

ارزیابی توابع جذب آب در شرایط تنش هم‌زمان خشکی و شوری در گیاه گوجه‌فرنگی مینیاتوری

یاسر حسینی^{۱*}، جواد رضائی مقدم، محمدرضا نیک‌پور و عطیه عبدلی

دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان- دانشگاه محقق اردبیلی.

y_hoseini@uma.ac.ir

استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی - دانشگاه محقق اردبیلی.

j_ramezani@uma.ac.ir

استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی - دانشگاه محقق اردبیلی.

m_nikpour@uma.ac.ir

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی - دانشگاه محقق اردبیلی.

atiehabdoli@gmail.com

چکیده

مدل‌های ریاضی متعددی در زمینه چگونگی پاسخ گیاهان به تنش هم‌زمان شوری و خشکی و سهم هر یک از آن‌ها در کاهش جذب آب، وجود دارد. مدل‌های جذب آب در شرایط تنش هم‌زمان به سه دسته جمع‌پذیر، ضرب‌پذیر و مدل‌های مفهومی تقسیم‌بندی می‌شوند. در این مطالعه، شش تابع ماکروسکوپی کاهش جذب آب شامل ون‌گنوختن جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر، دیرکسن و آگوستیچن، ون‌دام و همکاران، همایی و همکاران و اسکگز و با استفاده از داده‌های کشت گلدانی گیاه گوجه‌فرنگی مینیاتوری مورد ارزیابی قرار گرفت. پژوهش در قالب طرح آزمایشی کاملاً تصادفی با سه تکرار و در دو سطح شوری (۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر) انجام شد. سطوح خشکی به صورت تغییرات پتانسیل ماتریک (سه سطح تخلیه رطوبتی ۰/۴۰٪، ۰/۵۰٪ و ۰/۶۵٪ گنجایش مزرعه‌ای) اعمال گردید. نتایج نشان داد که در سطوح چهار و هفت دسی‌زیمنس بر متر واکنش گیاه به تنش هم‌زمان شوری و خشکی بیشتر ضرب‌پذیر است. از میان مدل‌های ضرب‌پذیر، مدل دیرکسن در سطح شوری هفت دسی‌زیمنس بر متر (متوسط خطای بیشینه ۰/۱۴ و متوسط ریشه مربعات خطا ۰/۱۵) نزدیکی بیشتری با نتایج اندازه‌گیری‌ها داشتند. در سطح شوری هفت دسی‌زیمنس بر متر، مدل ون‌دام (متوسط خطای بیشینه ۰/۰۹ و متوسط ریشه مربعات خطا ۰/۰۱۷) و اسکگز (متوسط خطای بیشینه ۰/۱۴ و متوسط ریشه مربعات خطا ۰/۱۸) برازش بهتری را با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد.

واژه‌های کلیدی: جذب آب در ریشه، خشکی خاک، شوری آب، تنش رطوبت.

۱- آدرس نویسنده مسئول: استان اردبیل، شهر پارس آباد، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان.

*- دریافت مرداد ۱۳۹۶ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۷

مقدمه

نیاز به غذای بیشتر و محدودیت منابع آب، بشر را به سمت استفاده از آب‌های با کیفیت کم و اعمال مدیریت کم‌آبیاری سوق داده است. علاوه بر این در بسیاری از نقاط خشک و نیمه‌خشک جهان که به شوری مبتلا هستند مشکل کم‌آبی نیز وجود دارد و اغلب گیاهان به طور هم‌زمان تحت تأثیر هر دو تنش شوری و کم‌آبی قرار دارند. چالی و همکاران (۲۰۱۳) برای نظارت هم‌زمان بر رابطه بین عملکرد محصول و میزان آبیاری، هدایت الکتریکی اشباع خاک و تراکم ریشه را در تمام طول فصل رشد گیاه گوجه‌فرنگی در سطوح مختلف شوری مطالعه نمودند براساس نتایج ایشان کل پروفیل خاک تحت تأثیر شوری آب آبیاری قرار گرفته بود. با این تفاوت که در شوری چهار دسی‌زیمنس بر متر تجمع شوری بیشتر در عمق ۲۰ سانتی‌متری اتفاق افتاده بود و در شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر، تجمع شوری در فاصله ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متری دیده شد. ایشان بیان نمودند که جذب ریشه در اعماق مختلف پروفیل خاک، تابعی از میزان شوری آن منطقه می‌باشد. طباطبایی و همکاران (۱۳۹۳) به منظور بررسی تأثیر تیمارهای آبیاری به میزان ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی بر شاخص عملکرد و کارایی مصرف آب در گیاه فلفل قلمی، پژوهشی را انجام دادند.

نتایج نشان داد که با کاهش مصرف آب به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، عملکرد محصول به ترتیب به ۹۲/۹۸، ۵۰/۲۶ و ۶۹/۴۹ درصد کاهش می‌یابد. علیزاده و همکاران (۱۳۸۸) طی مطالعه‌ای، شش تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپی را با استفاده از داده‌های گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که در شوری‌های کم واکنش گیاهان به تنش هم‌زمان شوری و خشکی جمع‌پذیر می‌باشد و در شوری‌های بیش‌تر از ۳/۵ دسی‌زیمنس بر متر، مدل‌های ضرب‌پذیر برازش بهتری دارند. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) طی مطالعه‌ای پنج تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپی را با استفاده از داده‌های کشت گلدانی گیاه

فلفل دلمه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که در سطح شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر واکنش گیاه به تنش هم‌زمان شوری و خشکی بیشتر جمع‌پذیر و در سطوح ۴/۵ و ۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر ضرب‌پذیر می‌باشد. همچنین مدل ون‌گنوختن از بیشترین تطابق در سطح شوری پایین برخوردار بود. اکبری نودهی و همکاران (۱۳۹۲) به منظور بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد گوجه‌فرنگی، تعیین تابع تولید و بازده مصرف آب، پژوهشی بر روی گیاه گوجه‌فرنگی انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار I₁ (بدون آبیاری) و I₆ (۱۰۰ درصد نیاز آبی) به ترتیب دارای کم‌ترین و بیشترین عملکرد می‌باشند. در پژوهشی دیگر با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای گندم ارقام قدس و روشن، شش تابع کاهش جذب آب ماکروسکوپی را ارزیابی نمودند.

نتایج نشان داد که مدل جمع‌پذیر، مقدار عملکرد نسبی را در بیشتر موارد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (شهیدی و همکاران، ۱۳۸۹). در پژوهش رامش‌واران و همکاران (۲۰۱۶) برای بررسی اثر شوری و رژیم‌های مختلف آبیاری بر روی دو رقم گیاه فلفل دلمه‌ای در سامانه آبیاری قطره‌ای، مشخص شد که افزایش سطح شوری در کنار افزایش عمق آب آبیاری در طول فصل بهار نسبت به فصل پاییز، به‌طور قابل توجهی رشد رویشی و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد. فعالیان و همکاران (۱۳۹۴) برای بررسی اقتصادی اثر هم‌زمان تنش‌های شوری و خشکی بر رشد و عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در استان مازندران درکشت بدون خاک، پژوهشی گلخانه‌ای با چهار سطح آبیاری (آبیاری به میزان ۱۲۵٪، ۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۰٪ نیاز آبی) و شش سطح شوری (۰/۱) به عنوان تیمار شاهد، ۱/۳، ۳، ۵، ۷ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر) انجام دادند. نتایج نشان داد که شوری محلول غذایی و تنش خشکی اثر کاهشی معنی‌دار بر عملکرد و شاخص‌های رشدی گیاه دارند. از آنجاکه چگونگی اثر متقابل تنش‌های شوری و خشکی بر جذب آب توسط ریشه و همچنین چگونگی اثر متقابل آن‌ها به دلیل نبود

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های محل اجرای پژوهش

این پژوهش در شهرستان اردبیل و در محل گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. طول جغرافیائی محل قرارگیری گلخانه، $48^{\circ}17'$ شرقی و عرض جغرافیائی آن $38^{\circ}12'$ شمالی و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۳۸۴ متر می‌باشد. خاک مورد استفاده برای کاشت از زمین زراعی موجود در منطقه انتخاب گردید و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در آزمایشگاه، تعیین شد (جدول ۱).

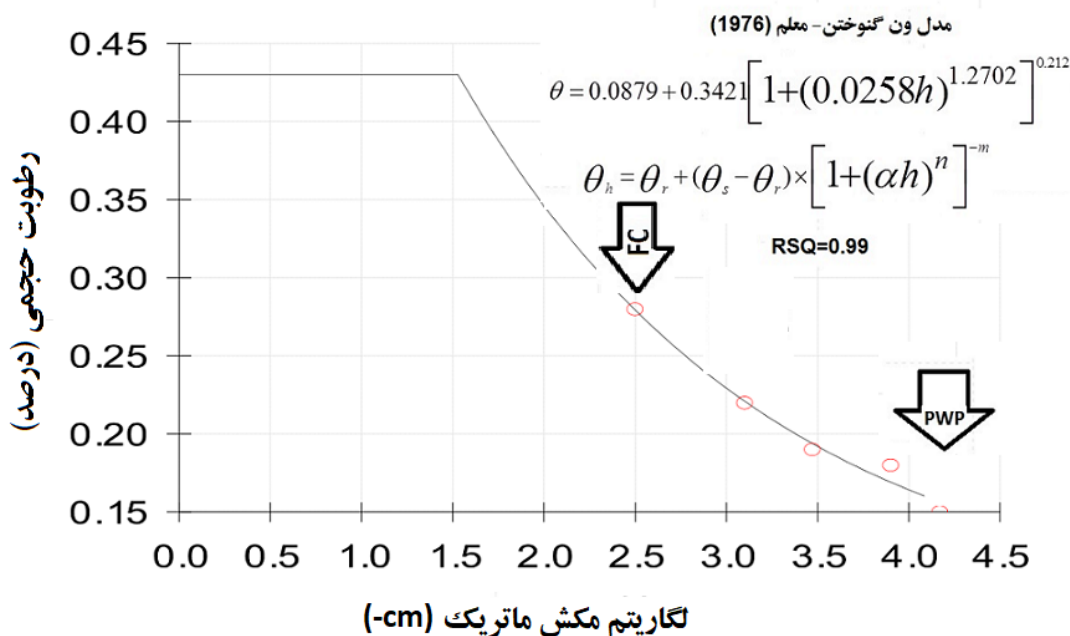
رابطه‌ای مشخص بین فشار اسمزی و پتانسیل ماتریک خاک به خوبی مشخص نیست، در این پژوهش به منظور شناسایی واکنش گیاه گوجه فرنگی مینیاتوری نسبت به تنش همزمان شوری و خشکی، تعدادی از توابع کاهش جذب ماکروسکوپی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا با برآزش مدل‌های مختلف با داده‌های اندازه‌گیری شده، مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی کاهش جذب در این گیاه در شرایط تنش همزمان خشکی و شوری تعیین گردد.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

ذرات خاک (درصد)			بافت	بی کربنات	کلسیم و منیزیم (meq l^{-1})	کلر	رطوبت اشباع (درصد)	هدایت الکتریکی (dS m^{-1})	چگالی ظاهری (gr cm^{-3})	کربن آلی (درصد)
شن	سیلت	رس								
۳۰	۳۶	۳۴	لوم رسی	۵	۸/۸	۱۴	۴۷	۲/۱۴	۱/۱۴	۳/۵۱

بر اساس مدل ون‌گنوختن - معلم (۱۹۷۶) با استفاده از نرم افزار RETC رسم گردید (شکل ۱).
برای اعمال تیمارهای مختلف شوری از ترکیب نمک کربنات کلسیم و کلرید سدیم به نسبت ۲:۱ استفاده شد نمک کربنات کلسیم برای جلوگیری از تأثیر منفی سدیم بر ساختمان خاک مورد استفاده قرار گرفت.

برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک، نمونه‌هایی دست خورده از خاک مورد نظر پس از قرارگیری در گلدان‌های مورد نظر و چند نوبت آبیاری، انتخاب و با استفاده از دستگاه صفحه فشاری، درصد رطوبت وزنی در فشارهای، ۳۳، ۳۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تعیین گردید و منحنی مشخصه رطوبتی خاک



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

ویژگی‌های طرح آزمایشی

در این مطالعه برای ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی جذب آب در شرایط متغیر پتانسیل اسمزی و ماتریک، از طرح آزمایشی کاملاً تصادفی در سه تکرار و در شرایط گلخانه‌ای بر روی گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) رقم مینیاتوری (*Cherry tomato cluster*) انجام گرفت. برای تهیه نشاء، ابتدا بذر گوجه‌فرنگی تهیه شده و در سینیهای مخصوص، کاشته شدند. پس از سبز شدن بذرها و رسیدن ارتفاع نشاءها به ۲۱ سانتی‌متر، نشاءها به گلدان‌ها انتقال یافتند. برای انجام پژوهش از گلدان‌هایی با ارتفاع ۲۷ و قطر دهانه ۲۶ سانتی‌متر استفاده شد. بافت خاک رسی‌لومی و وزن خاک مورد استفاده در هر گلدان ۸/۵ کیلوگرم بود.

تیمارهای اعمال شده شامل یک سطح غیر شور (۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر (S₁)) که برای تعیین پارامتر h₅₀* و در معادلات ون‌گنوختن (۱۹۸۷) و دیرکسن و آگوستیچن (۱۹۸۸) استفاده شده است و دو سطح شوری به ترتیب معادل ۴ (S₂) و ۷ (S₃) دسی‌زیمنس بر متر بود تیمارهای شوری اعمال شده در این پژوهش با استفاده از اضافه نمودن نمک‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم با نسبت ۲ به ۱ و با روش سعی و خطا بدست آمدند. به این صورت که ابتدا مقداری نمک کلرید سدیم و کلرید کلسیم، در یک ظرف جداگانه با نسبت ۲ به ۱ با آب مخلوط شده و به تدریج در گالن‌های حاوی آب معمولی اضافه می‌گردیدند و بعد از هم‌زدن کامل آب با استفاده از EC متر شوری آن‌ها اندازه‌گیری می‌شد و این کار تا زمانی ادامه می‌یافت که شوری مورد نظر به دست آید. برای هر تیمار کم آبیاری یک گیاه پشتیبان^۱ (B-U) در شکل ۲) در نظر گرفته شد. همچنین برای هر تیمار یک گیاه شاهد (C-T) در شکل ۲) که در شرایط بهینه (بدون شوری و رطوبت گنجایش مزرع‌ای) آبیاری می‌گردید لحاظ شد. بعد از کاشت نشاءها، گلدان‌ها به مدت ۲۰ روز با آب غیر شور آبیاری شدند و زمانی که ریشه گیاه در

خاک تثبیت شد تیمارها اعمال شد. تیمارهای کم آبیاری با در نظر گرفتن سه سطح پتانسیل ماتریک خاک (معادل ۴۰ (I₁), ۵۰ (I₂) و ۶۵ (I₃) درصد تخلیه آب قابل استفاده خاک) در طول دوره آبیاری اعمال گردید به طوری که با پایش روزانه رطوبت گلدان‌ها در زمان رسیدن رطوبت به تخلیه رطوبتی مورد نظر در هر تیمار، آبیاری به شکل دستی انجام می‌شد و در هر نوبت آبیاری در طول انجام آزمایشات حتی المقدور سعی گردید با اعمال جزء آبشویی بالا (۲۰ درصد)، شوری محیط ریشه یکنواخت نگه‌داری گردد (شکل ۲). در این پژوهش برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک از دستگاه رطوبت‌سنج الکتریکی لوترون مدل PMS-714 استفاده شد که وسیله مناسبی برای اندازه‌گیری رطوبت در عمق ریشه می‌باشد (رحمان و همکاران، ۲۰۱۱).

مقدار تعرق روزانه با استفاده از اختلاف وزن گلدان‌ها در دو روز متوالی به وسیله ترازوی ۰/۰۰۱ کیلوگرمی مدل HST اندازه‌گیری گردید و ضریب جذب آب با استفاده از نسبت تعرق روزانه به تعرق تیمار شاهد که رطوبت آن با پایش روزانه همواره در حد گنجایش مزرع‌ای حفظ می‌شد، محاسبه شد. برای به حداقل رساندن تبخیر از سطح خاک (چراکه هدف میزان جذب آب و تعرق بود) سطح خاک گلدان‌ها به ضخامت ۵ سانتی‌متر از شن پوشیده شد. برای محاسبه پتانسیل اسمزی با استفاده از شوری عصاره اشباع خاک از رابطه ۱ (آزمایشگاه شوری ایالات متحده (۱۹۵۴)) استفاده گردید. در این رابطه شوری عصاره اشباع (EC_e) برحسب (dS m⁻¹) و پتانسیل اسمزی (π) بر حسب سانتی‌متر می‌باشد.

$$\pi = -360 \times EC_e \quad (1)$$



شکل ۲- نقشه شماتیک طرح آزمایشی

۵۰ درصد کاهش می‌یابد و p پارامتر تجربی وابسته به گیاه، خاک و شرایط آب و هوایی است. ون‌گنوختن (۱۹۸۷) و ون‌گنوختن و گوپتا (۱۹۹۳) معادله فوق را برای محصولات با دامنه شوری‌های مختلف بکاربرده و مقدار p را در حدود ۳ به دست آورده‌اند.

مدل ضرب پذیر ون‌گنوختن: معادله عمومی مدل‌های ضرب پذیر به صورت رابطه ۳ است.

مدل‌های ضرب پذیر اولین بار توسط ون‌گنوختن (۱۹۸۷) پیشنهاد گردید و در بسیاری از مدل‌های شبیه سازی شده عددی جذب آب توسط ریشه، به کار گرفته شده‌اند.

$$\alpha(h & \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{\pi_{50}}\right)^{p_2}} \quad (3)$$

که در این رابطه π_{50} مقدار پتانسیل اسمزی است که در آن جذب ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و p_1 و p_2 ثابت‌های تجربی هستند و توسط رابطه‌های E و h محاسبه می‌شوند، در شرایطی که $\pi_{max} = \pi_{50}$ و $h_{max} = h_{50}$ آنگاه خواهیم داشت:

مدل‌های مورد ارزیابی: در این مطالعه شش تابع کاهش جذب شامل ون‌گنوختن (۱۹۸۷) (ضرب‌پذیر و جمع‌پذیر)، دیرکسن و آگوستیجن (۱۹۸۸)، ون‌دام (۱۹۹۷)،

همایی (۱۹۹۹) و اسکگز و همکاران (۲۰۰۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ذیل به شرح مختصر هریک از مدل‌ها پرداخته می‌شود.

مدل جمع پذیر ون‌گنوختن: این مدل مطابق رابطه ۲ می‌باشد.

$$\alpha(h & \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a_1 h + a_2 \pi}{h_{50}}\right)^p} \quad (2)$$

که در آن:

α نسبت جذب در شرایط تنش همزمان شوری و رطوبتی می‌باشد. h پتانسیل ماتریک بر حسب سانتی‌متر، π پتانسیل اسمزی بر حسب سانتی‌متر، a_1 و a_2 ضرایب مربوط به هر یک از تنش‌ها در شوری و خشکی مشخص می‌باشند که معمولاً آن‌ها را با هم برابر و هریک را برابر واحد در نظر می‌گیرند؛ و h_{50} پتانسیل ماتریکی است که میزان جذب

b درصد کاهش محصول به ازای افزایش واحد شوری می‌باشد.

$$p_1 = \frac{\pi_{max}}{\pi_{max} - \pi^*} \quad (4)$$

$$p_2 = \frac{h_{max}}{h_{max} - h^*} \quad (5)$$

در این روابط:

h^* و π^* به ترتیب پتانسیل ماتریک و اسمزی آستانه کاهش محصول بر حسب سانتی‌متر می‌باشند.

مدل همایی و همکاران: مدل همایی و همکاران (۱۹۹۹) از تلفیق بخش اول مدل ضرب‌پذیر و ن‌گنوختن برای تنش خشکی و معادله ماس-هافمن برای تنش شوری بدست آمده است (رابطه ۸).

$$\alpha(h \& \pi) = \frac{h - (h_4 - \pi)}{h_3 - (h_4 - \pi)} \left[1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (8)$$

معادله اخیر در شرایط $h_4 - \pi \leq h \leq h_3$ و $\pi > \pi^*$ صادق است (عباسی، ۱۳۸۶).

مدل دیرکسن و آگوستیچن: دیرکسن و آگوستیچن (۱۹۸۸) ضرب‌های تابع کاهش و ن‌گنوختن را نسبت به آستانه کاهش شوری و آستانه پتانسیل ماتریک تعدیل و به صورت رابطه ۶ ارائه کردند.

$$\alpha(h \& \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h^* - h}{h^* - h_{50}}\right)^{p_1}} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi^* - \pi}{\pi^* - \pi_{50}}\right)^{p_2}} \quad (6)$$

مدل اسکگز: این مدل از تلفیق مدل و ن‌گنوختن (۱۹۸۷) برای تنش آبی و مدل ماس و هافمن (۱۹۷۷) برای تنش شوری به دست آمده است.

$$\alpha(h \& \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \left[1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (9)$$

مدل ون دام: ون دام و همکاران (۱۹۹۷) از تلفیق شاخه نزولی تابع کاهشی فوس و همکاران (۱۹۷۸) برای تنش خشکی و تابع کاهش ماس و هافمن (۱۹۷۷) برای تنش شوری، تابع کاهشی (رابطه ۷) را برای شرایط وجود هم‌زمان تنش‌های شوری و خشکی ارائه کردند.

$$\alpha(h \& \pi) = \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} \left[1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (7)$$

h_3 پتانسیل ماتریک نقطه شروع تنش آبی و کاهش جذب بر حسب سانتی‌متر، h_4 پتانسیل ماتریک نقطه پژمردگی و

تعیین پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های مختلف جذب آب: در جدول (۲) مقادیر پارامترهای مورد نیاز مدل‌های استفاده شده در پژوهش ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های مختلف جذب آب

p_2	p_1	α (%)	π_{50}	h_{50}	h_4	π^*	$h^* = h_3$
۱/۴۹	۱/۲۲	۰/۰۹۹	-۲۷۱۸	-۳۰۰۰	-۱۵۰۰۰	-۹۰۰	-۵۵۰

کاهش می‌یابد یا به عبارتی مقدار پتانسیل اسمزی در شرایطی که مقدار $\alpha(h) = 50$ باشد. از طرفی شیب خط کاهش عملکرد گوجه‌فرنگی ۹/۹- درصد گزارش شده است (همایی، ۱۳۸۱). با قراردادن پتانسیل اسمزی آستانه در معادله خطی که از نقطه $(\pi^* = -900, \alpha = 1)$ گذشته و با شیب خط ۹/۹- درصد کاهش می‌یابد و در نظر گرفتن $\alpha(h) = 0/5$ ، مقدار π_{50} برابر ۲۷۱۸- سانتی‌متر بدست می‌آید. h_4 همان پتانسیل ماتریک در نقطه پژمردگی دائم

نحوه محاسبه پارامترهای مدل‌های مورد استفاده

π^* پتانسیل اسمزی در آستانه کاهش محصول بوده که با توجه به آستانه شوری برای کاهش عملکرد گیاه تعیین می‌گردد (همایی، ۱۳۸۱). با توجه به اینکه حد آستانه شوری برای گوجه‌فرنگی ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد (منبع) مقدار پتانسیل اسمزی در آستانه کاهش محصول برابر ۹۰۰- سانتی‌متر بدست می‌آید. π_{50} مقدار فشار اسمزی است که در آن جذب توسط گیاه ۵۰ درصد

کاراکوس و همکاران (۲۰۰۶) پارامترهای آماری مذکور را برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده نموده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (13)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (14)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N Q_i} \quad (15)$$

$$ME = \max |P_i - Q_i|_{i=1}^N \quad (16)$$

در روابط فوق:

N تعداد نمونه، P_i مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و \bar{Q} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند.

نتایج و بحث

ضرایب کاهش جذب اندازه‌گیری شده

ارزیابی توابع کاهش جذب آب مستلزم اندازه‌گیری عملی ضرایب کاهش جذب در گیاهان تحت آزمایش و مقایسه آن با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها می‌باشد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در نمودار میزان ضریب جذب روزانه تیمارها اندازه‌گیری شده و در اشکال ۳ الی ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در اشکال ۳، ۴ و ۵ مشخص است، نمودار ضرایب کاهش جذب در تیمارهای با شوری بیشتر معمولاً پایین‌تر قرار می‌گیرد و روند نزولی جذب آب توسط ریشه با گذشت زمان در دوره آبیاری مشاهده می‌شود؛ زیرا با افزایش میزان نمک اثر تجمعی پتانسیل اسمزی و ماتریک افزایش یافته و در نتیجه باعث

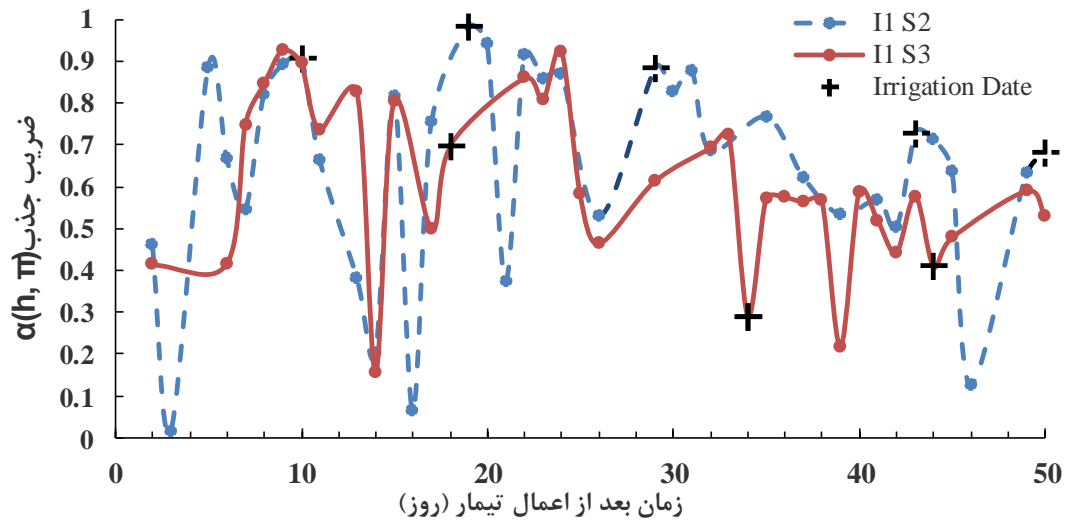
می‌باشد که برابر ۱۵۰۰۰- سانتی‌متر در نظر گرفته شد. α شیب خط درصد کاهش عملکرد به ازای هر واحد افزایش شوری عصاره اشباع خاک می‌باشد که، مقدار آن ۹/۹ درصد در نظر گرفته شد (همایی، ۱۳۸۱). مقدار h_3 پتانسیل ماتریک در آستانه کاهش عملکرد بوده و مقدار آن با توجه به تیمارهای غیر شور (مقدار نسبت کاهش جذب آب در تیمار غیر شور برای ۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصد گنجایش مزرع‌های به ترتیب ۱۵، ۲۰ و ۲۶ درصد برآورد گردید)، ۵۵۰- سانتی‌متر یعنی در حدود $PF = 2/74$ تعیین گردید. h_{50} پتانسیل ماتریکی از خاک است که در آن آبی که گیاه جذب می‌کند $\alpha(h) = 0/5$ باشد. با توجه به منحنی پتانسیل ماتریک خاک مقدار h_{50} با استفاده از مقدار پتانسیل ماتریکی که مقدار جذب را به صفر می‌رساند (۱۵۰۰۰- = h_4) و مقدار پتانسیل ماتریک آستانه کاهش محصول ($h_3 = -550$)، مقدار h_{50} برابر ۳۰۰۰- سانتی‌متر به دست آمد.

آماره‌های مورد استفاده در پژوهش: معیارهای

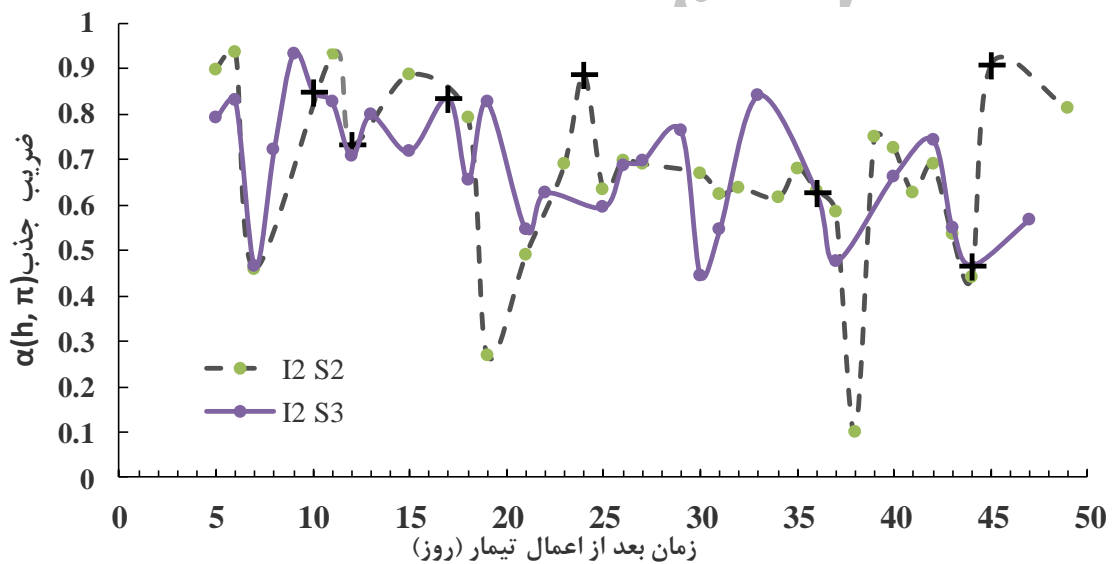
مختلفی برای ارزیابی مدل‌ها وجود دارد که به‌طور عمده بر اساس اختلاف بین خروجی‌های پیش‌بینی شده و خروجی‌های واقعی (اندازه‌گیری شده) استوارند. برای ارزیابی عملکرد مدل از آماره‌های خطای بیشینه (ME^1)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$)، درصد خطای نسبی (E^3)، میانگین خطای مطلق (MAE^4)، ضریب تبیین R^2 ، ضریب باقیمانده جرم (CRM^5) و کارایی مدل (EF^6) استفاده شد. بهترین پیش‌بینی‌ها زمانی رخ می‌دهد که آماره‌های ME ، $RMSE$ ، CRM ، ε و MAE به صفر و EF و R^2 به یک میل نمایند. روابط ۱۰ الی ۱۵ معادلات آماره‌های مذکور را نشان می‌دهند. پژوهش‌گران بسیاری چون فینل و همکاران (۲۰۱۱)، گکسلو (۲۰۰۲) و

- 1 - Maximum error
- 2 - Root mean square error
- 3 - Relative percentage error
- 4 - Mean Absolute Error
- 5 - Goodness of Fit
- 6 - Coefficient of Residual Mass
- 7 - Model Efficiency

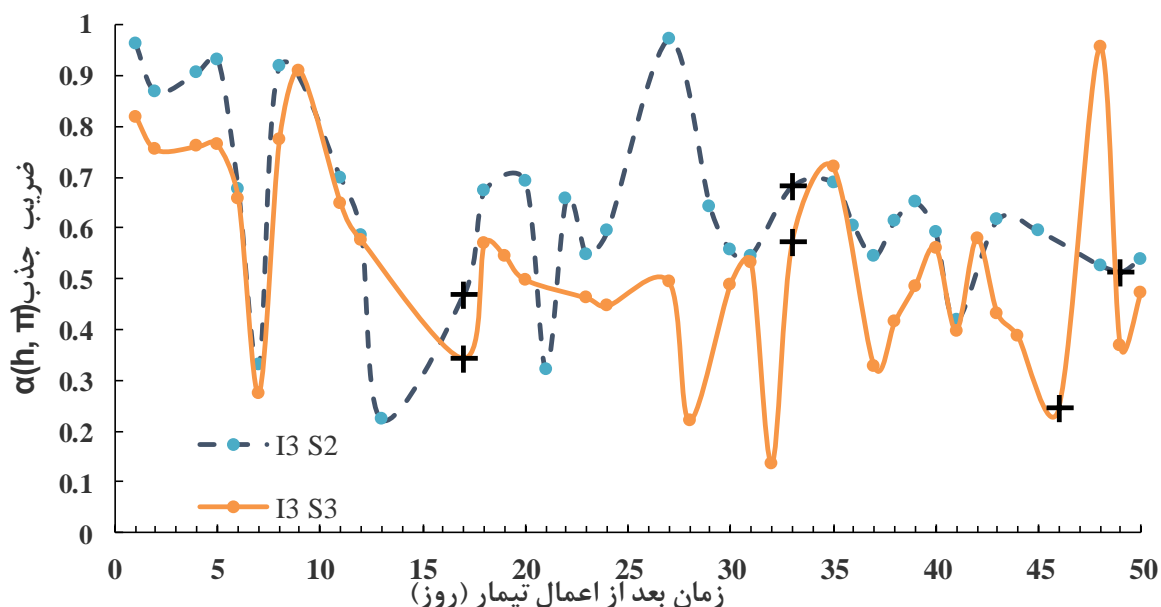
کاهش جذب آب توسط گیاه می‌شود. همچنین کاهش نوسانات جذب در گیاه در اشکال ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد. مشهودتر است. که این کاهش نوسان جذب در شوری‌های بیشتر



شکل ۳- ضریب کاهش جذب تیمارهای سطوح شوری چهار و هفت دسی‌زیمنس بر متر با ۴۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک



شکل ۴- ضریب کاهش جذب تیمارهای سطوح شوری چهار و هفت دسی‌زیمنس بر متر با ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک



شکل ۵- ضریب کاهش جذب تیمارهای سطوح شوری چهار و هفت دسی‌زیمنس بر متر با ۶۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک

دامنه‌تر می‌باشد که نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر گیاه در این مرحله از رشد به تغییرات محیط ریشه می‌باشد. کاهش نسبت جذب در طول فصل آبیاری در تیمارهای شوری و خشکی دیده می‌شود و این نشان‌دهنده آن‌است که با وجود آن‌که با گذشت زمان از شروع اعمال تنش‌های شوری و خشکی، گیاه می‌تواند به مرور با شرایط سازگاری یابد، اما تاثیر مستمر شوری و خشکی با گذشت زمان نیز افزایش یافته و سبب روند کاهش در نمودارهای نسبت جذب گشته است. دلیل دیگری که می‌تواند سبب نوسانات جذب شود نیز ممکن است به همین دلیل باشد، زیرا تیمار شاهد که با افزایش میزان جذب روزانه همراه است و به دلیل رشد روزانه گیاه نیاز آن به آب افزایش یافته و مقادیر بیش‌تری از آب را از محیط خاک جذب می‌نماید. در عین حال در تیمارهایی که تحت تاثیر شوری و خشکی قرار گرفته‌اند، میزان جذب آب با آبیاری نوسان خواهد داشت؛ به عبارت دیگر مخرج کسر نسبت جذب، با وجود روند کلی افزایش آن با نوساناتی همراه است؛ و صورت کسر نیز با وجود روند کلی کاهش آن در طول فصل آبیاری، با نوساناتی به دلیل آبیاری و غیره، همراه است. علت آن‌که تیمارهای تنش خشکی و شوری، پس از آبیاری، با کاهش نسبت جذب

همان‌طور که در اشکال ۳، ۴ و ۵ مشخص است، تعداد دفعات آبیاری برای تنش‌های آبی ۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصد به ترتیب برابر ۵، ۴ و ۳ مرتبه است و از آنجا که زمان آبیاری به وسیله سنجش رطوبت محیط ریشه انجام شده است، لذا آبیاری با فواصل یکسان برای تیمارهای خشکی صورت نگرفته است. به‌طوریکه مثلاً در تنش ۴۰ درصد با نزدیک شدن به انتهای دوره و افزایش رشد رویشی گیاه، فواصل آبیاری کاهش یافته است. این موضوع در سایر تیمارها نیز قابل مشاهده می‌باشد. همچنین اشکال مذکور نشان می‌دهند که در تیمارهای باشوری بیش‌تر و تنش آبی یکسان، میزان نوسانات ضریب جذب کمتر می‌شود که این موضوع می‌تواند به دلیل تغییر ناگهانی شرایط ریشه در زمان آبیاری باشد زیرا در انتهای دوره آبیاری به دلیل کاهش رطوبت و افزایش شوری محیط ریشه، در هنگام آبیاری با کاهش شوری مواجه شده و این امر سبب نوسانات با دامنه بیش‌تر در این تیمارها می‌گردد؛ اما در شرایط آبیاری با شوری بیش‌تر شرایط محیطی ریشه تغییرات کمتری داشته لذا نوسانات در دامنه کمتری برخوردار می‌باشند. نوسانات پردامنه در تیمارهای خشکی را نیز می‌توان ناشی از این امر دانست به‌طوریکه نوسانات در ابتدای دوره رشد نیز بیش‌تر و پر

مواجه می‌شوند نیز می‌تواند به همین علت باشد؛ زیرا با وجود افزایش میزان جذب آب در این تیمارها پس از آبیاری، به دلیل رشد روز افزون و سریع تیمار شاهد، نسبت جذب در تیمارها، همچنان نسبت به تیمار شاهد و روز قبل از آبیاری، کاهش نشان‌دهنده که این در واقع به دلیل افزایش بیش‌تر نیاز آبی تیمار شاهد در این فاصله می‌باشد. در واقع به دلیل آن‌که جذب آب توسط تیمار شاهد با توجه به مرحله رشد آن و میزان رشد آن در طول دوره متفاوت بوده و علی‌رغم سیر صعودی آن دارای نوساناتی می‌باشد، لذا نسبت جذب نیز در فاصله آبیاری، نوسان خواهد داشت و علی‌رغم سیر نزولی کلی آن در طول فصل آبیاری، همراه با نوساناتی خواهد بود.

با کاهش پتانسیل ماتریک، در سطح ۶۵ درصد گنجایش مزرعه‌ای، نمودارهای کاهش جذب در سطوح مختلف شوری، کاهش قابل ملاحظه‌ای را داشته و این می‌تواند نشان‌گر تأثیر هم‌افزایی شوری و خشکی در کاهش جذب در شرایط افزایش تنش‌ها باشد که با نتایج پژوهش یاناکاوا و فوجیماکی (۲۰۱۳) مطابقت می‌نماید. ضریب کاهش جذب آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مورد استفاده در سطوح مختلف پتانسیل ماتریک و اسمزی در اشکال ۶ الی ۱۱ و مقایسه آن‌ها از نظر آماره‌های ME ، $RMSE$ ، CRM ، ε ، MAE ، R^2 و EF در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج کلی آزمایشات نشان می‌دهد، با افزایش تنش خشکی و شوری، میزان جذب آب توسط ریشه به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد به طوری‌که متوسط نسبت جذب در تیمارهای I_1S_2 و I_3S_3 به ترتیب برابر $0/65$ و $0/53$ به دست آمد و در شرایطی که پتانسیل ماتریک خاک ثابت بماند با افزایش شوری، میزان جذب کاهش می‌یابد. به طوری‌که متوسط نسبت جذب در تیمارهای I_3S_2 و I_3S_3 به ترتیب برابر $0/68$ و $0/53$ به دست آمد. اشکال ۶، ۷ و ۸ جذب ریشه را در شرایط تنش شوری متوسط نشان می‌دهند. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، تأثیر مشخصی در تیمارهای ۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصد تخلیه رطوبتی از نظر

کاهش نسبت جذب آب توسط ریشه دیده نمی‌شود. نسبت جذب در طول دوره رشد گیاه با میانگین‌گیری میزان نسبت جذب ارائه شده در اشکال ۳، ۴ و ۵ در تیمارهای آبیاری شده با شوری چهار دسی‌زیمنس بر متر، $I_1 S_2$ و $I_2 S_2, I_3 S_2$ به ترتیب برابر $0/62$ ، $0/63$ و $0/64$ به دست آمد که نشانگر این مطلب است که اگر گیاه تحت تنش شوری زیاد نباشد، بهتر می‌تواند در برابر تنش خشکی تحمل نماید. از میان مدل‌های جذب در شرایط تنش‌های خشکی اعمال شده، همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مدل ضرب‌پذیر و ن‌گنوختن در تنش کم (تخلیه ۴۰ درصد)، با ME ، $RMSE$ ، ε ، MAE ، R^2 ، CRM ، EF به ترتیب برابر $0/28$ ، $0/03$ ، $0/083$ ، $0/11$ ، $0/75$ ، $0/11$ و $0/58$ از میان مدل‌ها، بیش‌ترین تطابق را با داده‌های به دست آمده ارائه داد و پس از آن مدل‌های دیرکسن و اسکگرز به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند.

مدل دیرکسن در تنش متوسط تخلیه ۵۰ درصد، با ME ، $RMSE$ ، ε ، MAE ، R^2 ، CRM ، EF به ترتیب برابر $0/12$ ، $0/02$ ، $0/806/86$ ، $0/56$ ، $0/05$ و $0/32$ از میان مدل‌ها، بیش‌ترین تطابق را با داده‌های به دست آمده ارائه داد. البته مدل‌های همایی و اسکگرز نیز به اندازه مدل دیرکسن از دقت بالایی برخوردار بودند. همچنین مدل جمع‌پذیر و ن‌گنوختن در تنش زیاد (تخلیه ۶۵ درصد)، با ME ، $RMSE$ ، ε ، MAE ، R^2 ، CRM ، EF به ترتیب برابر $0/14$ ، $0/16$ ، $0/067/07$ ، $0/12$ ، $0/63/046$ و $0/087$ از میان مدل‌ها، دارای بهترین برازش بوده و پس از آن مدل‌های و ن‌گنوختن ضرب‌پذیر و دیرکسن به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. به‌طور کلی می‌توان گفت که در شرایط شوری متوسط برای گوجه‌فرنگی مینیاتوری، مدل‌های و ن‌گنوختن و دیرکسن نتایج دقیق‌تری را نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌دهند. اگرچه در برخی منابع خاصیت ضرب‌پذیری تنش‌ها را دقیق‌تر از جمع‌پذیری آن‌ها در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی گزارش نموده‌اند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴) ولی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد بسته به نوع گیاه،

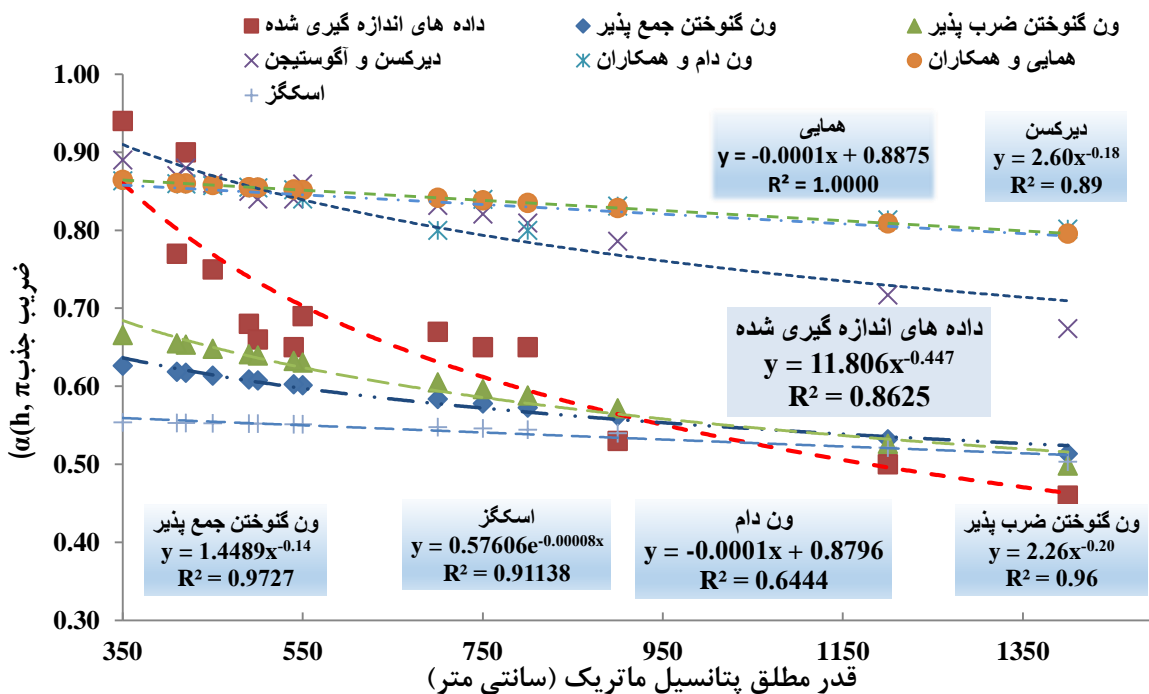
می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت، در گوجه فرنگی مینیاتوری، اختلاف مدل‌ها بیشتر به دلیل تأثیر تنش شوری در شاخه پایین رونده جذب می‌باشد؛ و به نظر می‌رسد که نمی‌توان تأثیر تنش شوری و تنش رطوبتی را به صورت مجزا بررسی نموده و می‌بایست در صورت امکان، تأثیر شوری بر کاهش جذب را به صورت تابعی از تنش رطوبتی بیان نمود. این موضوع در پژوهش حسینی و همکاران (۱۳۹۴) که اعمال تنش‌های خشکی و شوری را به‌طور هم‌زمان بر روی گیاه فلفل بررسی نمودند نیز مشاهده گردید.

اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ ارزیابی مدل‌ها را در شرایط تنش شوری بیشتر (۷ دسی‌زیمنس بر متر) و تنش آبی کم، متوسط و زیاد نشان می‌دهند. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، مدل ون‌دام در تنش کم (تخلیه ۴۰ درصد)، با ME ، $RMSE$ ، ε ، MAE ، R^2 ، CRM ، EF به ترتیب برابر $۰/۰۲$ ، $۰/۰۱۵$ ، $۰/۰۷۹/۲۷$ ، $۰/۱۲$ ، $۰/۵۳$ ، $۰/۱۱$ و $۰/۳۶$ - از میان مدل‌ها، بیشترین تطابق را با داده‌های به‌دست آمده ارائه داد و پس از آن مدل‌های همایی و اسکگرز به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برآوردهای مدل همایی بسیار نزدیک به مدل ون‌دام بود.

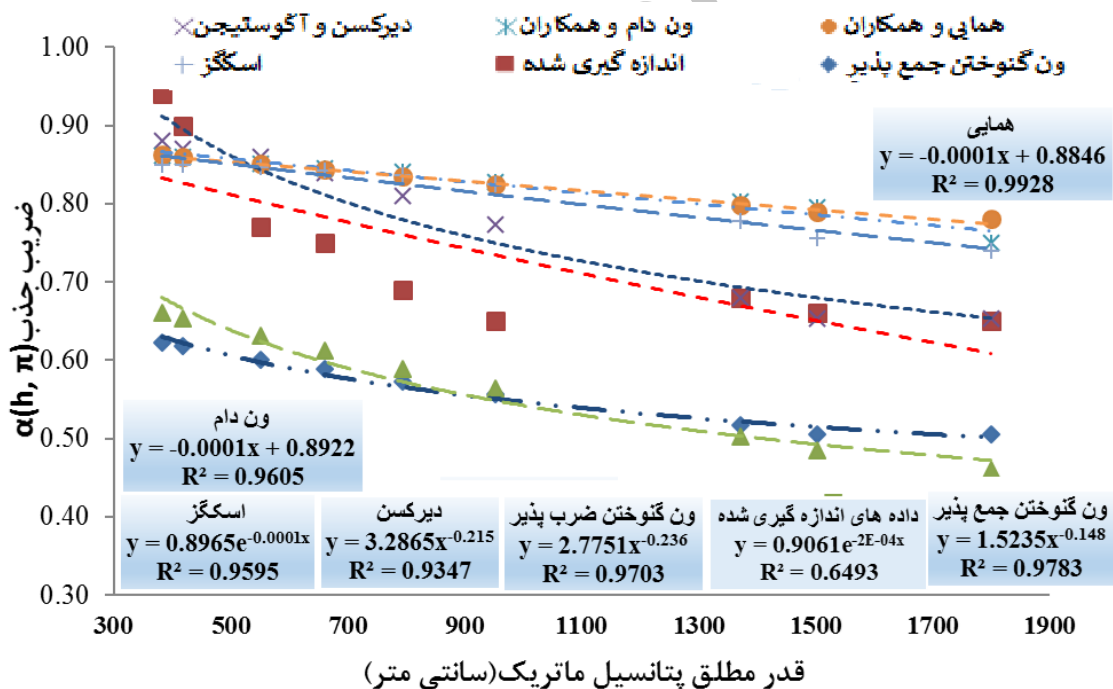
مدل ون‌دام در تنش متوسط تخلیه ۵۰ درصد، با ME ، $RMSE$ ، ε ، MAE ، R^2 ، CRM ، EF به ترتیب برابر $۰/۰۸$ ، $۰/۰۱$ ، $۰/۷۰۴۷/۷$ ، $۰/۴۵$ ، $۰/۰۶۹$ و $۰/۳۶$ از میان مدل‌ها، بیشترین تطابق را با داده‌های به‌دست آمده ارائه داد و پس از آن مدل همایی از بیشترین تطابق با داده‌های اندازه‌گیری شده برخوردار بود. همچنین مدل جمع‌پذیر ون‌گنوختن در تنش زیاد (تخلیه ۶۵ درصد)، با ME ، $RMSE$ ، ε ، MAE ، R^2 ، CRM ، EF به ترتیب برابر $۰/۰۸۵$ ، $۰/۰۱$ ، $۰/۸۰۴/۷$ ، $۰/۵۲$ ، $۰/۰۱۸$ و $۰/۷۲$ از میان مدل‌ها، دارای بهترین برازش بوده و پس از آن مدل دیرکسن و ون‌گنوختن ضرب‌پذیر به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند.

مدل جمع‌پذیر ون‌گنوختن می‌تواند در شرایط اعمال تنش شوری متوسط و تنش رطوبتی زیاد نتایج دقیق‌تری ارائه دهد و برعکس در تنش رطوبتی کم نتایج مدل ضرب‌پذیر دقیق‌تر باشد. مدل‌های دیرکسن، ون‌دام و همایی تقریباً در تمامی سطوح تنش رطوبتی، بیش برآورد داشته‌اند و این می‌تواند به دلیل شیب کاهش جذب ریشه در شرایط شوری باشد از آن‌جا که شیب مذکور در شرایط بدون تنش خشکی به‌دست می‌آید، ممکن است در شرایطی که تأثیر توام شوری و خشکی اعمال می‌گردد، شیب مذکور بیش از حالتی باشد که گیاه صرفاً تحت تأثیر تنش شوری قرار گیرد و این سبب می‌گردد که نتایج مدل همایی و ون‌دام در این پژوهش تمایل به بیش برآورد از خود نشان دهند. مدل‌های ون‌گنوختن ضرب‌پذیر و جمع‌پذیر در شرایط تنش رطوبتی متوسط، مقدار جذب را کمتر از مقادیر واقعی برآورد نموده‌اند. ولی با افزایش تنش رطوبتی مقادیر برآورد شده توسط این مدل‌ها، به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر می‌شود که این امر می‌تواند به دلیل تعدیل تأثیر همزمان تنش‌های رطوبتی و شوری با در نظر گرفتن حد آستانه در مدل‌های مذکور باشد. البته باید در نظر داشت که مدل جمع‌پذیر و مدل ضرب‌پذیر در شرایط تنش شوری متوسط نتایج تقریباً یکسانی را ارائه دادند.

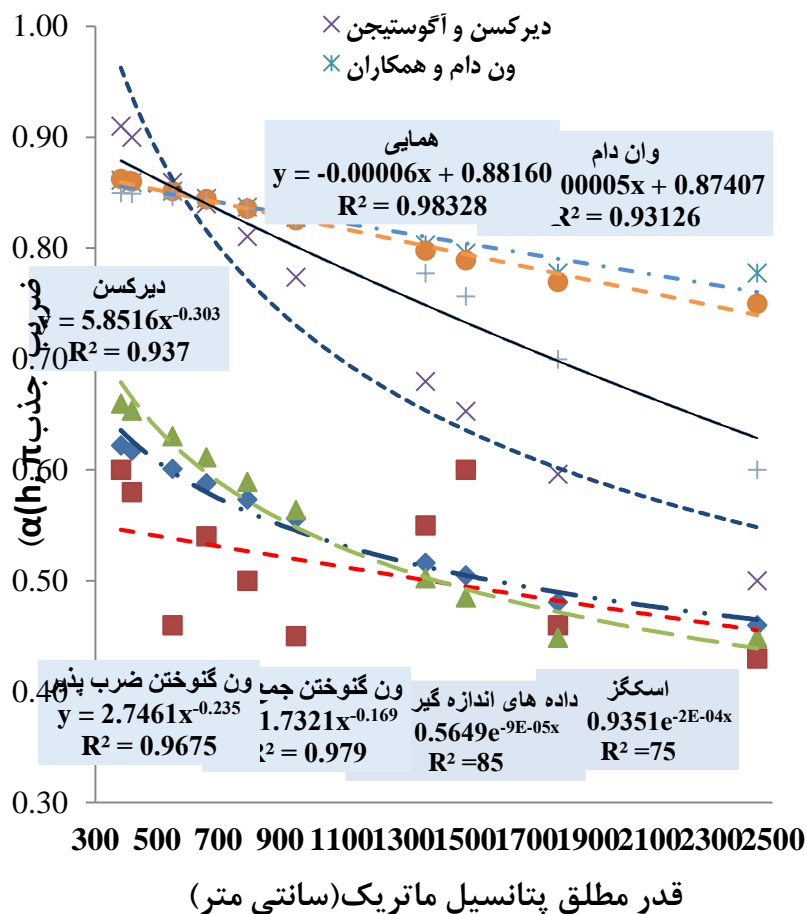
در مطالعه‌ای که توسط علیزاده و همکاران (۱۳۸۸) انجام شد نیز مدل ون‌گنوختن جمع‌پذیر در شرایط تنش شوری $۳/۵$ دسی‌زیمنس بر متر برای پتانسیل ماتریک زیاد پیشنهاد شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، از آنجا که مدل اسکگرز از ترکیب مدل‌های ون‌گنوختن و ماس هافمن بوجود آمده است در شرایط تنش رطوبتی کم، نتایج این مدل نزدیک به مدل ون‌گنوختن بوده است ولی با افزایش تنش شوری به دلیل استفاده از مدل ماس و هافمن که کاهش خطی جذب را پیش‌بینی می‌نماید، نتایج مدل اسکگرز به مدل‌های ون‌دام نزدیک شده است و تمایل به بیش برآورد را نشان



شکل ۶- برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از تیمار سطح شوری 4 dS m^{-1} و تخلیه ۴۰ درصد



شکل ۷- برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از تیمار سطح شوری 4 dS m^{-1} و تخلیه ۵۰ درصد



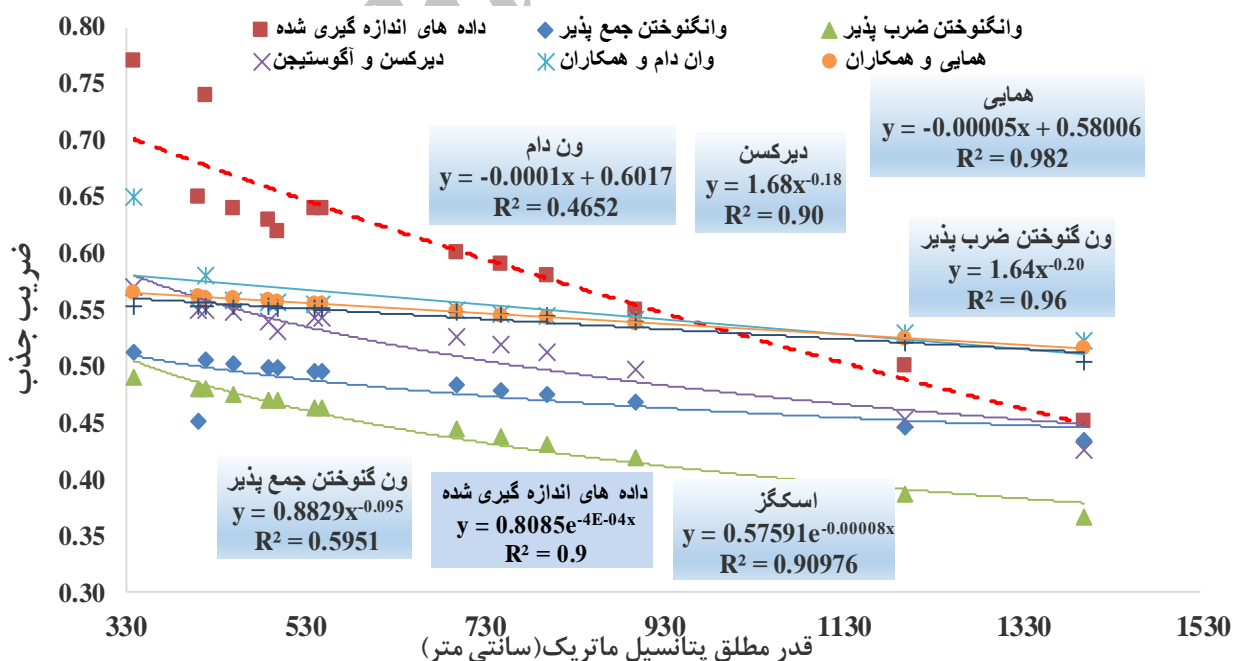
شکل ۸- برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از تیمار سطح شوری 4 dS m^{-1} و تخلیه ۶۵ درصد

بودند، در شرایطی که تنش شوری به هفت دسی‌زیمنس بر متر افزایش می‌یابد، این مدل‌ها به‌خوبی می‌توانند میزان نسبت جذب را برآورد نمایند. البته همان‌طور که در اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ مشخص است، با افزایش تنش رطوبتی دقت این مدل‌ها کاسته می‌شود. به نظر می‌رسد که این مدل‌ها در شرایط شوری زیاد و تنش رطوبتی متوسط حساسیت گیاه را به تنش‌های توام خشکی و شوری به‌خوبی برآورد می‌نمایند. همان‌طور که همایی و همکاران (۲۰۰۲) بیان داشته‌اند، با کاهش پتانسیل اسمزی و پتانسیل ماتریک، انرژی آزاد آب در خاک و به تبع آن میزان جذب توسط گیاه کاهش می‌یابد. هنگامی که گیاه تحت تاثیر تنش شوری قرار می‌گیرد می‌تواند خود را تا حدی با املاح محلول سازگار کند و شرایط جذب آب بیش‌تر را فراهم کند. در این شرایط، پاسخ گیاه به افزایش یک سانتی‌متر فشار اسمزی با کاهش یک سانتی‌متر مکش ماتریک

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، تقریباً تمام مدل‌ها، در هر سه تیمار شوری و خشکی دارای برازش کم بوده و میزان ضریب کاهش جذب را کمتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهند. یا به عبارتی در شرایط تنش رطوبتی کم، استفاده از توابع ترکیبی ممکن است نتایج دقیقی در بر نداشته باشند. از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل همایی اگرچه در شرایط تنش رطوبتی زیاد مانند مدل ون‌دام و اسکگز دارای بیش برآورد است. ولی در شرایط تنش شوری زیاد همان‌طور که در اشکال ۹، ۱۰ و ۱۱ و جدول ۳ مشخص است، این مدل توانایی خوبی در پیش‌بینی مقدار کاهش جذب دارد. این موضوع در پژوهش بابازاده و همکاران (۱۳۹۵) و سپاسخواه و همکاران (۲۰۱۰) نیز بیان شده است. بر خلاف آن‌که مدل‌های همایی و ون‌دام، اسکگز و دیپکسن و آگوستیجن، در شرایط تنش شوری کم دارای بیش برآورد

میزان کاهش جذب را با دقت بیشتری برآورد نماید. در شرایط تنش رطوبتی بالا، البته با بررسی شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ مشخص می‌شود که مدل دیرکسن و آگوستیجن در تنش‌های شوری بیشتر، به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌گردد که این می‌تواند ناشی از این امر باشد که در شرایط تنش‌های زیاد خشکی و شوری، دو بخش مربوط به اعمال تنش‌ها در مدل‌ها به صورت مستقل عمل نموده و در هم ضرب می‌گردد. در شرایط تنش شوری زیاد و اعمال تیمارهای خشکی، مدل ون‌گنوختن ضرب‌پذیر، ون‌دام و همایی و دیرکسن و آگوستیجن برآوردهای دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌های جذب دارند. در پژوهشی که در سه سطح شوری بر روی گندم صورت گرفت افزایش دقت مدل همایی در شوری‌های بیشتر بیان شده است (شهیدی و همکاران، ۱۳۸۹) که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. در واقع واکنش گیاه به تنش توام شوری و خشکی زیاد، بیشتر خاصیت ضرب‌پذیری دارد و برازش بهتر مدل‌های ضرب‌پذیر ون‌گنوختن و دیرکسن موید این مطلب می‌باشد و نتایج آماری مقایسه مدل‌ها نیز تایید کننده این موضوع می‌باشد.

یکسان نیست. درحالی‌که مدل ون‌دام و همایی شیب کاهش جذب آب توسط ریشه را در شرایط مختلف تنش خشکی یکسان در نظر می‌گیرند؛ در مدل‌های مذکور تأثیر تنش خشکی به صورت مجزا در نظر گرفته شده و سپس تنش شوری لحاظ شده است. به نظر می‌رسد در تنش‌های رطوبتی کمتر و شوری کمتر با توجه به این‌که این مدل‌ها تمایل به بیش‌برازش دارند می‌بایست تأثیر تنش خشکی در این مدل‌ها در شرایط هم‌زمانی با تنش شوری کمتر برآورد گردد، بخش دوم مدل‌های مذکور که تأثیر تنش شوری را در نظر می‌گیرد مجزا از بخش اول که تنش خشکی را لحاظ می‌نماید، نمی‌باشد. در نتیجه قسمت دوم مدل‌های مذکور بیشترین تأثیر را در تطابق داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج این مدل‌ها دارد و در صورت افزایش تأثیر قسمت اول این مدل‌ها که بخش مربوط به تنش رطوبتی می‌باشد، از دقت آن‌ها کاسته می‌شود. در صورت ارائه مدلی که بتواند در شرایط کاهش تنش رطوبتی پارامتر مربوط به تنش رطوبتی در این مدل‌ها را تعدیل نماید و یا با افزایش تنش رطوبتی تأثیر آن را در معادله افزایش دهد، می‌توان مدل بهتری ارائه نمود که



شکل ۹ - برازش مدل‌های مختلف برداده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از تیمار سطح شوری 7 dS m^{-1} و تخلیه چهار درصد

جدول ۳- مقایسه مدل‌ها از نظر شاخص‌های آماری برای تیمارهای با شوری چهار دسی‌زیمنس بر متر

رتبه کل	جمع رتبه شاخص‌ها	R2	ME	MAE	ε (%)	RMSE	EF	CRM	مدل‌های جذب	تیمار
۳	۱۸	۰/۷۵	۰/۳۱	۰/۱	۱۴/۳۷	۰/۰۳۶	۰/۴۵	۰/۱۵	وان گنوختن جمع پذیر	I1S2
۱	۹	۰/۷۵	۰/۲۸	۰/۰۸۳	۱۱	۰/۰۳	۰/۵۸	۰/۱۱	وان گنوختن ضرب پذیر	
۲	۱۶	۰/۷۶	۰/۲۵	۰/۱۵۳	۱۲/۳	۰/۰۴۴	۰/۴۹	۰/۱۷	دیرکسن	
۵	۳۳	۰/۴۶	۰/۳۴	۰/۱۷۶	۲۹/۴	۰/۰۵۲	۰/۵۳	۰/۱۹	وان دام	
۶	۳۵	۰/۵۳	۰/۳۳	۰/۱۸	۳۰/۱	۰/۰۵۳	۰/۶۳	۰/۱۹	همایی	
۴	۲۶	۰/۷۶	۰/۳۸	۰/۱۴۵	۱۹/۳۳	۰/۰۴۸	۰/۴۸	۰/۲۴	اسکگز	
۴	۳۵	۰/۵۹	۰/۳۱	۰/۱۸۳	۲۳/۴۶	۰/۰۳۹	۰/۲	۰/۳۱۹	وان گنوختن جمع پذیر	I2S2
۳	۳۰	۰/۵۸۱	۰/۲۷	۰/۱۶۸	۲۱/۷	۰/۰۳۶	۰/۲	۰/۲۸۶	وان گنوختن ضرب پذیر	
۱	۱۶	۰/۵۶	۰/۱۲	۰/۰۶۵	۸/۸۶	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۰۵	دیرکسن	
۲	۱۹	۰/۶۲	۰/۱۷	۰/۱۱	۱۵/۴۷	۰/۰۲۳	۰/۳۴	۰/۰۹	وان دام	
۱	۱۶	۰/۶۴	۰/۱۷	۰/۱	۱۵	۰/۰۲۳	۰/۳۶	۰/۰۹۴	همایی	
۱	۱۶	۰/۴	۰/۱۷	۰/۱	۱۴/۳	۰/۰۲۲	۰/۴۸	۰/۰۸	اسکگز	
۱	۱۰	۰/۰۴۶	۰/۱۴	۰/۰۶	۱۲/۷	۰/۰۱۶	۰/۰۸۷	۰/۰۶۳	وان گنوختن جمع پذیر	I3S2
۲	۱۶	۰/۰۴۳	۰/۱۸	۰/۰۸	۱۶/۲	۰/۰۲	۰/۲	۰/۰۷۹	وان گنوختن ضرب پذیر	
۳	۱۸	۰/۰۴۵	۰/۰۶	۰/۲۵	۴۹/۴	۰/۴	۰/۲۱/۸	۰/۳۲	دیرکسن	
۵	۳۲	۰/۰۴	۰/۰۶۶	۰/۳	۵۹/۱۴	۰/۴	۰/۲۶/۷	۰/۳۶	وان دام	
۶	۳۵	۰/۰۴	۰/۳۹	۰/۲۹	۵۸	۰/۰۶۵	۰/۲۶/۳	۰/۳۶	همایی	
۴	۳۰	۰/۰۳۲	۰/۳۶	۰/۲۸	۵۵/۳	۰/۰۶۲	۰/۲۱/۹	۰/۳۴	اسکگز	

جدول ۴- مقایسه مدل‌ها از نظر شاخص‌های آماری برای تیمارهای هفت دسی‌زیمنس بر متر

رتبه کل	رتبه جمع رتبه شاخص‌ها	R ²	ME	MAE	ε (%)	RMSE	EF	CRM	بهرترین مدل برازشی	تیمار
۵	۲۹	۰/۵۴	۰/۲۵	۰/۱۲۵	۲۰/۰۵	۰/۰۳۸	-۲/۱۳	۰/۲۶	وان گنوختن جمع پذیر	I ₁ S ₃
۶	۳۳	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۱۶۶	۲۶/۵	۰/۰۲۶	-۳/۵	۰/۳۷	وان گنوختن ضرب پذیر	
۴	۲۲	۰/۵۴	۰/۲	۰/۰۹۳	۱۴/۴	۰/۰۳	-۱/۱۷	۰/۱۷	دیرکسن	
۱	۱۰	۰/۵۳	۰/۰۲	۰/۰۷۹	۱۲/۲۷	۰/۰۲۵	-۰/۳۶	۰/۱۱	وان دام	
۲	۱۱	۰/۵۳	۰/۲	۰/۰۷۶	۱۲/۱۳	۰/۰۲۵	-۰/۳۹	۰/۱۲	همایی	
۳	۲۰	۰/۴۱	۰/۲۱	۰/۰۸۱	۱۲/۳	۰/۰۲۶	-۰/۴۸	۰/۱۲۸	اسکگز	
۵	۳۲	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱	۱۸	۰/۰۲۳	-۳/۷	۰/۲۲	وان گنوختن جمع پذیر	I ₂ S ₃
۶	۳۹	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۱۵	۲۵/۷	۰/۰۳۱	-۸/۶	۰/۳۵	وان گنوختن ضرب پذیر	
۴	۲۶	۰/۳۴	۰/۱۸	۰/۰۶	۱۰/۸	۰/۰۲	-۲/۴	۰/۱۲	دیرکسن	
۱	۸	۰/۴۵	۰/۰۸	۰/۰۴۷	۷/۷	۰/۰۱	۰/۳۶	۰/۰۶۹	وان دام	
۲	۱۱	۰/۳۴	۰/۰۹	۰/۰۴۷	۷/۶	۰/۰۱۱	۰/۲۶	۰/۰۷۳	همایی	
۳	۲۰	۰/۳۵	۰/۱	۰/۰۵	۸/۲۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۶	۰/۰۸۵	اسکگز	
۱	۱۰	۰/۵۲	۰/۰۸۵	۰/۰۴	۸/۷	۰/۰۱	۰/۷۲	۰/۰۱۸	وان گنوختن جمع پذیر	I ₃ S ₃
۲	۱۵	۰/۵۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۸/۸	۰/۰۱	۰/۰۴۱	-۰/۰۲۸	دیرکسن	
۳	۲۲	۰/۵۲	۰/۱۵	۰/۰۵۷	۱۱/۲۶	۰/۰۱۵	-۰/۳۸	۰/۱۳۵	وان گنوختن ضرب پذیر	
۴	۲۳	۰/۵۳	۰/۱۷	۰/۰۶۶	۱۵/۸	۰/۰۱۷	-۰/۰۲	-۰/۱۱۹	دیرکسن و وان دام	
۶	۳۵	۰/۰۴	۰/۳۹	۰/۲۹	۵۸	۰/۰۶۵	-۲۶/۳	-۰/۳۶	همایی	
۵	۳۰	۰/۰۳۲	۰/۳۶	۰/۲۸	۵۵/۳	۰/۰۶۲	-۲۱/۹	-۰/۳۴	اسکگز	

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در شرایط شوری و تنش‌های متفاوت، از دقت یکسانی برخوردار نبوده و نیاز است برای استفاده بهینه از مدل‌های ارائه شده برای گیاهان اقتصادی و پرمصرف، مدل‌ها در شوری‌ها و تنش‌های رطوبتی مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند. به‌طور خلاصه نتایج پژوهش نشان داد، در شوری متوسط (چهار دسی‌زیمنس بر متر) و تنش کم (تخلیه ۴۰ درصد) در

گوجه فرنگی مینیاتوری، مدل ضرب‌پذیر و ن‌گنوختن دقیق‌تر است در تنش متوسط (تخلیه ۵۰ درصد)، مدل دیرکسن بهترین نتایج را داشته و مدل جمع‌پذیر و ن‌گنوختن در تنش زیاد (تخلیه ۶۵ درصد)، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد در شرایط تنش شوری بالا (۷ دسی‌زیمنس بر متر)، مدل و ن‌دام در تنش کم (تخلیه ۴۰ درصد) و متوسط (تخلیه ۵۰ درصد) از میان مدل‌ها، بیش‌ترین تطابق را با داده‌های به‌دست آمده ارائه داد و

مستقل بودن تأثیر تنش‌های شوری و خشکی در تنش‌های سطوح بالا مشاهده می‌گردد و گیاه در شرایطی که تنش شوری خیلی بیشتر از حد آستانه آن نباشد، می‌تواند بخشی از تنش رطوبتی اعمال شده را جبران نماید.

مدل جمع‌پذیر و ن‌گنوختن در تنش زیاد (تخلیه ۶۵ درصد) دارای بهترین برازش بود. به نظر می‌رسد که مدل‌های ضرب‌پذیر در شرایط تنش شوری متوسط، کمتر تحت تأثیر تنش رطوبتی محاسبه شده توسط مدل‌های ضرب‌پذیر قرار گرفته و تمایل به بیش برازش دارند. لذا

فهرست منابع

۱. اکبری‌نوده‌ی، د.، عزیزی‌زهان، ع. ا.، و ر. رضایی سوخت‌آبدانی. ۱۳۹۲. بررسی رابطه میزان مصرف آب و عملکرد گوجه‌فرنگی در استان مازندران. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۷ (۴): ۵۱۲-۵۰۳.
۲. بابازاده، ح.، علیزاده ح.ع.، و م. سرایی تبریزی. ۱۳۹۵. توسعه مدل مفهومی تعدیل شده پاسخ گیاهان به تنش توأمان خشکی و شوری (مطالعه موردی: گیاه ریحان). پژوهشات آب و خاک ایران. ۷۴ (۲): ۲۹۲-۲۸۱.
۳. حسینی، ی.، بابازاده، ح.، و ب. خاکپورعربلو. ۱۳۹۴. ارزیابی توابع کاهش جذب آب گیاه فلفل در شرایط تنش هم‌زمان خشکی و شوری. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹ (۴): ۵۲۲-۵۰۹.
۴. شهیدی، ع.، نحوی‌نیا، م. ج.، و م. پارس‌نژاد. ۱۳۸۹. ارزیابی توابع کاهش جذب آب در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی توسط رقم روشن‌گندم. مجله پژوهش آب ایران. ۴ (۷): ۱-۱۲.
۵. طباطبائی، ح.، مردانی‌نژاد، س.، و ح. زارع‌ایبانه. ۱۳۹۳. اثر تنش آبی بر رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب فلفل در شرایط گلخانه‌ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۱ (۱): ۷۱-۶۳.
۶. عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. تهران: دانشگاه تهران. ۳۲۰ص.
۷. علیزاده، ح.ع.، نوری‌محمدیه، م.، و ع. لیاقت. ۱۳۸۸. ارزیابی توابع کاهش جذب آب توسط گوجه‌فرنگی در شرایط تنش هم‌زمان شوری و خشکی. نشریه آب و خاک. ۲۳ (۳): ۹۷-۸۸.
۸. علیزاده، ا. ۱۳۹۰. رابطه آب و خاک و گیاه. مشهد: دانشگاه فردوسی. ۴۷۲ص.
۹. فعالیان، ا.، انصاری، ح.، کافی، م.، علیزاده، ا.، و م. مقدسی. ۱۳۹۴. اثر تنش‌های هم‌زمان شوری و خشکی بر عملکرد گوجه‌فرنگی در کشت بدون خاک. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹ (۴): ۶۳۳-۴۴۷.
۱۰. همایی، م. ۱۳۸۱. واکنش گیاهان به شوری. تهران: نشریه شماره ۵۸، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰۷ص.
11. Chaali, N., Commegna, A., Dragonetti, G., Todorovic, M., Albrizio, R., Hijazeen, D., Lamaddalena, N., and A. Coppola. 2013. Monitoring and Modeling Root-uptake Salinity Reduction Factors of a Tomato Crop under Non-Uniform Soil Salinity Distribution. *Procedia Environmental Sciences*. 19: 643-653.
12. Dirksen, C., and D.C. Augustijn. 1988. Root water uptake function for no uniform pressure and osmotic potentials. *Agric. Abstracts*. pp.188.
13. Gokceoglu, C. 2002. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. *Engineering Geology*. 66: 39-51.
14. Finol, J., Guo, Y.K., and X.D. Jing. 2001. A rule based fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameters. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 29: 97-113.
15. Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and H. Zaradny. 1978. Simulation of field water use and crop yield. *Prudoc. Wageningen*. 189 pp.

16. Homae, M., Dirksen, C., and R.A. Feddes. 2002. Simulation of root water uptake. I. Non – uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions. *Agricultural Water Management*. 57: 89-109.
17. Homae, M. 1999. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water tress. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University. 173 pp
18. Maas, E.V., and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance Current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 103:115–134.
19. Mualem, Y. 1976. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:513–522.
20. Karakus, M. and Tutmez. B. 2006. Fuzzy and multiple regression modeling for evaluation of intact rock strength based on point load, Schmidt hammer and sonic velocity, *Rock Mech. Rock Eng.* 39 (1) ,45–57.
21. Rahman, M.A., Smith, J.G., Stringer, P., and A.R. Ennos. 2011. Effect of rooting conditions on the growth and cooling ability of *Pyrus calleryana*. *Urban Forestry & Urban Greening* 10:185–192.
22. Rameshwaran, P., Tepe, A., Yazar, A., and R. Ragab. 2016. Effects of Drip-Irrigation Regimes with Saline Water on Pepper Productivity and Soil Salinity under Greenhouse Conditions. *Scientia Horticulturae* 199: 114-123.
23. Sepaskhah, A. R., and N. Yarami. 2010. Evaluation of macroscopic water extraction model for salinity and water stress in saffron yield production. *International Journal of Plant Production* 4 (3):175-186.
24. Skaggs, T.H., Van Genuchten, M.Th., Shouse, P.J., and J.A. Poss. 2006. Root uptake and transpiration: From measurements and models to sustainable irrigations. *Agric. Water Manage.* 86: 140–179.
25. U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Dep. Agric. Handb.
26. Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., Van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., and C.A. Van Diepen. 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.
27. Van genuchten, M. Th., and S.K. Gupta. 1993. A Reassessment of the Crop Tolerance Response Function. *Journal of the Indian Society of Soil Science*. 41(4): 730-737.
28. 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.
29. Yanagawa, A., and H. Fujimaki. 2013. Tolerance of canola to drought and salinity stresses in terms of root water uptake model parameters. *J. Hydrol. Hydromech.* 61(1): 73–80.

Evaluating Water Uptake Functions under Simultaneous Salinity and Water Stress Conditions in Cherry Tomato (*Solanum lycopersicum*)

Y. Hoseini¹*, J. Ramezani Moghaddam, M. R. Nikpour, and A. Abdoli

Associate Professor, Moghan College of Agriculture & Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili.

y_hoseini@uma.ac.ir

Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili.

j_ramezani@uma.ac.ir

Assistant Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili.

m_nikpour@uma.ac.ir

MSc Graduate of Irrigation & Drainage, University of Mohaghegh Ardabili.

atiehabdoli@gmail.com

Abstract

Various mathematical models are available for predicting the response of plants to combined water and salinity stress and their share in water uptake. The reduction functions are classified as additive, multiplicative, and conceptual models. In this study, 6 macroscopic reduction functions, namely, Van Genuchten (additive and multiplicative), Dirksen et al., Van Dam et al, Homae and Skaggs were evaluated in a greenhouse experiment on cherry tomato, var. cherry tomato cluster. This experiment was performed based on a completely randomized design with 3 replicates and 2 levels of salinity (4 and 7 dSm⁻¹). Water stress levels were imposed as matric potential decline during the study at 3 levels of available water depletion (40%, 50%, and 65%). The result of the study indicated that the crop response to water stress and salinity stress was incremental at 4 and 7 dSm⁻¹ salinity levels. Among the multiplicative models, reduction functions of Dirksen model had better fit than others at 4 dSm⁻¹ salinity level (RMSE=0.15 and ME=0.14). However, at 7 dSm⁻¹, Van Dam (RMSE=0.017, ME=0.09) and Skaggs (RMSE=0.018, ME=0.14) had better fit to the measured data.

Keywords: Root water uptake, Soil dryness, Water salinity, Moisture stress

1 - Corresponding author: Ardabil Province, Parsabad City- Moghan College of Agriculture & Natural Resources.

* - Received: July 2017 and Accepted: May 2018