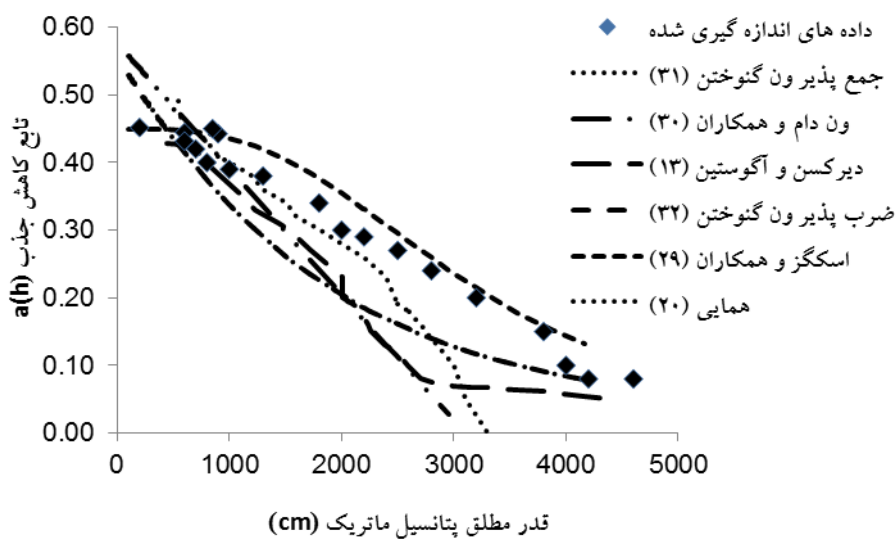
ارزیابی توابع کاهش جذب آب گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) در شرایط تنش هم‌زمان کم‌آبی و شوری

جدول ۵. آماره‌های محاسبه‌شده برای مقایسه مدل‌ها در تیمار با شوری ۶ دسی‌زیمنس بر متر

مدل	RMSE (%)	ME (%)	d (%)
همایی (۲۰)	۴/۶	۰/۰۲	۰/۹۹
ضرب‌پذیر و ن‌گنوختن (۳۲)	۵/۵	۰/۰۱	۰/۹۷
اسکگز و همکاران (۲۹)	۵/۵	۰/۰۱	۰/۹۷
دیرکسن و آگوستین (۱۳)	۱۲/۵	۰/۲	۰/۹۹
ون‌دام و همکاران (۳۰)	۱۷/۵	۰/۱	۰/۷
جمع‌پذیر و ن‌گنوختن (۳۱)	۱۸	۰/۱	۰/۷

مختلف را بر داده‌های اندازه‌گیری شده از تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر و در جدول ۷ ارزیابی مدل‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری (ME، RMSE، و d) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر تابع کاهش جذب آب در شرایط وجود هم‌زمان شوری و خشکی ضرب‌پذیر است (۸). نتایج مقایسه آماری مشابه با نتایج آماری تیمار ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر است.

شکل ۴ برآزش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده از تیمار با شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر و جدول ۶ ارزیابی مدل‌های مختلف با استفاده از پارامترهای آماری (ME، RMSE، و d) را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که در شوری ۸ دسی‌زیمنس واکنش گیاه گوجه‌فرنگی (تابع کاهش جذب آب) در شرایط وجود هم‌زمان شوری و خشکی ضرب‌پذیر است و مدل‌های ضرب‌پذیر همایی (۲۲) و اسکگز و همکاران (۲۹) برآزش مناسب‌تری را ارائه می‌دهد. در شکل ۵ برآزش مدل‌های



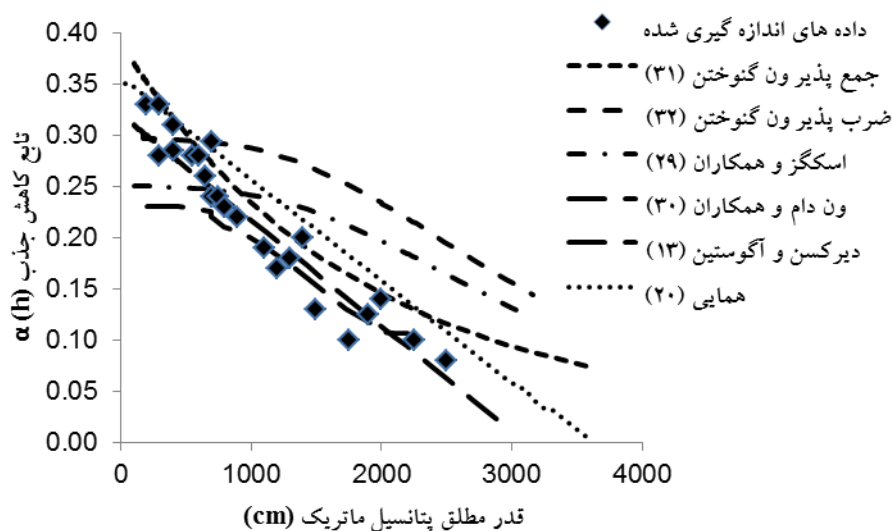
شکل ۴. نمودار تابع کاهش جذب آب گیاه گوجه‌فرنگی در تیمار با شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۵

جدول ۶. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌ها در تیمار با شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر

مدل	RMSE (%)	ME (%)	d (%)
همایی (۲۰)	۹/۳	۰/۰۷	۰/۹۱
اسکگرز و همکاران (۲۹)	۹/۵	۰/۰۷	۰/۸۵
ضرب پذیر و ن‌گنوختن (۳۲)	۹/۵	۰/۰۸	۰/۸۵
ون‌دام و همکاران (۳۰)	۹/۷	۰/۰۳	۰/۹۱
دیرکسن و آگوستین (۱۳)	۱۰/۷	۰/۰۹	۰/۸۲
جمع‌پذیر و ن‌گنوختن (۳۱)	۱۰/۹	۰/۰۸	۰/۸۶



شکل ۵. نمودار تابع کاهش جذب آب گیاه گوجه‌فرنگی در تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر

جدول ۷. آماره‌های محاسبه شده برای مقایسه مدل‌ها در تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر

مدل	RMSE (%)	ME (%)	d (%)
همایی (۲۰)	۶/۲	۰/۰۳	۰/۸
اسکگرز و همکاران (۲۹)	۶/۳	۰/۰۳	۰/۷
ضرب پذیر و ن‌گنوختن (۳۲)	۶/۶	۰/۰۵	۰/۷
ون‌دام و همکاران (۳۰)	۶/۷	۰/۰۴	۰/۷
دیرکسن و همکاران (۱۳)	۶/۸	۰/۰۶	۰/۵
جمع‌پذیر و ن‌گنوختن (۳۱)	۷/۱	۰/۰۴	۰/۷

واکنش گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی جمع‌پذیر و با افزایش پتانسیل اسمزی واکنش گیاه بیشتر به صورت ضرب‌پذیر است. از میان مدل‌های ضرب‌پذیر، مدل اسکگز و همایی و ون‌گنوختن برآزش بهتری ارائه می‌دهد. نظر به اینکه با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب به سمت ریشه‌ها پیش‌بینی‌پذیر است، با استفاده از خصوصیات شیمیایی- فیزیکی آب و خاک و پارامترهای مشخص گیاه و مدل‌های ذکر شده که برآزش بهتری را در واکنش گیاه گوجه‌فرنگی به تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی ارائه می‌دهد، بدون نیاز به اندازه‌گیری صحرائی می‌توان زمان مناسب آبیاری برای حداکثر رشد را تعیین کرد.

منابع

۱. اختری ا، همایی م. و حسینی ی. (۱۳۹۳) مدل‌سازی پاسخ گیاه به تنش‌های شوری و کمبود ازت خاک. حفاظت منابع آب و خاک. ۴(۳): ۳۳-۵۰.
۲. حسینی ی.، بابازاده ح. و خاکپور عربلو ب. (۱۳۹۴) ارزیابی توابع کاهش جذب آب گیاه فلفل در شرایط تنش هم‌زمان خشکی و شوری. پژوهش آب در کشاورزی. ۴(ب): ۵۰۹-۵۲۳.
۳. حسینی ی.، همایی م.، کریمیان ن. و سعادت س (۱۳۸۷) مدل‌سازی واکنش کلزا به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. ۶(ب): ۷۲۱-۷۳۴.
۴. حسینی ی.، همایی م.، کریمیان ن. ع. و سعادت س. (۱۳۸۷) اثرات فسفر و شوری بر رشد، غلظت عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در کلزا (*Brassica napus L.*). پژوهش آب در کشاورزی. ۸(۴): ۱-۱۸.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت در شرایط عدم وجود تنش آبی، مقدار تابع کاهش جذب آب در همه تیمارها به جزء تیمار با شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر با مقدار تابع کاهش جذب ماس و هافمن (۲۵) برابر است؛ یعنی، در شوری‌های بالا تابع کاهش جذب آب از حالت خطی خارج می‌شود (۸). با کاهش پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریک، انرژی آزاد آب در خاک و به تبع آن میزان جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد. هنگامی که گیاه تحت تنش شوری قرار می‌گیرد، خود را تا حدی با اصلاح محلول سازگار می‌کند و یا اینکه در شوری‌های بالاتر، با افزایش نفوذپذیری ریشه‌ها نسبت به آب شور، شرایط جذب آب بیشتر را فراهم می‌کند. در این شرایط، پاسخ گیاه به افزایش ۱ سانتی‌متر فشار اسمزی با کاهش ۱ سانتی‌متر مکش ماتریک یکسان نیست (۲۱). بنابراین، در شوری‌های زیاد پاسخ گیاهان به شوری جمع‌پذیر نیست (۲، ۱۲). از طرف دیگر، در شوری‌های کم، پاسخ گیاه به تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی تحت تأثیر مجموع پتانسیل اسمزی و ماتریک خاک قرار دارد. بنابراین، توابع جمع‌پذیر در شرایط شوری کم، بسیار خوب عمل می‌کند (۲، ۳۲)، در صورتی که با افزایش مقدار شوری تعرق پیش‌بینی شده با این توابع، با کاهش تعرق اندازه‌گیری شده تفاوت معناداری پیدا می‌کند (۱۲).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پاسخ گیاه گوجه‌فرنگی به دو عامل تنش شوری و کم‌آبی بررسی شد. نتایج نشان داد که همه مدل‌های جذب آب در شرایط عدم وجود تنش شوری واکنش گیاه به تنش کم‌آبی را به خوبی مدل می‌کند. مدل خطی فلدس و همکاران واکنش گیاه گوجه‌فرنگی به تنش کم‌آبی را به شرط عدم وجود تنش شوری نسبت به سایر مدل‌های غیرخطی بهتر برآزش می‌کند. در شوری‌های کم

مدیریت آب و آبیاری

14. 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.
15. Feddes R.A., Kowalik P.J. and Zaradny H. (1978) Simulation of field water use and crop yield Prudoc. Wageningen. Netherlands Saline water in supplemental irrigation of wheat and barley rainfed agricultural. *Agricultural Water Management*. 78: 122-127.
16. Feddes R.A. and Raats P.A.C. (2004) Parameters sing the soil-water- plant-root system. In: Feddes. R. A., et al (Eds.), *Unsaturated Zone Modeling: Progress. Challenges and Applications*. Wageningen Front is Series, 6: 95-141.
17. Gardner W.R. (1964) Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agronomy*. 56: 41-45.
18. Gardner W.R. (1960) Dynamic aspects of water availability plants. *Soil Science Society American*. 89: 63-75.
19. Green S.R., Kirkham M.B. and Clothier E. (2006) Root uptake and transpiration: From measurement and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*. 86: 165-176.
20. Homae M., Dirksen C. and Feddes R.A. (2002) Simulation of root water uptake. I. Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*. 57: 89-109.
21. Homae M. and Schmidhalter U. (2008) Water integration by Plants root under non-uniform soil salinity. *Irrigation. Soil Science Society American*. 27: 83-95.
۵. سرایی تبریزی م. (۱۳۹۳) مدل‌سازی جذب آب به‌وسیله گیاه در شرایط تنش‌های توأمان آب، شوری و نیتروژن. دانشگاه علوم و تحقیقات. تهران. پایان‌نامه دکترای تخصصی. ۱۳۲ ص.
۶. سرایی تبریزی م.، همایی م.، بابازاده ح.، کاوه ف. و پارسی‌نژاد م. (۱۳۹۴) مدل‌سازی پاسخ ریحان به تنش توأمان شوری و کمبود نیتروژن. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. ۷۳: ۴۵-۵۷.
۷. عباسی ف. (۱۳۸۶) فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. تهران. ۲۵۰ ص.
۸. علیزاده ح.ع.، لیاقت ع. و نوری محمدیه م. (۱۳۸۸) ارزیابی توابع کاهش جذب آب توسط گوجه‌فرنگی در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳(۳): ۸۸-۹۷.
۹. کریمی ا.، همایی م.، لیاقت ع.م. و معز اردلان م. (۱۳۸۴) یکنواختی توزیع آب و کود در سیستم آبیاری قطره‌ای- نواری. پژوهش کشاورزی آب، خاک و گیاه در کشاورزی. ۵(۲): ۵۳-۶۶.
۱۰. کیانی ع.ر.، همایی م. و میرلطیفی م. (۱۳۸۵) ارزیابی توابع کاهش عملکرد گندم در شرایط توأم شوری و کم‌آبی. علوم و خاک و آب. ۲۰(۱): ۷۳-۸۳.
۱۱. همایی م. (۱۳۸۱) واکنش گیاهان به شوری. نشریه انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۹۷ ص.
12. Cardon G.E. and Letey J. (1992) Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Science Society American*. 32: 1876-1880.
13. Dirksen C. and Augustine D.C. (1988) Root water uptake function for no uniform pressure and osmotic potentials. *Agriculture. Abstracts*, pp. 188.

22. Homae M. (1999) Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress. Ph.D. Dissertation. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 173 pp.
23. Homae M., Feddes R.A. and Dirksen C. (2002b) Simulation of root water uptake. II. Non-uniform transient water stress using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*. 57: 111-126.
24. Huston J.L., Dudley L.M. and Wagenet R.J. (1990) Modeling transient root zone salinity. In K.K. Tanji (ed.), *Agricultural salinity assessment and management. Manuals and reports on engineering practice No. 71*. American Society of Civil Engineers. Irrigation and Drainage Division. New York.
25. Maas E.V. and Hoffman G.J. (1977) Crop salt tolerance Current assessment. *J. Irrigation and Drainage Div., American Society of Civil Engineers*. 103: 115-134.
26. Molz F.J. and Remson I. (1971) Application of an extraction term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agronomy*. 63: 72-77.
27. Nimah M.N. and Hanks R.G. (1973) Model for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations. I. Description and sensitivity. *Soil Science Society American*. 37: 522-527.
28. Saadat S. and Homae M. (2015) Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. *Agricultural Water Management*. 152: 119-124.
29. Skaggs T.H., van Genuchten M., Th Shouse P.J. and Poss J.A. (2006) Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigations. *Agricultural Water Management*. 86: 140-179.
30. van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Van Walsum P.E.V. and Groenendijk P. (1997) *Theory of SWAP*. 2th Ed. Simulation of water flow, solute transport plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Report No.71, Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University, 167 pp.
31. van Genuchten M.Th. (1987) A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report No 121, Unaided State Salinity Laboratory. Riverside. California, 221 pp.
32. van Genuchten M.Th. and Hoffman G.J. (1984) Analysis of crop production, *In: Sheinberg I and Shalhevet J (Eds.), soil salinity under irrigation*. Springer Verlag. 258-271.
33. van Genuchten M.Th. and Gupta S.K. (1993) A reassessment of the crop salt tolerance response function. *Indian Society of Soil Science*. 41: 730-737.