

کاربرد توابع جذب آب برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط اثر متقابل تنش

شوری خاک و مرحله رشد

رضا سعیدی^۱ و عبدالمجید لیاقت

دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع)، قزوین، ایران.

saeidi@org.ikiu.ac.ir

استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

aliaghat@ut.ac.ir

دریافت: دی ۱۴۰۱ پذیرش: اسفند ۱۴۰۱

چکیده

این پژوهش در سال ۱۴۰۰ با هدف شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در شرایط کاربرد جداگانه تنش شوری در مراحل مختلف رشد در مینی لایسیمتر و در شهرستان قزوین انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. به این منظور، شوری خاک در چهار سطح $1/7(S_1)$ ، $3(S_2)$ ، $5(S_3)$ و $7(S_4)$ دسی‌زیمنس بر متر به‌عنوان فاکتور اصلی و فاکتورهای فرعی شامل مراحل مختلف رشد به‌صورت یک مرحله‌ای در مراحل C_1 شش برگی، C_2 گل‌دهی، C_3 شیری شدن دانه‌ها و دو مرحله‌ای شامل C_1C_2 شش برگی-گل‌دهی، C_1C_3 شش برگی-شیری شدن دانه‌ها و C_2C_3 گل‌دهی-شیری شدن دانه‌ها، به کار برده شد. آب شور مطابق تیمارها از ترکیب آب شور یک زهکش شوره‌زار با آب چاه (شوری $0/5 \text{ dS.m}^{-1}$) تهیه شد. سپس در مرحله رشد مورد نظر، خاک با آب شور به طوری آبیاری شد که شوری آب ورودی و خروجی از مینی لایسیمتر، با هم برابر بود. تیمار شاهد با آب چاه آبیاری شد. در فرایند مدل‌سازی از ترکیب توابع کاهش جذب آب، مدل‌های اشتقاقی برای شبیه‌سازی ضرایب کاهش عملکرد محصول (α) تهیه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. از داده‌های تیمارهای یک مرحله‌ای رشد برای واسنجی مدل‌ها و از داده‌های تیمارهای دو مرحله‌ای رشد برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. بر اساس نتایج، کاربرد بالاترین سطح شوری منجر به کاهش عملکرد ماده خشک تولیدی از $157/2$ گرم برای هر بوته (در تیمار S_1) تا $115/9$ ، $53/2$ ، $77/7$ ، $86/1$ ، 97 و $46/5$ گرم در تیمارهای C_1 ، C_2 ، C_3 ، C_1C_2 ، C_1C_3 و C_2C_3 گردید. نتایج نشان داد که حساسیت گیاه به دو حالت اعمال تنش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای رشد متفاوت بوده و کاربرد تنش شوری در مراحل حساس رشد (گل‌دهی: C_2 و شیری شدن دانه: C_3)، تأثیر منفی بیشتری نسبت به تیمارهای C_1C_2 و C_1C_3 را به همراه داشت که دلیل آن، سازگاری فیزیولوژیکی گیاه در مراحل اولیه رشد نسبت به تنش شوری است. در این پژوهش مدل‌های جمع‌پذیر و ن‌گن‌وختن و ضرب‌پذیر دیرکسن و ماس-هافمن با مقادیر خطای کم‌تر و همبستگی بالاتر به‌عنوان مدل‌های بهینه برای شبیه‌سازی عملکرد محصول قابل توصیه می‌باشد. همچنین، اعمال تنش شوری دو مرحله‌ای (تا سطح 7 dS.m^{-1}) در تیمارهای C_1C_2 و C_1C_3 ، عملکرد بیشتری نسبت به اعمال تنش یک مرحله‌ای در مراحل رشد C_2 و C_3 داشت.

واژه‌های کلیدی: حساسیت به شوری، ضریب تنش، مدل و ن‌گن‌وختن، مدل دیرکسن و ماس-هافمن

مقدمه

وجود محدودیت در میزان کمیت و کیفیت منابع آب در بخش کشاورزی، پژوهشگران را به سوی مطالعه عملکرد محصول در شرایط مختلف محیطی و مدیریتی هدایت می‌کند. در بین تنش‌های محیطی، افزایش شوری آب آبیاری از جمله تنش‌هایی است که باعث کاهش پتانسیل آب خاک، کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق گیاه و در نهایت کاهش عملکرد محصول می‌شود (لاکیردا و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهشی بر روی گیاه ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین گزارش شد که افزایش شوری آب آبیاری از ۰/۵ به ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر، باعث کاهش پتانسیل آب خاک و کاهش جذب آب توسط گیاه می‌شود و در نتیجه مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه افزایش یافته و منجر به کاهش مقدار تبخیر-تعرق، از ۳۵۳ به ۲۷۴ میلی‌متر و عملکرد ماده خشک از ۱۵/۴ به ۹ تن بر هکتار می‌شود (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، نتایج پژوهشی دیگر در منطقه اهواز نشان داد که افزایش شوری آب آبیاری از ۲ به ۷ دسی‌زیمنس بر متر، باعث کاهش عملکرد دانه ذرت از ۶۳۰۷ به ۲۶۲۳ کیلوگرم بر هکتار می‌گردد (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). بر اساس یافته‌های فنگ و همکاران (۲۰۱۷)، به‌ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری آب آبیاری، به‌طور متوسط حدود سه درصد از عملکرد محصول ذرت کاهش می‌یابد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد علاوه بر شناخت اثرات کلی شوری بر عملکرد گیاه ذرت، شناخت حساسیت درون‌فصلی این گیاه نسبت به تنش‌های محیطی، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر عملکرد محصول را فراهم می‌کند (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش تنش‌هایی مانند تنش آبی قبل از مرحله گل‌دهی ذرت، بر مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بسیار مؤثر است به‌طوری‌که افزایش تنش در مرحله گل‌دهی، بر شدت کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نسبت به مراحل دیگر رشد می‌افزاید (اکبری نودهی، ۱۳۹۶)؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد که گیاه ذرت جزو گیاهانی به‌شمار می‌رود که نسبت به اعمال تنش‌های محیطی در طول فصل رشد،

واکنش یکسانی از نظر کاهش عملکرد محصول نداشته و زمان اعمال تنش، اثر قابل توجهی بر کاهش میزان عملکرد محصول آن می‌گذارد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که دوره رشد ذرت شامل مراحل استقرار گیاهچه، مرحله رشد سریع، گرده‌افشانی و پُر شدن دانه است که از نظر فرآیندهای فیزیولوژیکی و حساسیت گیاه، متفاوت است و کاربرد تنش‌های مختلف در مراحل رشدی مذکور، تأثیر متفاوتی بر روی مقدار عملکرد محصول خواهد داشت (نیلسن، ۲۰۰۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد که تنش شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) در مرحله رشد رویشی، آسیب زیادی به گیاه ذرت وارد کرده به‌نحوی‌که با آبیاری کامل در مرحله گل‌دهی قابل جبران نیست. علاوه بر این، مرحله گل‌دهی و اوایل پرشدن دانه، حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی در گیاه ذرت می‌باشند. در حالی که قطع آبیاری بعد از مرحله خمیری شدن دانه، منجر به کاهش عملکرد معنی‌داری نمی‌گردد (همتی و همکاران، ۱۳۹۳).

با توجه به پژوهش‌های گذشته اثر حساسیت درون‌فصلی گیاه به تنش‌های محیطی (مانند شوری و خشکی) آشکار شده است؛ اما تاکنون بررسی اثر تنش شوری در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت و مدل‌سازی تخمین عملکرد آن بر اساس این تنش‌ها انجام نشده است. در پژوهش سعیدی و همکاران (۱۳۹۸) اثر تنش شوری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد گیاه ذرت بررسی شد و با توجه به حساسیت متفاوت گیاه به اعمال تنش شوری در مراحل مختلف رشد، دو فرضیه مطرح شده است. بر این اساس و در فرضیه اول، اثر تنش شوری در هر یک از مراحل رشد مستقل بوده و فقط در همان مرحله کاربرد تنش، بر میزان عملکرد گیاه اثرگذار است. به‌طوری‌که بر مقدار عملکرد گیاه در مراحل بعدی رشد، تأثیری نمی‌گذارد؛ یعنی اثر کاربرد تنش شوری (بر جذب آب و عملکرد گیاه) در دو مرحله متفاوت رشد، در پایان دوره رشد محصول قابل جمع شدن است (جمع‌پذیر بودن اثر تنش در مراحل رشد). در فرضیه دوم، اثر تنش شوری اعمال شده در مراحل اولیه رشد باعث افزایش یا کاهش

در روابط (۲) الی (۴): h : مکش ماتریک حاصل از کاهش آب خاک (سانتی‌متر)، h_{50} : میزان مکش ماتریکی که به‌ازاء آن میزان جذب آب نصف می‌شود (سانتی‌متر)، P : ضریب تجربی وابسته به خاک، گیاه و اقلیم منطقه و h_3 : مکش ماتریک در آستانه کاهش جذب آب در شرایط تنش خشکی (سانتی‌متر) است. h_{max} : مقدار مکش ماتریک که بسیار بیشتر از مقدار h بوده و در آن، گیاه در یک سطح بسیار اندک به فعالیت حیاتی خود ادامه می‌دهد و هنوز زنده است (سانتی‌متر).

مدل‌هایی نیز وجود دارند که به‌طور همزمان اثر تنش شوری و خشکی را در دوره رشد گیاه در نظر گرفته‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل جمع‌پذیر و ن‌گنوختن (ون‌گنوختن، ۱۹۸۷) و مدل‌های ضرب‌پذیر و ن‌گنوختن (ون‌گنوختن، ۱۹۸۷)، دیرکسن و همکاران (دیرکسن و همکاران، ۱۹۹۳)، وان دام و همکاران (وان دام و همکاران، ۱۹۹۷)، همایی و فدس (همایی و فدس، ۱۹۹۹)، اسکگر و همکاران (اسکگر و همکاران، ۲۰۰۶) و همایی و همکاران (همایی و همکاران، ۲۰۰۲) اشاره نمود که معادلات آن‌ها به‌ترتیب در روابط (۵) الی (۱۱) ارائه شده است.

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a_1 h + a_2 \pi}{h_{50}} \right)^p} \quad (5)$$

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

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h_3 - h}{h_3 - h_{50}} \right]^{p_1}} \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_2}} \quad (7)$$

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

$$\alpha(h, \pi) = \frac{h - (h_4 - \pi)}{h_3 - (h_4 - \pi)} \times \left[1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (9)$$

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h}{h_{50}} \right]^{p_1}} \times \left[1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi) \right] \quad (10)$$

مقاومت گیاه به تنش‌های آبی (سازگاری یا عدم سازگاری به تنش) شده و به‌این ترتیب بر مراحل بعدی رشد هم اثرگذار بوده است (خاصیت ضرب‌پذیری اثر تنش). از این‌رو فرایند جمع‌پذیری و یا ضرب‌پذیری اثر تنش شوری در مراحل رشد گیاه و مدل‌سازی عملکرد محصول بر اساس آن، قابل مطالعه است.

تاکنون برای بررسی میزان جذب آب توسط ریشه در شرایط تنش‌هایی مانند شوری و خشکی و اثر آن بر عملکرد گیاه، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. رابطه (۱) به‌عنوان یکی از مدل‌های پایه در این قبیل پژوهش‌ها به‌کار می‌رود. طبق رابطه مذکور اگر خاک نتواند نیاز آبی گیاه را برای حداکثر تعرق فراهم آورد، از میزان جذب آب به‌وسیله ریشه‌های گیاه کم شده و درنهایت باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (دیرکسن و آگوستین، ۱۹۸۸).

$$S = \alpha(h) \times S_{max} \quad (1)$$

در رابطه (۱): S : میزان جذب آب توسط گیاه و S_{max} : حداکثر میزان جذب آب به‌وسیله گیاه است.

از معروف‌ترین مدل‌هایی که برای تعیین ضریب $\alpha(h)$ در شرایط تنش آبی کاربرد دارد، تابع سیگموئیدی شکل در رابطه (۲) است که توسط ون‌گنوختن (ون‌گنوختن، ۱۹۸۷) پیشنهاد شده است. در پژوهش دیگر، رابطه (۲) نسبت به مقدار پتانسیل ماتریک در آستانه کاهش جذب آب (h_3) تعدیل شد و به‌صورت رابطه (۳) ارائه شد (دیرکسن و آگوستین، ۱۹۸۸). با توجه به نتایج تحقیقات سایر پژوهش‌گران، پاسخ گیاهان به تنش آبی در پتانسیل‌های ماتریک کم، خطی نبوده است. همچنین در پتانسیل‌های ماتریک نزدیک به صفر، مقدار $\alpha(h)$ زیاد برآورد شده است. از این‌رو برای رفع نواقص مذکور رابطه (۴) ارائه شد (همایی و همکاران، ۲۰۰۲).

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h}{h_{50}} \right]^{p_1}} \quad (2)$$

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{h_3 - h}{h_3 - h_{50}} \right]^{p_1}} \quad (3)$$

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \alpha_0) [h_3 - h]}{\alpha_0 [h_3 - h_{max}]}}^{p_1}} \quad (4)$$

شوری، کم‌آبی و تنش هم‌زمان شوری و کم‌آبی را با دقت مناسب ($R^2=0.97$ ، $NRMSE=8/5\%$ و $ME=12/4\%$) شبیه‌سازی نماید (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۵). در پژوهشی دیگر با استفاده از داده‌های کشت گلدانی گیاه گوجه‌فرنگی، پاسخ گیاه به تنش هم‌زمان شوری و خشکی بررسی شد. نتایج نشان داد در سطوح شوری و خشکی کم، مدل ضرب‌پذیر و ن‌گنوختن و در سطوح شوری و خشکی زیاد، مدل جمع‌پذیر و ن‌گنوختن بیش‌ترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌ای (واقعی) دارد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷).

با توجه به پژوهش‌های گذشته این مسئله قابل بررسی است که اگر گیاه یک‌بار تجربه تنش شوری در مراحل اولیه رشد را داشته باشد، پاسخ آن به تنش‌های آبی (در مراحل حساس رشد) و اثر آن بر عملکرد محصول چگونه خواهد بود؛ بنابراین پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی عملکرد ذرت در شرایط کاربرد تنش شوری در مراحل مختلف رشد و اثرات متقابل آن انجام شده است. به این منظور با الهام گرفتن از مدل‌های (۵) الی (۱۱)، اثر متقابل تنش شوری در مراحل اولیه و حساس رشد، بر کاهش عملکرد محصول ذرت شبیه‌سازی می‌شود. با این کار می‌توان در شرایط تلفیق تناوبی (پالسی) آب شور و شیرین در دوره کشت ذرت، مقدار عملکرد محصول را شبیه‌سازی نمود.

مواد و روش‌ها

ناحیه مورد مطالعه

این پژوهش به مدت یکسال (۱۴۰۰) در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) با موقعیت جغرافیایی $23^{\circ} 19'$ عرض شمالی و $50^{\circ} 00' 38''$ طول شرقی واقع در شهر قزوین انجام شد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در مینی‌لایسیمترهایی با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر در ۱۰ خرداد ۱۴۰۰ و مطابق با روش پژوهش‌های پیشین (سعیدی، b ۱۴۰۰؛ دهقانی سانج و همکاران، ۱۳۹۶؛ دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶) کشت گردید. خاک فراهم‌شده برای پُر کردن مینی‌لایسیمترها، مخلوطی از خاک مزرعه،

$$\alpha(h, \pi) = \frac{1}{1 + \frac{(1-\alpha_{01}) \left[\frac{h_3-h}{h_3-h_{\max}} \right]^{p_1}}{\alpha_{01}}} \times \frac{1}{1 + \frac{(1-\alpha_{02}) \left[\frac{\pi^*-\pi}{\pi^*-\pi_{\max}} \right]^{p_1}}{\alpha_{02}}} \quad (11)$$

در روابط فوق، $\alpha(h, \pi)$: تابع کاهش شدت جذب و یا شدت عملکرد محصول در اثر دو متغیر مستقل تنش شوری و خشکی، π : فشار اسمزی ناشی از تنش شوری (سانتی‌متر)، a_1 و a_2 : ضرایب تجربی برای مکش آب خاک و فشار اسمزی در مدل جمع‌پذیر و ن‌گنوختن، π_{50} : میزان فشار اسمزی که به‌ازاء آن میزان جذب آب نصف می‌شود (سانتی‌متر)، h_4 : مکش ماتریک در نقطه پژمردگی دائم گیاه (سانتی‌متر)، π^* : فشار اسمزی در آستانه کاهش جذب آب در شرایط تنش شوری (سانتی‌متر) و b : میزان درصد کاهش عملکرد محصول به‌ازاء افزایش یک واحد شوری (دسی‌زیمنس بر متر) نسبت به آستانه تحمل گیاه است. π_{\max} : میزان فشار اسمزی که بیشتر از مقدار π بوده و در آن، گیاه در یک سطح بسیار اندک به فعالیت حیاتی خود ادامه می‌دهد و هنوز زنده است (سانتی‌متر). روش محاسبه فشار اسمزی (π) بر اساس واحد سانتی‌متر، اولین بار توسط ریچاردز (ریچاردز، ۱۹۵۴) و مطابق رابطه (۱۲) ارائه شد. به‌طوری‌که EC_e شوری آب خاک بر اساس واحد دسی‌زیمنس بر متر بود.

$$\pi = -360 \times EC_e \quad (12)$$

تاکنون از روابط (۵) الی (۱۱) برای تخمین میزان کاهش جذب آب و یا کاهش عملکرد محصول در شرایط اعمال توأمان تنش‌های شوری و خشکی در کل دوره رشد گیاه، استفاده شده است. به این صورت که در پژوهش‌های مرتبط، یک حد ثابت از تنش‌های خشکی و شوری در همه مراحل رشد گیاه اعمال می‌شده و برای جلوگیری از تجمع املاح در خاک و افزایش تنش شوری، خاک همواره تحت آبخوبی قرار داشته است. برای شرایط مذکور، پاسخ گیاه ریحان به تنش‌های شوری و خشکی در محیط گلخانه مدل‌سازی شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای گیاه ریحان نشان داد که مدل مفهومی اصلاح‌شده همایی و همکاران (۲۰۰۲) قادر بوده است که واکنش گیاه به تنش

خاک، در کف مینی لایسیمترها از لوله‌های سوراخ‌دار و بستر شن (به‌عنوان زهکش) استفاده شد.

ماسه‌بادی و کود حیوانی با نسبت ۳، ۱ و ۱ بود که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است. برای جلوگیری از تجمع املاح در خاک و کنترل مقدار شوری

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مینی لایسیمتر

پارامتر	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	$dS.m^{-1}$	۰/۴۶
اسیدیته (pH)	-	۷/۴
بافت خاک	-	لوم شنی
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	۲۳
رطوبت وزنی حد پژمردگی	%	۱۰
جرم مخصوص ظاهری	$g.cm^{-3}$	۱/۳۶

تیمارهای پژوهش

در پژوهش حاضر سطوح مختلف تنش شوری از طریق آب آبیاری و به‌صورت ناپیوسته، در مقاطعی از دوره رشد گیاه ذرت به کار برده شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی، با ۲۴ تیمار و سه تکرار اجرا شد. بدین منظور، چهار سطح شوری خاک شامل (S₁) ۱/۷، (S₂) ۳، (S₃) ۵ و (S₄) ۷ دسی‌زیمنس بر متر به‌عنوان فاکتور اول (اصلی) در نظر گرفته شد. همچنین، فاکتورهای فرعی شامل مراحل مختلف رشد به‌صورت یک مرحله‌ای در مراحل (C₁) شش برگی، (C₂) گل‌دهی، (C₃) شیری شدن دانه‌ها و دو مرحله‌ای شامل (C₁C₂) ۶ برگی - گل‌دهی، (C₁C₃) شش برگی-شیری شدن دانه‌ها و (C₂C₃) گل‌دهی - شیری شدن دانه‌ها، به‌عنوان فاکتور دوم تعریف شدند. از اختلاط آب شیرین چاه (۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر) با آب شور زهکش حائل در شوره‌زار منطقه آبیگ قزوین، آب شور مطابق با سطوح شوری تیمارها فراهم شد (جدول ۲). سپس در مرحله رشد مدنظر (فاکتورهای فرعی)، خاک از طریق آب شور مذکور اعمال تیمار شد. به‌گونه‌ای که در هر یک از مراحل مختلف رشد مورد نظر، آبیاری با آب شور تا رسیدن شوری عصاره اشباع خاک (در ناحیه ریشه) به شوری تیمار مد نظر انجام شد. برای این کار، میزان شوری آب ورودی و خروجی از مینی لایسیمتر، با هم برابر شد. با انتخاب رویه مذکور این اطمینان حاصل شد که کل خاک داخل مینی لایسیمتر به سطح شوری مورد نظر رسیده است. در سایر مراحل رشد (غیر از تیمارها) نیز از آب

شیرین چاه (۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر) برای آبیاری استفاده شد.

به‌منظور جلوگیری از تغییرات شوری خاک و شسته شدن املاح خاک توسط آبیاری با آب شیرین (در مراحلی که آب شور به کار برده نشده بود)، آبیاری در حد جبران کمبود رطوبت خاک انجام شد. برای این کار، میزان حجم آب آبیاری از طریق اندازه‌گیری رطوبت خاک (توسط دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دلتا تی (ΔT) مدل HH₂) و برای جبران کمبود آب خاک تا نقطه ظرفیت زراعی تعیین شد. به‌طوری که با در نظر گرفتن تخلیه مجاز مدیریتی ۴۰ درصد برای گیاه ذرت (سعیدی، ۱۴۰۰ a) محاسبه و به کار برده شد. علاوه بر تیمارهای مذکور، تیمار دیگری با کاربرد آب با کیفیت (شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر) در تمامی طول دوره رشد به‌منظور به دست آوردن عملکرد واقعی در شرایط بدون تنش و استفاده از آن در مدل‌های کاربردی، مورد استفاده قرار گرفت؛ بنابراین تیمار مذکور به‌عنوان شاهدی برای فرآیند مدل‌سازی عملکرد محصول بوده است؛ زیرا حد شوری ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر (تیمار S₁)، آستانه تحمل گیاه ذرت به شوری خاک (بر اساس گزارش فائو-۲۹) است. از این‌رو برای اطمینان از عدم کاربرد هیچ‌گونه تنش شوری خاک در شرایط بدون تنش، حد شوری آب آبیاری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر برای این شرایط در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که شوری عصاره اشباع خاک در مینی لایسیمترهای مذکور در پایان فصل رشد حدود یک دسی‌زیمنس بر متر و کم‌تر از سطح

شوری S_1 بود که کم‌تر از آستانه تنش شوری بود و نشان دهنده عدم تأثیر شوری حاصل از آبیاری با آب شیرین بر تیمارهای آزمایشی بوده است.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی منابع آب (شوری عصاره اشباع خاک پس از تعادل) مورد استفاده در پژوهش

تیمار شوری	هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	سدیم ($meq.L^{-1}$)	منیزیم ($meq.L^{-1}$)	کلسیم ($meq.L^{-1}$)	پتاسیم ($meq.L^{-1}$)	سولفات ($meq.L^{-1}$)	بی‌کربنات ($meq.L^{-1}$)	کربنات ($meq.L^{-1}$)	کلر ($meq.L^{-1}$)
سطح S_0	۰/۵	۲/۳۶	۰/۸۸	۱/۳۵	۰/۲	۱/۴۲	۱/۱۲	۰/۴۱	۱/۷۴
سطح S_1	۱/۷	۹/۴۶	۲/۶۶	۴	۰/۷	۵/۳۸	۳/۸	۰/۶۴	۶/۶
سطح S_2	۳	۱۴/۴	۶/۴۳	۹/۱۲	۰/۴	۹/۵۶	۸/۳۴	۱/۳۴	۱۲/۷۲
سطح S_3	۵	۲۴/۵۷	۸/۳۳	۱۴/۵۴	۰/۹۱	۱۶/۸۳	۱۱/۹۲	۳/۲۶	۱۸/۶۷
سطح S_4	۷	۳۵/۴۳	۱۳/۱۱	۱۹/۷۲	۱/۴۱	۲۲/۴۴	۱۵/۹	۵/۸۲	۲۷/۵۶

مدل‌های کاربردی

برای مدل‌سازی عملکرد ذرت در شرایط کاربرد تنش شوری در مراحل مختلف رشد، ابتدا ضرایب مربوط به معادلات (۱۳) الی (۱۶) در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد برآورد شد. به این صورت که با داشتن عملکرد واقعی محصول در تیمارهای مختلف یک مرحله‌ای رشد، پارامتر $\alpha(\pi)$ محاسبه شد. پارامتر α به‌عنوان ضریب عملکرد محصول و به مفهوم نسبت عملکرد محصول در شرایط اعمال تنش شوری به عملکرد محصول در شرایط بدون تنش (حد شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر) بود. با محاسبه ضریب عملکرد α برای تیمارهای مختلف، روابط (۱۳) الی (۱۶) برای شرایط واقعی پژوهش واسنجی شد. به این صورت که برای هر کدام از مراحل رشد و به‌طور جداگانه ضرایب مجهول a و P توسط نرم‌افزار SPSS و ضریب b برای شرایط واقعی، برآورد شد. متوسط مقادیر فشار اسمزی (در کل دوره رشد) برای حد آستانه (π^*) و ۵۰ درصد کاهش جذب آب (π_{50}) به ترتیب ۶۱۲- و ۲۱۲۴- سانتی‌متر برآورد شد. در برخی از پژوهش‌های گذشته (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۷؛ سرائی تبریزی و همکاران، ۱۳۹۴ و ...) برای ارزیابی توابع کاهش جذب آب، میزان فشار اسمزی (حد آستانه، ۵۰ درصد کاهش جذب و ماکسیمم) به‌صورت ثابت در کل دوره رشد در نظر گرفته شد و به حساسیت مراحل رشد گیاه توجهی نشد. البته در پژوهشی با سطوح مختلف شوری

بر روی ذرت، مدل‌های جذب آب به‌گونه‌ای دیگر ارزیابی شدند. در این تحقیق مقادیر جذب آب و عملکرد گیاه در دو فصل بهار و پاییز، به‌صورت تیمارهای جداگانه در نظر گرفته شد تا حساسیت مرحله رشد نیز بررسی شود (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸). در نتیجه با توجه به حساسیت متفاوت گیاه به تنش شوری در مراحل مختلف رشد، میزان فشار اسمزی برای π^* و π_{50} در هر مرحله رشد متفاوت خواهد بود. از این‌رو در پژوهش حاضر، بر اساس کاربرد چهار سطح تنش شوری، میزان فشار اسمزی حد آستانه تنش و ۵۰ درصد کاهش عملکرد برای تیمارهای یک مرحله‌ای رشد به‌صورت جداگانه برآورد شد. به‌طوری‌که در مراحل رشد گل‌دهی، شیری شدن دانه‌ها و شش‌برگی به‌ترتیب کم‌ترین تا بیش‌ترین فشار اسمزی برای محدوده‌های مدنظر $(\pi^*$ و $\pi_{50})$ ، شناسایی شد. در مورد پایه و اساس مدل‌های اشتقاقی در پژوهش حاضر نیز پیش‌تر اشاره شد که مدل‌های (۱۳) و (۱۴) با نام ون‌گنوختن، مدل (۱۵) با نام دیرکسن و همکاران و مدل (۱۶) با نام مدل خطی ماس-هافمن شناخته شده‌اند.

$$\alpha(\pi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a\pi}{\pi_{50}}\right)^p} \quad (13)$$

$$\alpha(\pi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi}{\pi_{50}}\right]^p} \quad (14)$$

$$\alpha(\pi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi}{\pi^* - \pi_{50}}\right]^p} \quad (15)$$

$$\alpha(\pi) = \left[1 - \frac{b}{360} (\pi^* - \pi)\right] \quad (16)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \left[1 - \frac{b_i}{360} (\pi^* - \pi_i) \right] \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi_j}{\pi_{50}} \right]^{p_j}} \quad (25)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \left[1 - \frac{b_i}{360} (\pi^* - \pi_i) \right] \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi_j}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_j}} \quad (26)$$

ارزیابی مدل‌ها

در این مرحله داده‌های ضریب عملکرد محصول (α) به صورت مشاهده‌ای (واقعی) در مقیاس مینی لایسیمتر و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها (مدل‌های ۱۷ الی ۲۶)، با یکدیگر مقایسه شد و اعتبار مدل‌های مختلف ارزیابی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا^۲ (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE)، ضریب تبیین^۴ (R^2)، کارایی مدل‌سازی^۵ (EF) و ضریب باقیمانده^۶ (CRM) استفاده شد. معادلات مربوط به آماره‌های مذکور در روابط (۲۷) الی (۳۱) ارائه شد. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره‌های RMSE، ME و CRM و مقدار نزدیک به یک برای آماره‌های R^2 و EF در هر مدل، نشان‌دهنده بهینه بودن آن مدل برای برآورد مقادیر α بوده است. در روابط (۲۷) الی (۳۱)، حروف n ، O^v و P^a به ترتیب بیانگر تعداد تیمارها، داده‌های مشاهده‌ای در مقیاس مینی لایسیمتر و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (27)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (28)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (29)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (30)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (31)$$

برای کاربرد مدل‌های (۱۳) الی (۱۶) در شرایط اعمال تیمارهای دو مرحله‌ای رشد، از مدل‌های (۵) الی (۱۱) الهام گرفته شد و مدل‌های (۱۳) الی (۱۶) به صورت مدل‌های اشتقاقی (۱۷) الی (۲۶) توسعه داده شد. مدل‌های مذکور شامل انواع مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر در برآورد اثر متقابل تنش شوری در دو مرحله مختلف رشد است. در این بخش از پژوهش با داشتن ضرایب مدل‌ها (برآورد شده در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد) اقدام به برآورد پارامتر $\alpha(\pi_i, \pi_j)$ برای دو مرحله رشد مدنظر i و j شد. سپس در مرحله صحت‌سنجی، کارایی مدل‌های توسعه داده شده در برآورد پارامتر α ، نسبت به شرایط واقعی کشت ارزیابی شد.

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a_i \pi_i + a_j \pi_j}{\pi_{50}} \right)^p} \quad (17)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi_i}{\pi_{50}} \right]^{p_i}} \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi_j}{\pi_{50}} \right]^{p_j}} \quad (18)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi_i}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_i}} \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi_j}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_j}} \quad (19)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \left[1 - \frac{b_i}{360} (\pi^* - \pi_i) \right] \times \left[1 - \frac{b_j}{360} (\pi^* - \pi_j) \right] \quad (20)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi_i}{\pi_{50}} \right]^{p_i}} \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi_j}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_j}} \quad (21)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi_i}{\pi_{50}} \right]^{p_i}} \times \left[1 - \frac{b_j}{360} (\pi^* - \pi_j) \right] \quad (22)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi_i}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_i}} \times \left[1 - \frac{b_j}{360} (\pi^* - \pi_j) \right] \quad (23)$$

$$\alpha(\pi_i, \pi_j) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi^* - \pi_i}{\pi^* - \pi_{50}} \right]^{p_i}} \times \frac{1}{1 + \left[\frac{\pi_j}{\pi_{50}} \right]^{p_j}} \quad (24)$$

6 - Coefficient of residual mass, CRM

7 - Observed, O

8 - Predicted, P

2- Maximum error, ME

3 - Root of mean squared error, RMSE

4 - Coefficient of determination, R^2

5 - Efficiency of modeling, EF

اندازه‌گیری عملکرد

به‌منظور اندازه‌گیری وزن زیست‌توده خشک ذرت، بوته‌ها در هر مینی‌لایسمتر از سطح خاک بریده شد و برای خشک شدن به آزمایشگاه انتقال داده شد. در آزمایشگاه بوته‌ها به مدت ۴۸ ساعت در داخل گرم‌خانه قرار داده شد و در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل خشک شد. سپس وزن کل زیست‌توده خشک گیاهی، توسط ترازوی دقیق اندازه‌گیری شد و به‌عنوان عملکرد محصول ذرت مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد محصول

تجزیه واریانس داده‌های عملکرد زیست‌توده خشک محصول در جدول (۳) نشان داد که اثر هر کدام از

جدول ۳- تجزیه واریانس صفت مورد بررسی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات عملکرد ماده خشک محصول
تکرار	۲	۲۲۴ ^{ns}
مرحله رشد	۵	۷۰۳۶ ^{**}
تنش شوری خاک	۳	۱۳۱۱۵ ^{**}
تنش شوری خاک × مرحله رشد	۱۵	۴۳۶ [*]
خطا	۴۶	۱۴
ضریب تغییرات (%)		۱۷

ns، * و **: به ترتیب نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

تیمارهای مراحل رشد و تنش شوری بر عملکرد محصول، در سطح یک درصد و بر همکنش آن‌ها در سطح پنج درصد معنی‌دار است. نتایج حاصل به‌مفهوم حساسیت متفاوت مراحل رشد ذرت به اثر اعمال متقاطع (ناپیوسته) تنش شوری است. در پژوهشی مشابه، تنش آبی به‌صورت جداگانه در مراحل رشد چهار برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بر گیاه ذرت اعمال شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین تا کم‌ترین مقدار عملکرد محصول، به‌ترتیب مربوط به تیمارهای چهار برگی، خمیری شدن، ۱۲ برگی و گل‌دهی بوده و علت آن، میزان حساسیت و نیاز متفاوت گیاه ذرت به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد است (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰).

و C₃) به‌میزان ۵، ۷/۸ و ۶/۷ درصد کاهش یافت (شکل ۲). نتایج مذکور نشان داد که یک مقدار ثابت از تنش شوری، بسته به این‌که در چه مرحله‌ای از رشد بر گیاه ذرت اعمال شود، اثر متفاوتی بر عملکرد محصول می‌گذارد. به‌عنوان نمونه مرحله‌گل‌دهی حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به اعمال مقطعی تنش شوری شناخته شد؛ زیرا اعمال یک‌باره تنش شوری در زمان گل‌دهی ذرت، باعث اختلال در عمل کرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی برای تولید بلال و دانه ذرت بود. در پژوهشی مشابه در منطقه شاهرود، تنش آبی در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت اعمال شد و میزان کاهش عملکرد بیولوژیکی در این شرایط، به‌ترتیب ۳۲/۸۲، ۳۸/۰۹ و ۱۸/۴۹ درصد گزارش شد.

مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری و مرحله رشد بر روی عملکرد گیاه ذرت در شکل (۱) نشان داد که در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد، بیش‌ترین تا کم‌ترین اثر تنش شوری بر کاهش عملکرد محصول، مربوط به مراحل رشد گل‌دهی (C₂)، شیری شدن دانه‌ها (C₃) و شش برگی (C₁) است. بر اساس نتایج، میزان ماده خشک تولیدی در تیمار شاهد (S₁) برابر با ۱۵۷/۲ گرم در هر بوته بود و کاربرد بالاترین سطح تنش شوری (S₄) در هریک از مراحل رشد C₁، C₂ و C₃، مقادیر عملکرد را به‌ترتیب تا ۱۱۵/۹، ۵۳/۲ و ۷۷/۷ گرم بر بوته کاهش داد. در این شرایط به‌ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک (از شوری S₁ تا S₄)، عملکرد محصول (مربوط به تیمارهای C₁، C₂

عملکرد ماده خشک از ۱۵۷/۲ گرم در تیمار S₁ به ۸۶/۱ و ۹۷ و ۴۶/۵ گرم بر بوته در تیمارهای C₁C₂، C₁C₃ و C₂C₃ رسید. به طوری که به ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک (از شوری S₁ تا S₄)، عملکرد محصول در تیمارهای C₁C₂، C₁C₃ و C₂C₃، به میزان ۶/۵۵، ۶/۰۷ و ۸/۳۲ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (شکل ۲). از مقایسه شیب کاهش عملکرد در تیمارهای یک مرحله‌ای C₂ و C₃ و دو مرحله‌ای C₁C₂ و C₁C₃ در شکل (۲) این‌طور اثبات شد که یک‌بار اعمال تنش شوری در مرحله شش برگی (C₁) باعث سازگار شدن گیاه با تنش، در مواجهه با تنش‌های آتی شده است. به طوری که اگر گیاه در مراحل اولیه رشد با تنش شوری روبه‌رو شود می‌تواند تنش‌های بعدی را بهتر تحمل کند؛ اما اگر گیاه به یک‌باره در مرحله حساس رشد با تنش شوری روبه‌رو شود، توان تحمل تنش برای آن کمتر خواهد بود. در تطابق با پژوهش حاضر، نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده است که اگر گیاه ذرت در ابتدای دوره رشد خود با تنش‌هایی مانند شوری یا خشکی مواجه شود، می‌تواند نسبت به پذیرش تنش در دوره‌های بعدی رشد، سازگاری فیزیولوژیکی پیدا کند (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۸). از سوی دیگر اگر گیاه ذرت به‌طور ناگهانی در هر دو مرحله حساس گل‌دهی و شیرینی شدن دانه‌ها (تیمار C₂C₃) با آب لب‌شور آبیاری شود، بی‌تردید کاهش عملکرد محصول بیش از شرایط اعمال تنش‌های یک‌مرحله‌ای رشد (تیمارهای C₂ و C₃) خواهد بود.

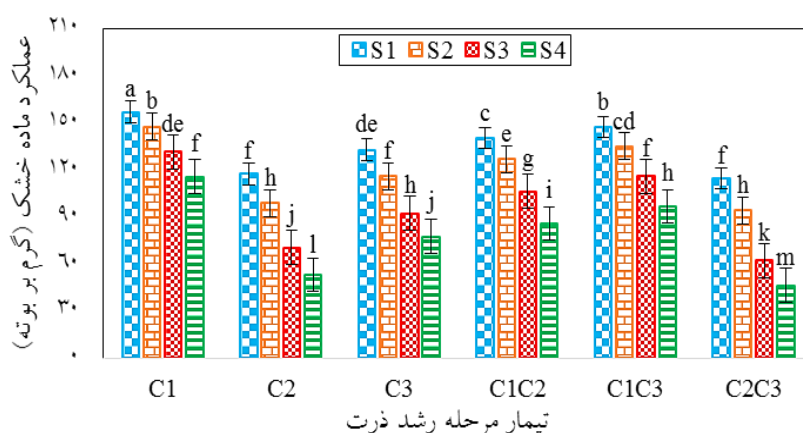
میزان شور شدن خاک منطقه توسعه ریشه گیاه، می‌تواند به میزان املاح موجود در آب آبیاری وابسته باشد. به طوری که استفاده از آب‌های لب‌شور برای آبیاری گیاهان، باعث تجمع املاح در خاک و شور شدن خاک می‌شود. در جمع‌بندی این بخش از نتایج پژوهش حاضر می‌توان گفت که اگر ذرت یک‌بار در مرحله اولیه رشد با آب لب‌شور (در سطح شوری تیمارهای پژوهش) آبیاری شود، ظرفیت آن وجود دارد که بار دیگر در مراحل حساس رشد (مانند گل‌دهی) از آب لب‌شور برای آبیاری آن استفاده شود. در

در نتیجه اعمال تنش آبی در مرحله گل‌دهی بیشترین اثر را بر کاهش مقدار عملکرد بیولوژیک ذرت داشت (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶). در تحقیقی گیاه ذرت به صورت گلخانه در گلخانه دانشگاه تهران کشت شد و اثر برهم‌کنش تنش شوری در دو فصل بهار و پاییز بر روی آن بررسی شد. تیمارهای شوری آب آبیاری شامل سطوح ۱/۷، ۳/۳۶، ۶/۳۳ و ۸/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. اعمال تنش شوری تا سطح ۸/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر در فصل بهار (مراحل اول رشد) باعث شد که مقدار عملکرد محصول از ۱۵۳/۸ به ۷۱/۳ گرم برسد. در حالی که همین میزان تنش شوری در فصل پاییز (مراحل پایانی رشد) موجب شد که عملکرد محصول به میزان ۵۵/۳ گرم برسد. همچنین شیب کاهش عملکرد محصول ذرت تحت اثر تنش شوری و در فصول پاییز و بهار، به ترتیب ۷/۴ و ۶/۵ درصد گزارش شد که به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بود. نتایج حاصل نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ذرت به تنش شوری در مراحل میانی رشد بوده است (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین به نظر می‌رسد که در شرایط اعمال تنش شوری، پتانسیل آب خاک کاهش یافته و این امر باعث کاهش جذب آب و در نتیجه کاهش تعرق توسط گیاه ذرت می‌گردد. از سوی دیگر، وجود عناصری مانند سدیم و کلر در آب‌شور، اثری سمی بر روی گیاه داشته و موجب کاهش فرآیندهای گرده‌افشانی، باروری، تولید زیست‌توده و عملکرد محصول ذرت می‌گردد (سعیدی، ۱۴۰۱).

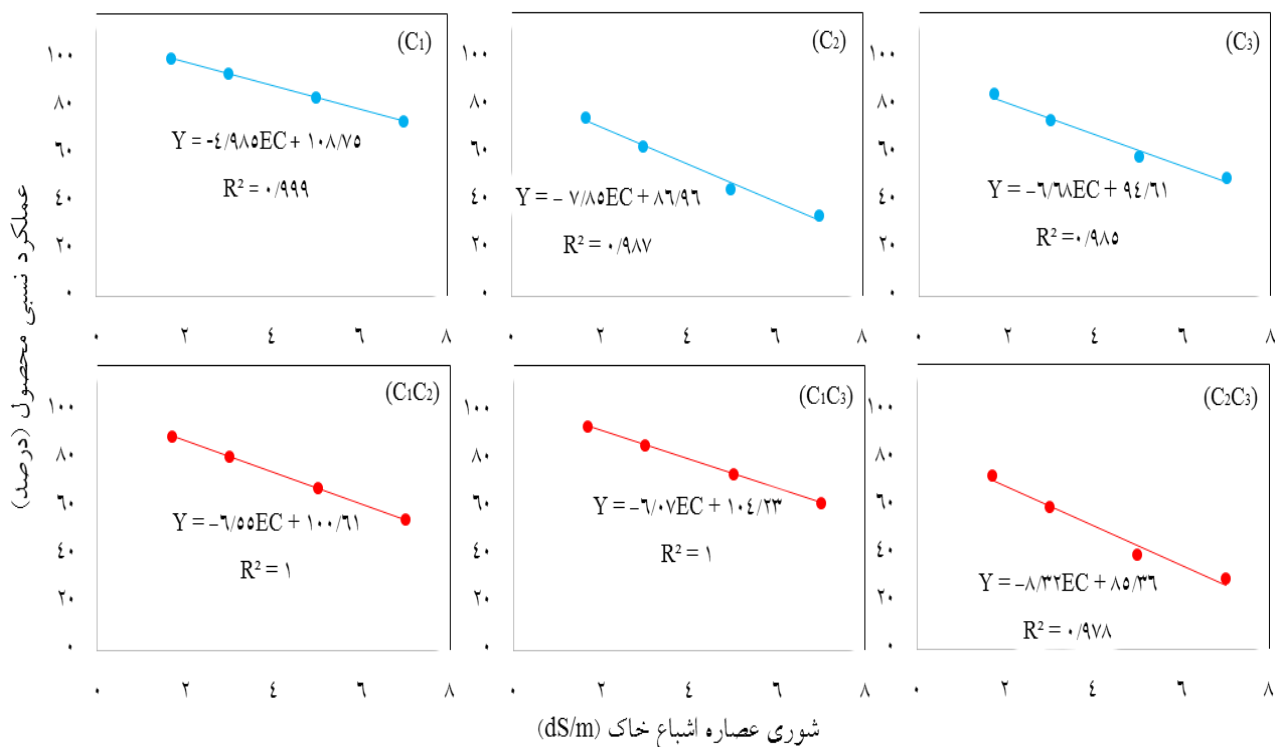
اما آنچه که در پژوهش حاضر به‌عنوان شاخصی برای نوآوری مطرح شد، پرداختن به اثر متقابل تنش شوری در دو مرحله متفاوت رشد گیاه بوده است. به این صورت که برای دو حالت اعمال تنش یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای رشد، میزان کاهش عملکرد محصول مقایسه شد. در حالت اول، تنش شوری یک‌بار و به‌طور ناگهانی در مرحله حساس رشد گیاه ذرت اعمال شد؛ اما در حالت دوم، گیاه ذرت یک‌بار در مراحل اولیه رشد و بار دیگر در مراحل حساس رشد با تنش شوری مواجه شد. نتایج پژوهش در شکل (۱) نشان داد که تحت اثر تنش شوری تا سطح S₄، میزان

روش اختلاط آب‌ها فراهم شد. در این شرایط آب‌شور همراه با آب غیرشور برای کشت ذرت استفاده شد، بدون آن‌که کاهش چندانی در عملکرد محصول ایجاد شود (مولوی و همکاران، ۱۳۹۱). نتیجه کلی این‌که دستاورد پژوهش حاضر می‌تواند در نحوه مدیریت و مصرف آب‌های نامتعارف لب‌شور برای آبیاری مزارع کاربرد داشته باشد. به این صورت که به جای اختلاط آب‌های شور و شیرین، بهتر است که آن‌ها در قالب دوره‌های تناوبی مناسب، در آبیاری مزارع استفاده شوند.

شرایط کاربرد دو مرحله‌ای تنش، اثر منفی تنش شوری بر عملکرد محصول، به اندازه یک‌بار اعمال تنش شوری در مرحله حساس رشد نخواهد بود. در این باره در تحقیقی در منطقه کرج، اثر مدیریت آب شور بر عملکرد ذرت دانه‌ای و در شرایط لایسیمتری بررسی شد. تیمارها شامل آبیاری گیاه با مخلوط آب غیرشور (۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر) و شور (پنج دسی‌زیمنس بر متر) و آبیاری تناوبی با آب غیرشور و شور بود. در این پژوهش از شش آبیاری صورت گرفته سه آبیاری در تناوب با آب‌شور انجام شد و نتایج نشان داد که شرایط مساعدتری برای رشد گیاه نسبت به



شکل ۱- مقایسه اثر متقابل تنش شوری و مرحله رشد بر مقادیر عملکرد محصول



شکل ۲- روند کاهش عملکرد محصول در تیمارهای مرحله رشد، در اثر اعمال تنش شوری

مدل‌سازی عملکرد و ارزیابی مدل‌ها

در این پژوهش ابتدا ضرایب و پارامترهای مدل‌های (۱۳) الی (۱۶)، برای مقادیر واقعی عملکرد محصول و در شرایط اعمال یک مرحله‌ای تنش شوری، برآورد شد (جدول ۴). سپس با استفاده از آن‌ها، مدل‌های (۱۷) الی (۲۶) تولید و آماده بهره‌برداری شد. در گام بعدی، از طریق مدل‌های (۱۷) الی (۲۶) مقادیر عملکرد محصول در شرایط اعمال دو مرحله‌ای تنش شوری شبیه‌سازی شد. برای صحت‌سنجی کارایی مدل‌ها و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی عملکرد محصول، از آماره‌های ارزیابی (روابط ۲۷ الی ۳۱) استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان داد که از نظر آماره‌های R^2 و EF ، به‌ترتیب مدل‌های ضرب‌پذیر ۲۰ و جمع‌پذیر ۱۷ دارای بیش‌ترین همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی عملکرد بوده است. آماره ME نشان داد که مدل ۱۷ کم‌ترین خطا را در برآورد مقدار ضریب عملکرد داشته است. آماره $RMSE$ نیز بیانگر این مطلب بود که مدل ۲۳ کم‌ترین ریشه میانگین مربعات خطا را در بین مدل‌ها داشته است. از این رو از طریق تجمیع اولویت‌هایی که آماره‌های ارزیابی به مدل‌ها داده بودند، به‌ترتیب مدل‌های ۱۷ و ۲۳ به‌عنوان مدل‌های بهینه در شبیه‌سازی مقدار ضریب عملکرد محصول (α) انتخاب شدند. از نظر آماره CRM ، مدل ۱۷ یک مدل کم‌برآورد و مدل ۲۳ یک مدل بیش‌برآورد بوده است. در نتیجه مدل جمع‌پذیر و ن‌گن‌وختن (مدل ۱۷) و مدل ضرب‌پذیر دیرکسن و ماس-هافمن (مدل ۲۳)، در حد قابل قبولی توانست که اثر برهم‌کنش تنش شوری را در دو مرحله متفاوت رشد ذرت نشان دهد. در پژوهشی بر روی گیاه فلفل که به‌صورت کشت گلدانی انجام شد، اثر تنش شوری شامل سه سطح ۲/۵، ۴/۵ و ۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر

و تنش آبی به‌صورت سه سطح تخلیه رطوبتی ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد ظرفیت زراعی خاک بررسی شد. در این تحقیق پنج تابع کاهش جذب آب شامل مدل‌های ون‌گن‌وختن (جمع‌پذیر) و ضرب‌پذیر دیرکسن، آگوستین، وان‌دام و همکاران و همایی و همکاران، ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که در سطح شوری کم، واکنش گیاه به تنش‌های هم‌زمان شوری و خشکی بیشتر به‌صورت جمع‌پذیر و در سطوح زیاد شوری، به‌طور ضرب‌پذیر بوده است. متوسط آماره ME بین ۰/۰۹-۰/۱۵ و $RMSE$ بین ۳-۹ درصد برآورد شد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهشی پاسخ گیاه ذرت به سطوح شوری آب آبیاری شامل ۰/۶، ۲ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر بررسی شد. در این پژوهش عملکرد گیاه با استفاده از توابع کاهش جذب آب، شبیه‌سازی شد. نتایج اعتبارسنجی توابع نشان داد که مدل همایی و فوس (۱۹۹۹) برآورد بهتری از عملکرد گیاه، نسبت به سایر توابع داشت (عزیزیان و همکاران، ۲۰۱۵). در تحقیق دیگر بر روی ذرت، مدل‌های جذب آب و عملکرد محصول برای دو فصل بهار و پاییز ارزیابی شدند. نتایج ارزیابی توابع کاهش جذب آب نشان داد که برای شبیه‌سازی مقدار عملکرد محصول، مدل نمایی ون‌گن‌وختن از دقت بالاتری نسبت به مدل خطی ماس-هافمن برخوردار بود (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸). از این‌رو نتایج پژوهش اخیر در انتخاب مدل بهینه، به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بود. به‌طورکلی دستاورد کاربردی این بود که قابلیت استفاده از مدل‌های اشتقاقی برای شبیه‌سازی عملکرد نسبی محصول ذرت در شرایط پژوهش حاضر، نشان داده شد. در نتیجه اگر گیاه ذرت یک مرتبه در مراحل اولیه رشد و بار دیگر در مراحل حساس رشد خود با تنش شوری مواجه شود، این امکان برای شبیه‌سازی و تخمین عملکرد گیاه وجود خواهد داشت.

جدول ۴- پارامترهای مدل‌های (۱۳) الی (۱۶)، برای شرایط اعمال تنش شوری در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد

شماره مدل	a			P			b		
	مرحله رشد C ₁	مرحله رشد C ₂	مرحله رشد C ₃	مرحله رشد C ₁	مرحله رشد C ₂	مرحله رشد C ₃	مرحله رشد C ₂	مرحله رشد C ₃	مرحله رشد C ₃
۱۳	۰/۵۲۳	۱/۴۷	۰/۹۶۳	۲/۱۱۴	۱/۴۷۴	۱/۴۱۶	-	-	-
۱۴	-	-	-	۲/۸۸۴	۰/۹۱۲	۱/۴۷۱	-	-	-
۱۵	-	-	-	۱/۷۹۹	۰/۵۵	۰/۹۳۵	-	-	-
۱۶	-	-	-	-	-	-	۰/۰۷۶	۰/۰۹	۰/۰۵

جدول ۵- مقدار پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار مدل‌ها، به منظور تخمین عملکرد واقعی محصول

شماره مدل	CRM	EF	R ²	RMSE	ME
۱۷	۰/۲۷۳ ^(۴) *	۰/۸۰۱ ^(۲)	۰/۸۳۹ ^(۳)	۰/۲۰۵ ^(۴)	۰/۳۱۸ ^(۱)
۱۸	-۲/۷۴ ^(۱۰)	۰/۵۳۴ ^(۶)	۰/۵۷۸ ^(۶)	۲/۳۳ ^(۱۰)	۴/۳۲ ^(۱۰)
۱۹	۰/۱۷۳ ^(۳)	۰/۵۹۴ ^(۵)	۰/۶۳۱ ^(۵)	۰/۲۰۷ ^(۵)	۰/۳۵۲ ^(۳)
۲۰	-۰/۸۸۶ ^(۷)	۰/۸۲۳ ^(۱)	۰/۸۵۶ ^(۱)	۰/۷۳۱ ^(۷)	۱/۴۹ ^(۷)
۲۱	-۰/۴۲۹ ^(۵)	۰/۰۳۲ ^(۱۰)	۰/۰۴۶ ^(۱۰)	۰/۳۶۷ ^(۶)	۰/۶۱۵ ^(۶)
۲۲	-۱/۶۶۵ ^(۹)	۰/۵۲۶ ^(۷)	۰/۵۷ ^(۷)	۱/۴۲۶ ^(۹)	۲/۶۷۸ ^(۹)
۲۳	-۰/۱۶۹ ^(۲)	۰/۶۸۷ ^(۴)	۰/۷۰۳ ^(۴)	۰/۱۵۵ ^(۱)	۰/۳۶۷ ^(۳)
۲۴	-۰/۵۱۱ ^(۶)	۰/۴۲۴ ^(۸)	۰/۴۴۱ ^(۸)	۰/۱۸۲ ^(۳)	۰/۳۶۷ ^(۴)
۲۵	-۱/۵۸ ^(۸)	۰/۷۷۵ ^(۳)	۰/۸۰۶ ^(۳)	۱/۲۶۷ ^(۸)	۲/۵۴۲ ^(۸)
۲۶	-۰/۱۱۳ ^(۱)	۰/۳۱۸ ^(۹)	۰/۳۴۳ ^(۹)	۰/۱۶۲ ^(۳)	۰/۳۶۸ ^(۵)

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس آماره‌های ارزیابی است

نتیجه‌گیری

سابقه اعمال تنش شوری در مراحل اولیه رشد ذرت و قابلیت سازگاری گیاه به تنش در مراحل آتی رشد، موضوعی بود که در پژوهش حاضر بررسی شد. میزان تنش شوری خاک و مرحله رشد گیاه (از لحاظ اعمال تنش)، از عوامل مؤثر و معنی‌دار (در سطح یک درصد) بر میزان کاهش عملکرد محصول بود. به طوری که حساسیت متفاوت مراحل رشد ذرت را به اعمال متقاطع (پالسی) تنش شوری نشان داد. از نظر حساسیت مرحله رشد، بیش‌ترین تا کم‌ترین اثر تنش شوری بر کاهش عملکرد محصول، مربوط به مراحل رشد گل‌دهی (C₂)، شیری شدن دانه‌ها (C₃) و شش برگی (C₁) بود. تنش شوری باعث اختلال در عمل کرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی برای تولید بلال و دانه ذرت بود. از این‌رو مرحله گل‌دهی، حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به اعمال مقطعی تنش شوری بود.

در پژوهش حاضر، اثر متقابل تنش شوری در دو مرحله متفاوت رشد گیاه ذرت نیز بررسی شد. به این صورت که گیاه ذرت یک‌بار در مراحل اولیه رشد و بار

دیگر در مراحل حساس رشد با تنش شوری مواجه شد. ترکیب دو مرحله متفاوت رشد شامل تیمارهای C₁C₂، C₁C₃ و C₂C₃ بود. با اعمال تنش شوری از سطح S₁ تا S₄، شیب کاهش عملکرد محصول به‌زای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک، در مراحل رشد C₁، C₂ و C₃ به ترتیب ۵، ۷/۸ و ۶/۷ درصد برآورد شد؛ اما شیب مذکور در تیمارهای C₁C₂، C₁C₃ و C₂C₃ به ترتیب ۶/۵۵، ۶/۰۷ و ۸/۳۲ درصد محاسبه شد. نتایج نشان داد که یک‌بار اعمال تنش شوری (از سطح S₁ تا S₄) در مرحله ابتدایی رشد، باعث سازگاری گیاه در مواجهه با تنش‌های آتی شده است؛ اما اعمال پیوسته تنش شوری در مراحل حساس رشد (مانند تیمار C₂C₃) موجب کاهش عملکرد محصول بیش از شرایط اعمال تنش‌های یک‌مرحله‌ای رشد (تیمارهای C₂ و C₃) شده است. برای مدل‌سازی مقدار عملکرد محصول ذرت در شرایط پژوهش حاضر از مدل‌های اشتقاقی شامل مدل‌های ون‌گونختن (جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر)، دیرکسن و همکاران و مدل خطی ماس-هافمن استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل جمع‌پذیر ون‌گونختن (مدل ۱۷) و مدل

برسد، گرفته شده است. این نوع شیوه مدیریت آب‌های لب‌شور در تناوب با آب باکیفیت، باعث می‌شود که عملکرد محصول بهتر از شرایط مصرف یک‌مرحله‌ای آب لب‌شور (در مراحل حساس رشد گیاه) باشد. نکته دوم این که از طریق مدل‌های پیشنهادی، امکان شبیه‌سازی میزان عملکرد محصول در شرایط برهم‌کنش دو مرحله‌ای تنش شوری فراهم شد. در پایان توصیه می‌شود که نتایج به دست آمده در پژوهش، یک‌بار برای شرایط کشت مزرعه‌ای صحت‌سنجی گردد.

ضرب‌پذیر دیرکسن و ماس-هافمن (مدل ۲۳)، این قابلیت را داشتند که اثر برهم‌کنش تنش شوری را در دو مرحله متفاوت رشد ذرت شبیه‌سازی کنند.

به‌طورکلی در پژوهش حاضر دو نکته نتیجه‌گیری شد. اول این که اگر گیاه ذرت یک‌بار در مرحله شش برگه با آب لب‌شور (در سطح تیمارهای پژوهش) آبیاری شود، ظرفیت آن وجود دارد که بار دیگر در مراحل حساس رشد (مانند گل‌دهی) از آب لب‌شور برای آبیاری آن استفاده شود. البته نتیجه مذکور برای بحرانی‌ترین حالت که شوری عصاره اشباع خاک به‌طور کامل با شوری آب آبیاری به تعادل

فهرست منابع

۱. اکبری نودهی، د. ۱۳۹۶. تأثیر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲): ۳۰۵-۳۰۸.
۲. بابازاده، ح. علیزاده، ح. ع. و م. سرائی تبریزی. ۱۳۹۵. توسعه مدل مفهومی تعدیل شده پاسخ گیاهان به تنش توأمان خشکی و شوری (مطالعه موردی: ریحان). مجله تحقیقات آب‌و‌خاک ایران. ۴۷(۲): ۲۸۱-۲۹۲.
۳. بذرافشان، ا. شرفا، م. محمدی، م. ح. ع. ا. ذوالفقاری. ۱۳۹۸. پاسخ ذرت به تنش شوری با استفاده از مدل‌های جذب آب در فصول مختلف. مجله تحقیقات آب‌و‌خاک ایران. ۵۰(۹): ۲۱۷۱-۲۱۸۲.
۴. حسینی، ی. رضوانی مقدم، ج. نیک پور، م. ر. و ع. عبدلی. ۱۳۹۷. ارزیابی توابع جذب آب در شرایط تنش هم‌زمان خشکی و شوری در گیاه گوجه‌فرنگی مینیاتوری. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲(۲): ۲۴۸-۲۶۶.
۵. حسینی، ی. بابازاده، ح. و ب. خاکپور عربلو. ۱۳۹۴. ارزیابی توابع کاهش جذب آب گیاه فلفل در شرایط تنش هم‌زمان خشک و شوری. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۴): ۵۰۹-۵۲۳.
۶. حیدری‌نیا، م. ناصری، ع. برومندنسب، س. و م. الباجی. ۱۳۹۶. تأثیر آبیاری با آب شور بر تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب ذرت در مدیریت‌های مختلف زراعی. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۱/۱): ۹۹-۱۱۰.
۷. دهقانی، ا. کاظمینی، س. ع. زارعی، م. و م. علی‌نیا. ۱۳۹۶. تأثیر تنش شوری و قارچ میکوریزا بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه ذرت شیرین. نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۷(۱): ۱۰۱-۱۱۳.
۸. دهقانی سانج، ح. کنعانی، ا. و س. اخوان. ۱۳۹۶. ارزیابی تبخیر-تعرق ذرت و اجزای آن و ارتباط آن‌ها با شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. مجله آب‌و‌خاک. ۳۱(۶): ۱۵۴۹-۱۵۶۰.
۹. سرائی تبریزی، م. همایی، م. بابازاده، ح. کاوه، ف. و م. پارسى نژاد. ۱۳۹۴. مدل‌سازی پاسخ ریحان به تنش‌های توأمان شوری و کمبود نیتروژن. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۹(۷۳): ۴۵-۵۷.
۱۰. سعیدی، ر. ۱۴۰۱. تعیین ضریب تنش شوری در مراحل مختلف رشد ذرت علوفه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۶(۱): ۷۵-۹۲.
۱۱. سعیدی، ر. a ۱۴۰۰. اثر تنش خشکی و شوری در برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر-تعرق دوره‌ای، با استفاده از مدل‌های مختلف. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۵(۲): ۱۰۷-۱۲۲.

۱۲. سعیدی، ر. b ۱۴۰۰. جداسازی تبخیر و تعرق در کشت ذرت و بررسی پاسخ آن‌ها به سطوح مختلف آبیاری. مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران. ۵۲(۵): ۱۲۶۳-۱۲۷۳.
۱۳. سعیدی، ر. و ع. ستوده‌نیا. ۱۴۰۰. واکنش عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت، تحت تأثیر تنش آبی در مراحل مختلف رشد (در دشت قزوین). مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران. ۵۲(۳): ۶۱۱-۶۲۰.
۱۴. سعیدی، ر. سلطانی، م. لیاقت، ع. و ع. ستوده‌نیا. ۱۳۹۸. تأثیر شوری بر عملکرد ذرت در مراحل مختلف رشد. مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران. ۵۰(۸): ۱۹۷۵-۱۹۸۳.
۱۵. محمدی بهمدی، م. و م. آرمین. ۱۳۹۶. اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف ذرت در شرایط کشت تأخیری. مجله تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی. ۴(۱): ۱۷-۳۴.
۱۶. مولوی، ح. محمدی، م. و ع. لیاقت. ۱۳۹۱. اثر مدیریت آب شور طی دوره رشد بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای و پروفیل شوری خاک. مجله علوم مهندسی و آبیاری. ۳۵(۳): ۱۱-۱۸.
۱۷. همتی، ر. مقصودی، ک. و ی. امام. ۱۳۹۳. پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیک ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در منطقه نیمه‌خشک شمال فارس. مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۴(۱۱): ۶۷-۷۴.
18. Allen, R. G. Pereira, L. S. Raes, D. and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper No.56, 1-326.
19. Ayers, R. S. and D. W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper No.29, Page 31.
20. Azizian, A. Sepaskhah, A. R. and Sh. Zand-Parsa. 2015. Modification of a maize simulation model under different water, nitrogen and salinity levels. International journal of plant production. 9(4): 609-632.
21. Dirksen, C. and D. C. Augustijn. 1988. Root water uptake function for nonuniform pressure and osmotic potentials. Agriculture. Abstracts, pp. 188
22. Dirksen, C. Kool, J. B. Koorevaar, P. and M. Th. Van Genuchten. 1993. HYSWASOR-Simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: D. Russo and G. Dagan (Eds). Water Flow and Solute Transport in Soils. Springer Verlag, pp. 99-122.
23. Feng, G. Zhang, Z. Wan, C. Lu, P. and A. Bakour. 2017. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system. Journal of agricultural water management. 193: 205-213.
24. Homaei, M. Feddes, R. A. and C. Dirksen. 2002. Simulation of root water uptake. III. Non-uniform transient combined salinity and water stress. Journal of Agriculture and water management. 57: 127-144.
25. Homaei, M. and R. A. Feddes. 1999. Water uptake under nonuniform transient salinity and water stress. In: J. Feyen and K. Wiyo (Eds.), Modeling of transport processes in soil at various scales in time and space. 416-427
26. Lacerda, C. F. Ferreira, J. F. S. Liu, X. and D. L. Suarez. 2016. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. Journal of agronomy and crop science. 202: 192-202.
27. Nielsen, R. L. 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. Journal of Agronomy (Purdue). 196: 19-25.
28. Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. Department of Agriculture. Agricultural Handbook, No 60.
29. Saeidi, R. Sotoodenia, A. and H. Ramezani Etedali. 2022. Modelling the relationships between the yield and evapotranspiration of maize under salinity stress and nitrogen deficiency. Journal of irrigation and drainage. 2022: 1-15.

30. Saeidi, R. Ramezani Etedali, H. Sotoodena, A. Kaviani, A. and B. Nazari. 2021. Salinity and fertility stresses modifies K_s and readily available water coefficients in maize (Case study: Qazvin region). *Journal of irrigation science*. 39: 299- 313.
31. Skaggs, T. H. Shouse, P. J. and J. A. Poss. 2006. Irrigating forage crops with saline waters: 2. Modeling root uptake and drainage. *Vadose Zone J.* 5: 824–837
32. 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 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in soil- water- atmosphere- plant enviroment. Rep. No. 71. Department of water resource, Wageningen. Agricultural University. Wageningen, the Netherland.
33. Van Genuchten, M. Th. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report. US Salinity Laboratory, Riverside, CA.

Use of Water Uptake Functions for Maize Yield Simulation under the Conditions of Interaction of Soil Salinity Stress and Growth Stages

R. Saeidi¹ and A.M. Liaghat

Ph.D. Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. saeidi@org.ikiu.ac.ir
Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. aliaghat@ut.ac.ir

Received: January 2023 and Accepted: February 2023

Abstract

This research aimed to simulate the yield of maize *cv. S. C 704* under conditions of separate application of salinity stress at different growth stages in mini-lysimeter, in Qazvin area, Iran. The experiment was performed as factorial and in a completely randomized design. Soil salinity treatments, as the main factor, included four levels of 1.7(S₁), 3(S₂), 5(S₃) and 7(S₄) dS.m⁻¹. The sub-factors included different growth stages as follows: one-stage at 6-leaves (C₁), flowering (C₂), and milk stage (C₃); and two-stages of C₁C₂, C₁C₃ and C₂C₃. By combining saline water (from a salt marsh) with a well fresh water (0.5 dS.m⁻¹), saline water was prepared according to the treatments. Irrigation was done in a way that the salinity of input and output water from the mini-lysimeters was equal. The control treatment was irrigated with fresh water. By combining the water uptake reduction functions, the derived models were presented and evaluated for simulating yield reduction coefficient (α). The stress application data in one and two-growth stages were used for models calibration and validation, respectively. Applying the highest salinity level led to decrease in dry matter yield from 157.2 g. plant⁻¹ (in S₁ treatment) to 115.9, 53.2, 77.7, 86.1, 97 and 46.5 g. plant⁻¹ in the C₁, C₂, C₃, C₁C₂, C₁C₃ and C₂C₃ treatments, respectively. The results showed that crop sensitivity was different in one-stage and two-stage stress application. Salinity stress at flowering (C₂) and milk stage (C₃) had a more negative effect relative to C₁C₂ and C₁C₃. In this research, Van Genuchten's additive model and Dirksen-Maas-Hoffman's multipliable model could be recommended as the optimal models for crop yield simulation. Also, application of two-stage salinity stress (up to level of 7 dS.m⁻¹) in C₁C₂ and C₁C₃, had higher yield relative to application of one-stage stress in C₂ and C₃ growth stages.

Keywords: Sensitivity to salinity, Van Genuchten's model, Dirksen-Maas-Hoffman's model, Stress coefficient

¹ - Corresponding author: saeidi@org.ikiu.ac.ir