نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۷، مهر - آبان ۱۴۰۲، ص. ۷۵۷-۷۴۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 17, Oct.-Nov. 2023, p. 743-757

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل AquaCrop برای شرایط اثر متقابل تنش شوری در مراحل مختلف رشد ذرت (در منطقه قزوین)

رضا سعیدی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۴

چکیده

آگاهی از پاسخ گیاهان به شیوه‌های کاربرد تنش شوری در مراحل رشد، می‌تواند باعث مدیریت بهتر تنش‌ها بشود. این پژوهش در سال ۱۴۰۰ بر روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، در فضای مینی‌لایسیمتر و در منطقه قزوین انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تیمارهای شوری عصاره اشباع خاک (فاکتور اصلی) در چهار سطح (S_1) ۱/۷، (S_2) ۳، (S_3) ۵ و (S_4) ۷ دسی‌زیمنس بر متر به کار برده شدند. تیمارهای مرحله رشد گیاه (فاکتور فرعی) به‌صورت یک مرحله‌ای در مراحل (C_1) ۶برگی، (C_2) گل‌دهی، (C_3) شیری شدن دانه‌ها و دو مرحله‌ای شامل C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3 تعریف شدند. هدف از پژوهش، شبیه‌سازی عملکرد ذرت با مدل AquaCrop، در شرایط اعمال ناپیوسته تنش شوری در مراحل رشد گیاه بود. برای این منظور، از داده‌های تیمارهای یک مرحله‌ای رشد برای واسنجی مدل AquaCrop و از داده‌های تیمارهای دو مرحله‌ای رشد برای ارزیابی مدل مذکور استفاده شد. در اثر افزایش تنش شوری تا سطح S_4، میزان ماده خشک گیاهی از ۱۵۷/۲ گرم به ۱۱۵/۹، ۵۳/۲، ۷۷/۷، ۸۶/۱، ۹۷ و ۴۶/۵ گرم در هر بوته برای تیمارهای C_1، C_2، C_3، C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3 رسید. نتایج نشان داد که کاربرد ناگهانی تنش شوری در یک مرحله حساس رشد (مانند گل‌دهی یا شیری شدن دانه‌ها)، باعث ضرر بیشتر نسبت به تیمارهای C_1C_2 و C_1C_3 شده است. زیرا یک‌بار اعمال تنش شوری در مرحله ۶ برگی (C_1) رشد، موجب سازگاری (افزایش آستانه تحمل) گیاه به تنش‌های آتی شد. در ارزیابی مدل AquaCrop آماره‌های CRM، EF، R^2، RMSE، NRMSE و ME به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۸۴-، ۰/۸۳۳، ۰/۹۱، ۱۲/۰۵، ۱۱/۳۴٪ و ۱۸/۳۲ بیانگر دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد ذرت بود. درنتیجه با مدیریت تنش شوری در مراحل رشد گیاه، می‌توان اثرات منفی بر مقدار عملکرد محصول را کاهش داد. از طریق شبیه‌سازی عملکرد با مدل AquaCrop، حالات مختلف کاربرد تنش‌ها قابل ارزیابی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: حساسیت مرحله رشد، شبیه‌سازی، عملکرد

مقدمه

تنش شوری یک از تنش‌های مؤثر محیطی بوده که از طریق خاک و یا آب آبیاری بر گیاه اعمال می‌شود و موجب کاهش تبخیر-تعرق و زیست‌توده تولیدی گیاه، نسبت به شرایط استاندارد منطقه تحت کشت می‌شود. در شرایط تنش شوری به‌علت کاهش پتانسیل آب خاک، جذب آب و سهم تعرق گیاه کاهش یافته و از سوی دیگر سهم تبخیر از سطح خاک افزایش می‌یابد، که نتیجه آن افزایش تجمع املاح در سطح خاک است (سعیدی، ۱۴۰۱). در پژوهشی گزارش شد که دلیل اهمیت زیاد تنش شوری نسبت به سایر تنش‌های محیطی، دائمی بودن (ماندگاری) اثرات آن است. به‌طوری که سالانه حدود ۲ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان (حدود یک درصد) به زمین‌هایی شور تبدیل می‌شوند که شرایط زراعت را از دست داده‌اند و یا تولید محصول در آن‌ها کاهش یافته است. شوری یک فاکتور محیطی بوده که همه مراحل رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پاسخ گیاهان به شوری نیز به نوع گیاه، مراحل رشد گیاه، شدت و مدت اعمال تنش بستگی دارد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۰). از این‌رو با توجه به نیاز روزافزون بشر به تولید محصولات غذایی زراعی، کاهش منابع آب باکیفیت و شورشدن اراضی کشاورزی، نیاز مبرم به پژوهش‌های کاربردی درخصوص مدیریت تنش‌های شوری وجود دارد. بررسی حساسیت مرحله رشد گیاه و نحوه اعمال تنش شوری در طول دوره رشد گیاه، از جمله مسائلی است که می‌تواند باعث کنترل خسارت‌هایی مانند افزایش املاح خاک و کاهش عملکرد

۱- دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.4.11.1

محصول بشود. از سوی دیگر واسنجی مدل‌های گیاهی مانند AquaCrop برای شرایط مختلف اعمال تنش شوری، راه‌کار مناسبی برای پیش‌بینی عملکرد محصول و توصیه‌های مدیریتی در هر منطقه خواهد بود.

در بین گیاهان زراعی که به‌صورت آبی تحت کشت قرار می‌گیرند، گیاه ذرت به لحاظ تأمین نیاز غذایی انسان و دام، مانند گندم، جو و برنج، دارای اهمیت راهبردی است و در مباحث مرتبط با تنش شوری آب آبیاری، می‌تواند مورد مناسبی برای مطالعه باشد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). دراین‌باره در پژوهشی گزارش شد که تنش شوری در عصاره اشباع خاک به‌میزان ۱۰۰ میلی مولار NaCl، جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و آهن توسط گیاه ذرت را کاهش داده و باعث افزایش مقاومت روزنه‌ها و کاهش تعرق گیاه شد (Farooq et al., 2015). در تحقیقی بر روی ذرت 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 شد. درنتیجه مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه افزایش یافت و مقدار تبخیر- تعرق ذرت، از ۳۵۳ به ۲۷۴ میلی‌متر و مقدار عملکرد ماده خشک محصول از ۱۵/۴ به ۹ تن بر هکتار کاهش یافت (Saeidi et al., 2021). پژوهش‌های گذشته نشان دادند که اعمال پیوسته تنش شوری در دوره رشد گیاه ذرت باعث کاهش تبخیر-تعرق گیاه و عملکرد محصول می‌شود. اما در پژوهشی گزارش شد که دوره رشد ذرت شامل مراحل استقرار گیاهچه، مرحله رشد سریع، گرده افشانی و پُر شدن دانه است که از نظر فرایندهای فیزیولوژیکی و حساسیت گیاه به تنش‌ها، متفاوت است. به‌طوری که اِعمال تنش در مراحل مختلف رشد، تأثیر متفاوتی بر روی مقدار عملکرد محصول خواهد داشت (Nielsen, 2002). از این‌رو اعمال تنش شوری به‌صورت مداوم (پیوسته) در کل دوره رشد گیاه، با اعمال مقطعی (ناپیوسته) تنش در مراحل حساس و یا مراحل دیگر رشد متفاوت خواهد بود. به‌طوری که در پژوهشی گیاه ذرت به‌صورت گلدانی در گلخانه دانشگاه تهران کشت شد و اثر تنش شوری بر روی گیاه در دو فصل بهار و پاییز 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 اولیه رشد) باعث شد که مقدار عملکرد محصول از ۱۵۳/۸ به ۷۱/۳ گرم برسد. در حالی‌که همین میزان تنش شوری در فصل پاییز (مراحل میانی 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، به‌ترتیب ۷/۴ و ۶/۵ درصد گزارش شد (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸).

به‌منظور شبیه‌سازی میزان عملکرد محصول ذرت برای اقلیم یک منطقه و در شرایط اعمال تنش شوری، می‌توان از مدل AquaCrop استفاده کرد. اساس کار مدل AquaCrop بررسی واکنش عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی است که با استفاده از متغیرهای اقلیمی، گیاه، خاک و شیوه‌های مدیریتی، عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌نماید. مدل مذکور بایستی برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی گردد. مزیت مدل AquaCrop نسبت به سایر مدل‌های گیاهی این است که پارامترهای ثابت آن زیادتر بوده و واسنجی مدل با داده‌های کمتری انجام‌پذیر است. مدل AquaCrop برای اجرا نیاز به ورود داده‌های هواشناسی، گیاه، خاک، مدیریت مزرعه و آبیاری دارد (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۳). نسخه اولیه مدل AquaCrop، در سال ۲۰۰۷ از طریق اصلاح و بازنگری نشریه شماره ۳۳ فائو به‌دست آمد و بدون لحاظ تأثیر تنش شوری ارائه شد. اما از نسخه ۴ که در سال ۲۰۱۲ معرفی شد، مدل مذکور اصلاح شد و تأثیر تنش شوری مدنظر قرار گرفت. در این‌باره، در شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی (بدون استفاده و با استفاده از خاکپوش گیاهی) و آبیاری با آب شور (در سه سطح شوری ۲، ۴/۵ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر) عملکرد ذرت با مدل AquaCrop تخمین زده شد. مقدار آماره‌های R^2 و NRMSE برای زیست‌توده ذرت به ترتیب ۰/۹۹ و ۴/۴۸ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد که مقدار زیست‌توده ذرت به‌خوبی شبیه‌سازی شد ولی با افزایش شوری آب، از دقت مدل کاسته شد (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی تحت سطوح تنش شوری آب آبیاری با هدایت الکتریکی ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر و سطوح ازت خاک شامل مصرف ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد کود نیتروژن، میزان عملکرد محصول ذرت با مدل AquaCrop در منطقه قزوین شبیه‌سازی شد. نتایج ارزیابی مدل AquaCrop نشان داد که در تخمین مقدار عملکرد محصول، مقدار آماره‌های RMSE، NRMSE و R^2 به‌ترتیب برابر با ۰/۳۴ تن بر هکتار، ۰/۶۵ درصد و ۰/۹۹ بود. مقادیر آماره‌های مذکور نشان‌دهنده همبستگی مناسب و انطباق خوب بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول توسط مدل AquaCrop بود (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). در تحقیقی با تیمارهای مختلف کود نیتروژن (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار)، عملکرد زیست‌توده ذرت با مدل AquaCrop تخمین زده شد. در ارزیابی مدل، مقدار NRMSE و R^2 به‌ترتیب ۵/۳۲ درصد و ۰/۹۷۵ به‌دست آمد. نتایج نشان داد مدل مذکور، عملکرد نهایی زیست‌توده ذرت را در تیمارهای مختلف نسبتاً دقیق پیش‌بینی می‌کند (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۶).

در پژوهش دیگر در منطقه کرج، عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای و شوری خاک، تحت شرایط مدیریت‌های مختلف استفاده از آب‌شور در تناوب با آب شیرین، با مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. مقدار آماره R^2 برابر با ۰/۷۳۳ و میزان خطای نسبی مدل AquaCrop در

تخمین عملکرد محصول ذرت از ۲/۹ تا ۳۰/۸ درصد متغیر بود. مقدار ضریب CRM نیز ۱۱/۸- به‌دست آمد که نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل AquaCrop نسبت به داده‌های مشاهده‌ای عملکرد محصول بود. علت آن قلیایی بودن آب آبیاری گزارش شد، که مدل مذکور اثر آن‌را نتوانسته درنظر بگیرد. درمجموع نتایج نشان داد که مدل AquaCrop دقت نسبتاً خوبی در پیش‌بینی عملکرد محصول ذرت و شوری خاک داشت. اما خطای مدل با افزایش تعداد دفعات آبیاری با آب‌شور به نسبت آب شیرین، افزایش یافت (حسن‌لی و همکاران، ۱۳۹۴). در پژوهشی در منطقه اهواز، حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه ذرت تحت تنش شوری، تحلیل شد. تیمارهای تنش شوری درقالب پنج کیفیت آب آبیاری شامل ۲/۵، ۳/۲، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که با افزایش شوری آب آبیاری، حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات شاخص برداشت و بهره‌وری آب نرمال‌شده کاهش یافت. به‌طوری که افزایش شوری آب آبیاری از میزان حساسیت پارامترها کاست و روش آبیاری نیز اثر چندانی بر حساسیت مدل AquaCrop نداشت. همچنین پیشنهاد شد که در مرحله واسنجی مدل، اگر تفاوت بین عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده گیاه بیش از یک تن در هکتار بود، دو پارامتر بهره‌وری آب نرمال‌شده و ضریب تعرق گیاهی تغییر داده شوند. درمجموع توصیه شد که برای کاهش خطای واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop، بهتر است که در شرایط تنش شوری، پارمترهای مدل کم‌تر مورد واسنجی قرار گیرند (سرکهکی و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهش دیگر در اهواز، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شوری خاک در کشت ذرت، ارزیابی شد. تیمارهای کیفیت آب آبیاری شامل شوری در پنج سطح ۲/۵، ۳/۲، ۳/۹، ۴/۶ و ۵/۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد آماره NRMSE برای پارامترهای عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شوری خاک به ترتیب برابر با ۰/۰۷، ۰/۰۹، ۰/۰۷ و ۰/۱۴ بود. از این‌رو کارایی مدل AquaCrop برای شبیه سازی شوری خاک، خوب و برای عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب عالی بود (سرکهکی و همکاران، الف ۱۴۰۰).

نتایج پژوهش‌های گذشته بر روی گیاه ذرت نشان داد که شناخت حساسیت درون‌فصلی گیاه نسبت به تنش‌های محیطی مانند شوری، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر عملکرد محصول را فراهم می‌کند (Saeidi et al., 2022). در پژوهش حاضر سعی بر این است که در شرایط اعمال مقطعی (ناپیوسته) تنش شوری در دو مرحله متفاوت رشد ذرت، میزان عملکرد محصول توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی شود. به‌طوری که اگر گیاه یک‌بار در مراحل اولیه رشد و بار دیگر در مراحل آتی رشد با تنش شوری مواجه شد، بتوان مقدار عملکرد محصول را پیش‌بینی کرد. درصورت حصول نتایج مطلوب در صحت‌سنجی مدل AquaCrop، می‌توان میزان اثر سازگاری و یا عدم سازگاری گیاه ذرت به تنش شوری را توسط مدل مذکور مشاهده نمود. از این‌رو هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی مدل AquaCrop برای شرایط اثر متقابل تنش شوری در مراحل رشد ذرت (در منطقه قزوین) می‌باشد. با این کار امکان مدل‌سازی عملکرد محصول ذرت، در شرایط مدیریت تلفیقی منابع آب‌های شور و شیرین فراهم می‌شود.

مواد و روش‌ها

کلیات پژوهش

این پژوهش در سال ۱۴۰۰ در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) واقع در شهر قزوین و با موقعیت جغرافیایی "۲۳ '۱۹ °۳۶ عرض شمالی و "۳۸ '۰۰ °۵۰ طول شرقی انجام شد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در مینی‌لایسیمترهایی با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر کشت شد. خاک فراهم شده برای پُر کردن مینی‌لایسیمترها، مخلوطی از خاک مزرعه، ماسه بادی و کود حیوانی به ترتیب با نسبت ۳، ۱ و ۱ بود که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شد. برای جلوگیری از تجمع املاح در خاک و کنترل مقدار شوری خاک (بر اساس تیمارها)، در کف مینی‌لایسیمترها از لوله‌های سوراخ‌دار و بستر شن (به‌عنوان زهکش) استفاده شد. به‌این ترتیب فرایند آبشویی خاک در مراحل رشد مورد نظر امکان‌پذیر شد. با اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک آماده کشت در شرایط طبیعی مزرعه (خاک شخم خورده)، مقدار چگالی ۱/۳۶ گرم بر سانتیمتر مکعب برای خاک داخل مینی‌لایسیمتر مناسب دیده شد. ازاین‌رو با توجه به حجم هر مینی‌لایسیمتر، وزن مشخصی از خاک برای رسیدن به تراکم مذکور، در آن‌ها ریخته شد و از طریق آب دادن به آن‌ها، نشست احتمالی خاک انجام شد. بذرها در تاریخ ۱۰ خرداد ماه کاشته شد و برداشت علوفه‌ای محصول ذرت در تاریخ ۲۶ مهرماه انجام شد. همانند پژوهش‌های گذشته (سعیدی، ب ۱۴۰۰؛ دهقانی سانیج و همکاران، ۱۳۹۶)، در داخل هر مینی‌لایسیمتر تعداد سه بذر به‌صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد. پس از جوانه‌زنی و رسیدن گیاهان به چهار برگ، بهترین گیاه برای اجرای تیمارها باقی ماند و سایر گیاهان از سطح خاک حذف شد. در تحقیقی مشابه نیز با هدف بررسی تأثیر تنش شوری و قارچ میکوریزا بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه ذرت، شیوه کشت گیاهان به‌صورت پژوهش حاضر گزارش شد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۶).

تیمارها

در این پژوهش تنش شوری از طریق آب آبیاری و به‌صورت پالسی (ناپیوسته)، در مقاطعی از دوره رشد بر گیاه ذرت اعمال شد. لازم به ذکر است که در نشریه فائو-۲۹، آستانه تحمل ذرت به شوری بر اساس آبیاری با آب لب‌شور و یا املاح موجود در عصاره اشباع

خاک، به‌ترتیب ۱/۱ و ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شد (Ayers and Westcott 1985). به بیان ساده اگر ذرت در کل دوره رشد خود با آب دارای شوری بیشتر از ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر آبیاری شود و یا این‌که آب دارای کیفیت مناسب باشد و شوری ثابت عصاره اشباع خاک بیش از ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر باشد، تنش شوری بر گیاه ذرت اعمال می‌شود. از این‌رو تیمارهای شوری عصاره اشباع خاک در چهار سطح S_1، S_2، S_3 و S_4 به‌ترتیب برابر با ۱/۷، ۳، ۵ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شد. برای شور کردن خاک، از اختلاط آب چاه (با سطح شوری S_0 برابر با ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر) و آب زهکش حائل منطقه آبیک قزوین (شوره‌زار مرکزی دشت قزوین با عرض جغرافیایی "۸ '۵۷ °۳۵ و طول جغرافیایی "۳۹ '۲۴ °۵۰) استفاده شد. به‌طوری‌که با اختلاط آب بسیار شور خروجی زهکش و آب چاه، تیمار شوری با غلظت‌های مورد نظر تهیه و اعمال شد. کیفیت آب با سطوح مختلف شوری در پژوهش حاضر، به‌شرح جدول (۲) می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات خاک مینی‌لایسیمتر

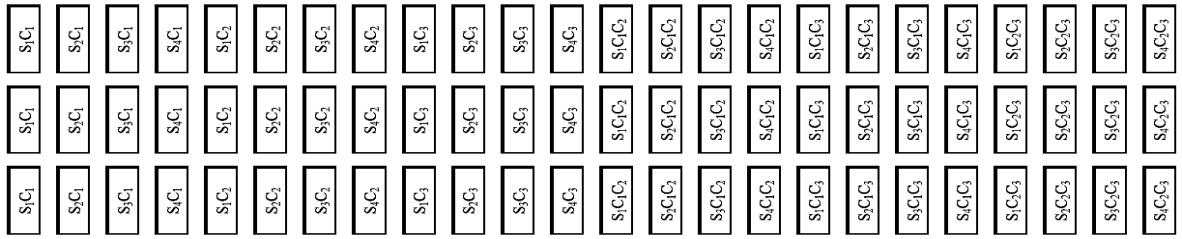
پارامتر	واحد	مقدار
هدایت الکتریکی عصاره اشباع	$dS.m^{-1}$	۰/۴۶
اسیدیته (pH)	-	۷/۴
بافت خاک	-	لوم شنی
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	۲۳
رطوبت وزنی حد پژمردگی	%	۱۰
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	۱/۳۶

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی منابع آبی 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

از سوی دیگر تیمارهای مراحل رشد به‌صورت یک مرحله‌ای و شامل مراحل (C_1) ۶ برگی، (C_2) گل‌دهی، (C_3) شیری شدن دانه‌ها و دو مرحله‌ای شامل (C_1C_2) ۶ برگی-گل‌دهی، (C_1C_3) ۶ برگی-شیری شدن دانه‌ها و (C_2C_3) گل‌دهی- شیری شدن دانه‌ها، تعریف شدند. به این مفهوم که در هر یک از تیمارهای یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای رشد، عصاره اشباع خاک به سطح تیمارهای شوری در پژوهش رسانده شد. شور کردن عصاره اشباع خاک صرفاً در مرحله موردنظر از رشد گیاه انجام شد و آبیاری با آب شور تا زمانی ادامه داشت که هدایت‌الکتریکی آب خروجی از مینی‌لایسیمتر، به حد شوری آب آبیاری (تیمار مد نظر) رسیده باشد. برای این کار، ابتدا خروجی مینی‌لایسیمتر بسته شد و پس از اشباع شدن خاک با آب شور موردنظر، حدود سه ساعت فرصت داده شد تا خاک بستر کشت، آب شور را در بر داشته باشد. سپس خروجی مینی‌لایسیمتر باز شد و با اندازه‌گیری شوری زه‌آب خروجی، اطمینان حاصل شد که تنش شوری مدنظر به خاک منطقه فعالیت ریشه گیاه اعمال شده است.

لازم به ذکر است که در خاک مینی‌لایسیمترها هیچ‌گونه دَرز و تَرَک و جریان ترجیحی برای عبور یک‌باره آب شور آبیاری به سمت زهکش وجود نداشت. همچنین در فواصل زمانی بین تیمارهای مراحل رشد، از آب باکیفیت چاه (سطح شوری S_0) برای آبیاری استفاده شد. برای این شرایط، میزان تجمع املاح حاصل از آبیاری با آب باکیفیت (S_0) در طول دوره کشت نیز بررسی شد. به‌این صورت که در یک سری مینی‌لایسیمتر جداگانه، گیاه در کل دوره رشد با آب باکیفیت (S_0) آبیاری شد. در پایان دوره کشت، شوری عصاره اشباع خاک در مینی‌لایسیمترهای مذکور اندازه‌گیری شد و عدد مشاهده شده نزدیک به یک دسی‌زیمنس بر متر بود. درنتیجه تجمع املاح حاصل از آبیاری با آب باکیفیت، کم‌تر از سطح شوری S_1 بود و خطایی در انجام آزمایش وارد نبوده است. در مجموع تعداد ۲۴ تیمار با سه تکرار، به‌صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شدند (شکل ۱).



شکل ۱- شبکه اعمال تیمارها در پژوهش

زمان و حجم آب آبیاری

در این پژوهش، مقدار رطوبت روزانه خاک توسط دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دِلتاتی (HH_2 مدل ΔT)، در مرکز هر مینی‌لایسیمتر و در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. در مورد نحوه تشخیص عمق توسعه ریشه گیاه، مینی‌لایسیمترهای جداگانه‌ای طی مراحل مختلف رشد گیاه در نظر گرفته شد و با خارج کردن ریشه گیاه از خاک، عمق آن‌ها اندازه‌گیری شد. در مورد نحوه کار با دستگاه رطوبت‌سنج نیز قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت‌شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به این صورت که در یک نمودار، داده‌های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی اِشِل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی رطوبت تهیه شد.

باهدف این‌که هیچ‌گونه تنش آبی بر گیاهان اِعمال نشود، زمان انجام آبیاری طوری انتخاب شد که حتی در مراحل حساس رشد نیز، آب به‌صورت سهل‌الوصول در دسترس گیاه باشد. دراین‌باره در پژوهشی در منطقه قزوین، حد آب سهل‌الوصول خاک (RAW^1) در مراحل مختلف رشد گیاه ذرت بین ۴۰ تا ۸۰ درصد در نظر گرفته شد (سعیدی، الف ۱۴۰۰). ازاین‌رو پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC^2) و نقطه پژمردگی دائم (PWP^3) در تیمارها، عملیات آبیاری انجام شد. زمان انجام آبیاری‌ها در جدول (۳) ارائه شد. لازم به‌ذکر است که درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به ترتیب تحت فشارهای مکشی یک‌سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک‌کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. برای اندازه‌گیری مقدار پارامتر RAW نیز از رابطه (۱) استفاده شد.

$$RAW = \frac{\theta_{FC}-\theta_i}{\theta_{FC}-\theta_{PWP}} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، RAW: معرف میزان آب سهل‌الوصول خاک است.

طبق تعریف نشریه فائو-۵۶ (Allen et al., 1998)، RAW کسری از کل آب قابل استفاده خاک (TAW^4) است که در آن تنش آبی گیاه ایجاد نمی‌شود. در توضیحات قبلی ذکر شد که حداکثر تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD^5) برابر با ۴۰ درصد رطوبت بین دو حد FC و PWP درنظر گرفته شد. ازاین‌رو θ_i مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد) پس از انجام تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) و در زمان انجام آبیاری است. θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد) و θ_{PWP}: رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) می‌باشد.

هدف از انجام آبیاری در فواصل زمانی بین تیمارهای مراحل رشد، جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه (FC) بود. از این‌رو زهاب خروجی از مینی‌لایسیمترها وجود نداشت و آبیاری با آب باکیفیت (S_0) در مراحل رشد، باعث شستشوی خاک شور و اختلال در کار پژوهش نمی‌شد. با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک ($\theta_{FC}-\theta_i$)، چگالی، عمق ریشه و مساحت سطح خاک در مینی‌لایسیمتر، حجم آب آبیاری (مطابق جدول (۳)) بر اساس رابطه (۲) تعیین شد. در این شرایط آب اضافی برای تبدیل به زهاب و خروج از انتهای مینی‌لایسیمترها وجود نداشت و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد بود.

$$V = \frac{(\theta_{FC}-\theta_i)}{100} \times \rho b \times Z \times A \qquad (۲)$$

V: حجم آب آبیاری (مترمکعب)، θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_i: رطوبت وزنی خاک در زمان اتمام آب سهل‌الوصول خاک (رسیدن به حد MAD) و قبل از انجام آبیاری (درصد)، ρb: چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، Z: عمق توسعه ریشه (متر) و A: مساحت سطح خاک (مترمربع).

1 - Readily available water, RAW
2 -Field capacity, FC
3- Permanent wilting point, PWP
4- Total available water, TAW
5- Maximum allowable depletion, MAD

جدول ۳- تقویم آبیاری و حجم آب مصرفی در تیمارهای پژوهش

	C_1		C_2		C_3		C_1C_2		C_1C_3		C_2C_3	
	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر)	تاریخ	حجم آبیاری (لیتر)
	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴
	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳
	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸
	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵
	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷
تیمار	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱
S_1	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵
	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴
	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۶	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸
	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۲	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵
	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶/۱	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶/۱	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶/۱	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶	۱۴۰۰/۷/۱	۶	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶
	۱۴۰۰/۷/۱۵	۴/۹	۱۴۰۰/۷/۱۵	۴/۹	۱۴۰۰/۷/۱۵	۴/۹	۱۴۰۰/۷/۱۵	۴/۸	۱۴۰۰/۷/۱۶	۴/۷	۱۴۰۰/۷/۱۵	۴/۸
	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴
	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳
	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸
	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۴	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۴	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۴	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵
	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۵	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۵	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۵	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷
تیمار	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱
S_2	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵
	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۶	۷/۳	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴
	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۷	۱۴۰۰/۶/۷	۶/۷	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۷	۶/۶	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۶	۱۴۰۰/۶/۷	۶/۷
	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۲	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۹	۶/۲	۱۴۰۰/۶/۱۹	۶/۳	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۲
	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶/۱	۱۴۰۰/۷/۱	۶	۱۴۰۰/۶/۳۱	۶	۱۴۰۰/۷/۱	۶	۱۴۰۰/۷/۱	۵/۸	۱۴۰۰/۷/۲	۵/۸
	۱۴۰۰/۷/۱۵	۴/۹	۱۴۰۰/۷/۱۶	۴/۸	۱۴۰۰/۷/۱۶	۵	۱۴۰۰/۷/۱۶	۴/۷	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۸	۱۴۰۰/۷/۱۶	۴/۵
	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴
	۱۴۰۰//۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳
	۱۴۰۰/۳/۳۱	۴/۷	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۱	۴/۷	۱۴۰۰/۳/۳۱	۴/۷	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸
	۱۴۰۰/۴/۱۳	۵/۳	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۳	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۳	۵/۳	۱۴۰۰/۴/۱۳	۵/۳	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵
	۱۴۰۰/۴/۲۶	۶/۶	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۶	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۶	۶/۶	۱۴۰۰/۴/۲۶	۶/۶	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷
تیمار	۱۴۰۰/۵/۶	۷/۲	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۶	۷/۲	۱۴۰۰/۵/۶	۷/۲	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱
S_3	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۳	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۳	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۳	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵
	۱۴۰۰/۵/۲۶	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۷	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۲۶	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴
	۱۴۰۰/۶/۸	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۷	۶/۶	۱۴۰۰/۶/۹	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۳	۱۴۰۰/۶/۸	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۷	۶/۶
	۱۴۰۰/۶/۲۰	۶/۳	۱۴۰۰/۶/۱۹	۶/۳	۱۴۰۰/۶/۲۰	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶	۱۴۰۰/۶/۲۰	۶/۱	۱۴۰۰/۶/۱۹	۶/۳
	۱۴۰۰/۷/۱	۶	۱۴۰۰/۷/۲	۶	۱۴۰۰/۷/۱	۵/۹	۱۴۰۰/۷/۲	۵/۸	۱۴۰۰/۷/۲	۵/۷	۱۴۰۰/۷/۳	۵/۷
	۱۴۰۰/۷/۱۶	۴/۷	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۷	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۸	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۵	۱۴۰۰/۷/۱۸	۴/۵	۱۴۰۰/۷/۱۸	۴/۶
تیمار	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴	۱۴۰۰/۳/۱۰	۴
S_4	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳	۱۴۰۰/۳/۱۸	۴/۳

۱۴۰۰/۳/۳۱	۴/۵	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸	۱۴۰۰/۳/۳۱	۴/۵	۱۴۰۰/۳/۳۱	۴/۵	۱۴۰۰/۳/۳۰	۴/۸
۱۴۰۰/۴/۱۴	۵/۱	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵	۱۴۰۰/۴/۱۴	۵/۱	۱۴۰۰/۴/۱۴	۵/۱	۱۴۰۰/۴/۱۲	۵/۵
۱۴۰۰/۴/۲۷	۶/۵	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷	۱۴۰۰/۴/۲۷	۶/۵	۱۴۰۰/۴/۲۷	۶/۵	۱۴۰۰/۴/۲۵	۶/۷
۱۴۰۰/۵/۷	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۷	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۷	۷/۱	۱۴۰۰/۵/۵	۷/۱
۱۴۰۰/۵/۱۶	۷/۲	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵	۱۴۰۰/۵/۱۶	۷/۲	۱۴۰۰/۵/۱۶	۷/۲	۱۴۰۰/۵/۱۵	۷/۵
۱۴۰۰/۵/۲۷	۷/۳	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴	۱۴۰۰/۵/۲۷	۶/۸	۱۴۰۰/۵/۲۷	۷/۳	۱۴۰۰/۵/۲۵	۷/۴
۱۴۰۰/۶/۸	۶/۴	۱۴۰۰/۶/۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۶	۶/۸	۱۴۰۰/۶/۱۰	۶/۱	۱۴۰۰/۶/۸	۶/۴	۱۴۰۰/۶/۸	۶/۵
۱۴۰۰/۶/۲۰	۶/۲	۱۴۰۰/۶/۲۰	۶/۱	۱۴۰۰/۶/۱۸	۶/۵	۱۴۰۰/۶/۲۰	۵/۸	۱۴۰۰/۶/۲۰	۵/۸	۱۴۰۰/۶/۲۰	۶/۱
۱۴۰۰/۷/۲	۶	۱۴۰۰/۷/۳	۵/۹	۱۴۰۰/۷/۲	۵/۷	۱۴۰۰/۷/۳	۵/۷	۱۴۰۰/۷/۳	۵/۵	۱۴۰۰/۷/۴	۵/۵
۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۵	۱۴۰۰/۷/۱۹	۴/۶	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۵	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴	۱۴۰۰/۷/۱۷	۴/۲	۱۴۰۰/۷/۱۹	۴/۴

اندازه‌گیری عملکرد محصول

به‌منظور اندازه‌گیری وزن زیست‌توده خشک ذرت، بوته‌ها در هر مینی‌لایسیمتر 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.

واسنجی مدل AquaCrop

در این پژوهش سعی شد با واسنجی مدل AquaCrop نسبت به شرایط واقعی منطقه، عملکرد نهایی زیست‌توده خشک ذرت را تحت اثر متقابل تنش شوری در دو مرحله رشد، شبیه‌سازی نمود. به‌این صورت که واسنجی مدل بر اساس اطلاعات واقعی مربوط به تیمارهای یک مرحله‌ای رشد (C_1، C_2 و C_3) انجام شد. سپس مدل واسنجی شده، بر اساس داده‌های واقعی تیمارهای دو مرحله‌ای رشد (C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3) مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت. برای انجام واسنجی، اطلاعات ورودی به مدل شامل داده‌های اقلیمی منطقه، پارامترهای گیاهی، ویژگی‌های خاک و شیوه‌های مدیریتی بود. برای داده‌های اقلیمی از آمار بارندگی، دمای حداقل و حداکثر محیط و سایر پارامترهای هواشناسی روزانه، طی دوره رشد ذرت (۱۰ خرداد تا ۲۶ مهر) استفاده شد. تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) به‌وسیله نرم‌افزار CROPWAT (معادله پنمن- مانتیث) به‌صورت روزانه محاسبه شد. داده اقلیمی دیگر، میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر بود که بر اساس مشاهدات رصدخانه مانوآلوآ در هاوایی برای سال‌های ۱۹۰۲ تا ۲۰۹۹ به‌صورت پیش‌فرض در مدل وجود داشت. پارامترهای ثابت گیاه (مانند دمای پایه رشد، دمای بالا، حد پایین و بالای حساسیت به تنش شوری و ...) با زمان، شیوه‌های مدیریت و موقعیت جغرافیایی تغییر نکرده و برای شرایط محلی نیاز به تنظیم نداشت. اما پارامترهای متغیر گیاه تحت تأثیر مدیریت مزرعه‌ای، شرایط پروفیل خاک و آب و هوا بوده و نیاز به تنظیم شدن برای شرایط مکانی داشت. پارامترهای گیاهی که برای شرایط بدون تنش در مدل واسنجی شده بود از طریق توابع پاسخ به تنش برای شرایط دارای تنش استفاده شد. ویژگی‌های خاک در مدل AquaCrop شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، رطوبت اشباع خاک، ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی (PWP) بود. شیوه‌های مدیریتی در دو دسته مدیریت مزرعه‌ای و آبیاری تقسیم‌بندی می‌شد. در شیوه مدیریت مزرعه‌ای کلاس‌بندی شوری خاک و شوری آب آبیاری (از عالی تا خیلی فقیر) انتخاب می‌شد. در شیوه مدیریت آبیاری، زمان، مقدار آبیاری و کیفیت آب (شوری) بر اساس شرایط واقعی پژوهش تعیین شد. روش اصلی برای شبیه‌سازی عملکرد محصول در مدل AquaCrop استفاده از رابطه دورنبوس-کسّام (رابطه ۳) بود. در این مدل شبیه‌سازی تعرق گیاه با رابطه (۴) که معادله اصلی برای محاسبه تعرق گیاه بود انجام شد. دوره محاسباتی برای برآورد پارامترهای تبخیر- تعرق و عملکرد گیاه در این پژوهش به‌صورت روزانه بود.

$$1-\frac{Y_a}{Y_{max}}=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad (۳)$$

K_y: ضریب پاسخ عملکرد گیاه به تبخیر- تعرق، Y_a: عملکرد واقعی گیاه (کیلوگرم)، Y_{max}: حداکثر عملکرد گیاه (کیلوگرم)، ET_a: تبخیر- تعرق واقعی گیاه (میلی‌متر)، ET_{max}: حداکثر تبخیر- تعرق گیاه (میلی‌متر)،

$$T_r=K_s\times K_{cbx}\times ET_0 \quad (۴)$$

در رابطه ۴، T_r: تعرق گیاه، K_s: ضریب تنش مربوط به بسته‌شدن روزنه‌ها بود. مقدار این ضریب از عدد یک (بدون تنش) در آستانه بالا تا صفر (تنش کامل) در آستانه پایین متفاوت بود. از جمله تنش‌های مؤثر بر کاهش میزان تعرق گیاه در این پژوهش تنش شوری بود. در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی اثر تنش شوری، ضریب K_s به ضرایب Ks_{expf}، Ks_{CCx}، $f_{CDecline}$ تفکیک می‌شد. ضرایب مذکور به‌ترتیب بیانگر اثر تنش شوری بر روی رشد و توسعه کنوپی (CGC)، بیشینه پوشش کنوپی (CC_X) و ضریب کاهش پوشش کنوپی (CC) بود. در این پژوهش میزان کنوپی گیاه در زمان‌های مورد نظر، از

جمله مواردی بود که در مدل AquaCrop واسنجی شد. پارامتر مذکور به‌صورت میدانی و با روش غیر تخریبی، توسط دستگاه آکیوپار (AccuPAR) قابلیت اندازه‌گیری دارد. K_{cbx}: ضریب تأثیر عوامل دیگری غیر از تنش شوری بود که تعرق گیاه را از سطح مرجع چمن متمایز می‌کرد و ET_0: تبخیر- تعرق گیاه مرجع (چمن) بود.

در مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی میزان زیست توده و عملکرد نهایی محصول به‌ترتیب از روابط (۵) و (۶) استفاده می‌شود. طبق رابطه (۵) این مدل از بهره‌وری آب (WP) برای شبیه‌سازی زیست‌توده (B) استفاده نموده که تنش مؤثر بر روی بهره‌وری آب در این مدل، محدودیت غلظت CO_2 بود. در رابطه (۵)، B: زیست‌توده روزانه گیاه، WP: بهره‌وری آب و $\sum_i \frac{Tr_i}{ETo_i}$: مجموع نسبت روزانه تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع بود. در رابطه (۶)، HI: شاخص برداشت و f_{HI}: ضریبی مربوط به اثر تنش‌ها بود و برای تنظیم شاخص برداشت نسبت به مقدار مرجع به‌کار می‌رفت.

$$B = WP \times \sum_i \frac{Tr_i}{ETo_i} \quad (۵)$$

$$Y = f_{HI} \times HI \times B \quad (۶)$$

در این پژوهش پارامترهایی که حساسیت بیشتری در خروجی مدل داشتند مورد واسنجی قرار گرفتند. بر اساس تحقیقات گذشته، مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای زمان سبزشدن بذرها، طول زمان گل‌دهی، مرحله رشد سبزینه‌ای، تراکم و تقویم کاشت، حساسیت کم داشت و نسبت به تغییرات ضریب گیاهی، رشد پوشش تاج گیاه، بهره‌وری آب نرمال‌شده، رطوبت خاک، زمان گل‌دهی و پرشدن دانه‌ها، حساسیت زیاد داشت (بابازاده و سرائی تبریزی، ۱۳۹۱). هدف از انجام واسنجی مدل، نزدیک‌کردن خروجی مدل (مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده) به داده‌های واقعی عملکرد محصول (مشاهده‌ای) بود. بنابراین برای برقرار نمودن بهترین انطباق بین خروجی مدل با داده‌های مشاهده‌ای، نیاز بود که مقدار بهینه پارامترهای حساس شناسایی شود. یعنی باید در میان حداقل تا حداکثر مقداری که برای پارامتر مذکور در مدل AquaCrop تعریف شده بود، بهترین مقدار انتخاب می‌شد. برای این کار، پارامترهای حساس براساس بازه مقادیر عددی آن‌ها در مدل AquaCrop، با روش تخمین عدم قطعیت احتمالات عمومی (GLUE[1]) واسنجی شدند. در روش GLUE که بر پایه شبیه‌سازی مونت‌کارلو استوار بود، به‌صورت تصادفی ترکیبات مختلفی از پارامترهای حساس و تأثیر برهم‌کُنش بین آن‌ها، برای رسیدن به خروجی بهینه مدل درنظر گرفته می‌شد (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). هسته اصلی در روش شبیه‌سازی تصادفی یا روش‌های مونت‌کارلو بر مبنای استفاده مداوم از اعداد تصادفی بود. روش GLUE به‌این دلیل استفاده شد که یافتن یک سری منحصر به فرد از پارامترهای بهینه، به‌سادگی امکان‌پذیر نبود. از سوی دیگر مقادیر برخی از پارامترها به‌صورت پیش‌فرض در مدل وجود داشت و بعضی دیگر که قابل اندازه‌گیری بود، مقادیر واقعی آن‌ها در مدل وارد شد (جدول ۴).

1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, GLUE

صحت‌سنجی و ارزیابی مدل AquaCrop

در مرحله صحت‌سنجی عملکرد مدل AquaCrop، داده‌های مربوط به تیمارهای دو مرحله‌ای رشد (C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3) در مدل واسنجی شده وارد شد و عملکرد محصول توسط مدل پیش‌بینی شد. برای مقایسه و ارزیابی مدل AquaCrop از داده‌های مشاهده‌ای در مزرعه (O[2]) و پیش‌بینی شده توسط مدل (P[3]) استفاده شد. برای این منظور از آماره‌های ارزیابی، شامل حداکثر خطا (ME)[4]، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[5]، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)[6]، ضریب تبیین (R^2)[7]، کارایی مدل‌سازی (EF)[8] و ضریب باقیمانده (CRM)[9] استفاده شد. معادلات مربوط به آماره‌های مذکور در روابط (۷) الی (۱۲) ارائه شد. وجود حداقل مقدار (نزدیک به صفر) برای آماره‌های RMSE، ME و CRM، مقدار نزدیک به یک برای آماره‌های R^2 و EF و کم‌تر از ۱۰ درصد بودن آماره NRMSE نشان‌دهنده کارایی بسیار خوب مدل AquaCrop، در تخمین پارمتر مورد بررسی (عملکرد محصول) خواهد بود.

$$ME = \max|P_i - O_i|_{i=1}^{n} \quad (۷)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \times 100 \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O}).(P_i-\bar{P})\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2.\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2} \quad (۱۰)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2-\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad (۱۱)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n}O_i-\sum_{i=1}^{n}P_i}{\sum_{i=1}^{n}O_i} \quad (۱۲)$$

نتایج و بحث

عملکرد

سطوح مختلف تنش شوری خاک در قالب یک مرحله (C_1، C_2 و C_3) و دو مرحله (C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3) از مراحل رشد ذرت اعمال

2- Observed, O
3- Predicted, P
4- Maximum error, ME
5 - Root of mean squared error, RMSE
6 - Normalized root of mean squared error, NRMSE
7 - Coefficient of determination, R2
8 - Efficiency of modeling, EF
9 - Coefficient of residual mass, CRM

شد. تجزیه واریانس داده‌های عملکرد زیست‌توده خشک محصول در جدول (۵) نشان داد که اثر هر کدام از تیمارهای مراحل رشد و تنش شوری بر عملکرد محصول، در سطح یک درصد معنی‌دار بوده است. اثر متقابل مرحله رشد و تنش شوری نیز در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. نتایج حاصل به‌مفهوم حساسیّت متفاوت مراحل رشد ذرت به اثر اعمال ناپیوسته (پالسی) تنش شوری می‌باشد. نتایج مذکور به طُرُق دیگر در پژوهش‌های مشابه گزارش شد. به‌طوری که در پژوهشی بر روی ذرت، تنش آبی به‌صورت جداگانه در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها اعمال شد. نتایج تحقیق نشان داد که بیش‌ترین تا کم‌ترین مقدار عملکرد محصول، به‌ترتیب مربوط به تیمارهای ۴ برگی، خمیری شدن، ۱۲ برگی و گل‌دهی بود. علت آن، میزان حساسیت و نیاز متفاوت گیاه ذرت به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد گزارش شد (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰).

جدول ٤- مقادیر واسنجی شده پارامترهای گیاهی ذرت در مدل AquaCrop

پارامتر	واحد	مقدار پارامتر	روش واسنجی
دمای پایه رشد	درجه سانتی‌گراد	۱۰	پیش‌فرض
دمای بالا	درجه سانتی‌گراد	۳۰	پیش‌فرض
تراکم بذر	بوته در هکتار	۸۰۰۰۰	اندازه‌گیری شد
زمان جوانه زنی بذر	روز	۷	اندازه‌گیری شد
پوشش گیاهی اولیه (CC_0)	درصد	۲	واسنجی شد
زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی	روز	۶۱	اندازه‌گیری شد
زمان گل‌دهی	روز	۶۴	اندازه‌گیری شد
زمان بلوغ	روز	۸۰	اندازه‌گیری شد
حداکثر پوشش گیاهی (CCx)	درصد	۸۵	واسنجی شد
بیشترین عمق مؤثر ریشه	سانتی‌متر	۶۵	اندازه‌گیری شد
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	گرم بر متر مربع	۳۵	واسنجی شد
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل ($Kc_{Tr,x}$)	-	۱/۱۵	واسنجی شد
کسر تخلیه آب خاک (حد پایین)	-	۰/۶	واسنجی شد
کسر تخلیه آب خاک (حد بالا)	-	۰/۳	واسنجی شد
شاخص برداشت مرجع (HI_0)	-	۵۵	واسنجی شد
حد پایین حساسیت به تنش شوری	دسی‌زیمنس بر متر	۲	پیش‌فرض
حد بالای حساسیت به تنش شوری	دسی‌زیمنس بر متر	۸	پیش‌فرض

جدول ۵- تجزیه واریانس صفت مورد بررسی در طرح

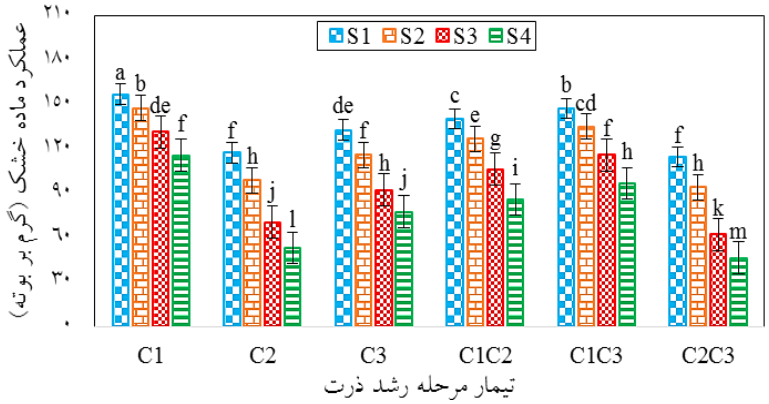
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
		عملکرد ماده خشک محصول
تکرار	۲	۲۲۴^{ns}
مرحله رشد	۵	۷۰۳۶**
تنش شوری	۳	۱۳۱۱۵**
تنش شوری× مرحله رشد	۱۵	۴۳۶*
خطا	۴۶	۱۴

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

از سوی دیگر، مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری و مرحله رشد گیاه در شکل (۲) نشان داد که در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد، بیش‌ترین تا کم‌ترین اثر تنش شوری بر کاهش عملکرد محصول، مربوط به مراحل رشد گل‌دهی (C_2)، شیری شدن دانه‌ها (C_3) و ۶ برگی (C_1) بود. به‌طوری که میزان ماده خشک تولیدی در تیمار شاهد (S_1)، ۱۵۷/۲ گرم بر بوته بود و با اعمال تنش شوری تا سطح S_4 در هریک از مراحل رشد C_1، C_2 و C_3، به‌ترتیب مقدار عملکرد به ۱۱۵/۹، ۵۳/۲ و ۷۷/۷ گرم بر بوته رسید. در این شرایط به‌ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک (از شوری S_1 تا S_4)، عملکرد محصول در تیمارهای C_1، C_2 و C_3 به‌ترتیب ۵، ۷/۸ و ۶/۷ درصد کاهش یافت. 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 ناپیوسته تنش شوری شناخته شد. زیرا اعمال یک‌باره تنش شوری در زمان گل‌دهی ذرت، باعث اختلال در عمل گرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی برای تولید بلال و دانه ذرت بود (سعیدی، ۱۴۰۱). در پژوهشی مشابه که بر روی گیاه ذرت انجام شد، اثر برهم‌کنش تنش شوری در دو فصل بهار و پاییز بررسی شد. نتایج نشان داد که شیب کاهش عملکرد محصول ذرت تحت اثر تنش شوری، در فصل پاییز (دوره میانی رشد) بیشتر از فصل بهار (دوره اولیه رشد) بود، که به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بود (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۸).

نتایج پژوهش در شکل (۲) نشان داد که تحت اثر تنش شوری تا سطح S_4، میزان عملکرد ماده خشک از ۱۵۷/۲ گرم در تیمار شاهد به ۸۶/۱، ۹۷ و ۴۶/۵ گرم بر بوته در تیمارهای C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3 رسید. به‌طوری که به‌ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک (از شوری S_1 تا S_4)، عملکرد محصول در تیمارهای C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3، به‌میزان ۶/۵۵، ۶/۰۷ و ۸/۳۲ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (شکل ۳). از مقایسه شیب کاهش عملکرد در تیمارهای یک مرحله‌ای C_2 و C_3 و دو مرحله‌ای C_1C_2 و C_1C_3 این مسئله اثبات شد که یک‌بار اعمال تنش شوری در مرحله ۶ برگی (C_1) رشد باعث سازگار شدن گیاه با تنش، در مواجهه با تنش‌های آتی شده است. به‌طوری 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 این‌باره در پژوهشی بر روی ذرت گزارش شد که اگر گیاه 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). هم‌چنین در پژوهش حاضر نشان داده شد که اگر گیاه ذرت به‌طور ناگهانی در هر دو مرحله حساس گل‌دهی و شیری شدن دانه‌ها (تیمار C_2C_3) با آب لب‌شور آبیاری شود، کاهش عملکرد محصول بیش از شرایط اعمال تنش‌های یک‌مرحله‌ای رشد (تیمارهای C_2 و C_3) خواهد بود. به‌طوری که با افزایش سطح شوری از S_1 به S_4، شدت کاهش عملکرد محصول در تیمار C_2C_3 نسبت به تیمارهای C_2 و C_3 به‌ترتیب ۵ و ۱۸ درصد افزایش یافت.



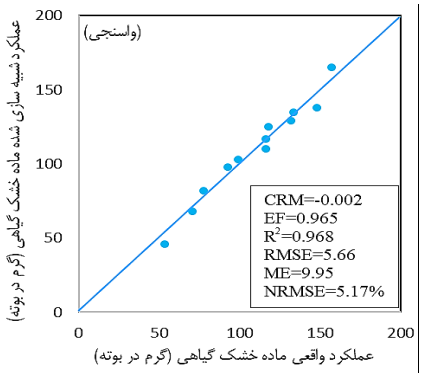
شکل ۲- مقایسه اثر متقابل تنش شوری و مرحله رشد بر مقادیر عملکرد محصول

از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که اگر ذرت یک‌بار در مراحل اولیه رشد با آب لب‌شور آبیاری شود، ظرفیت آن وجود دارد که بار دیگر در مراحل حساس رشد (مانند گل‌دهی) از آب لب‌شور برای آبیاری آن استفاده شود. در این شرایط کاهش عملکرد محصول، به‌اندازه یک‌بار اعمال تنش شوری در مرحله حساس رشد نخواهد بود. در این‌باره 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 (۵ 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 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. به‌این‌صورت که به‌جای اختلاط آب‌های شور و شیرین، بهتر است که آن‌ها در قالب دورهای تناوبی مناسب، در آبیاری مزارع استفاده شوند.

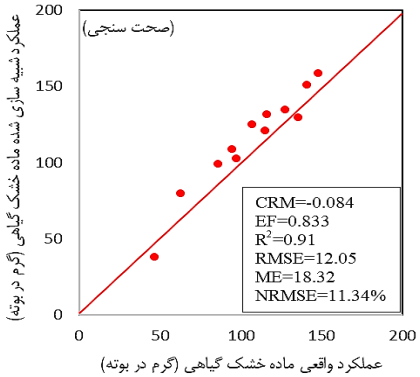
کاربرد مدل AquaCrop

بر اساس مقادیر عملکرد ذرت در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد و تحت سطوح تنش شوری، مدل AquaCrop واسنجی شد. با توجه به مقادیر آماره‌های ارزیابی واسنجی در شکل (۳)، مدل AquaCrop برای شرایط تعریف شده به خوبی واسنجی شده است. در پژوهشی مشابه بر روی ذرت در منطقه لاهیجان، مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد ماده خشک گیاه تحت مدیریت آبیاری و نیتروژن واسنجی شد. نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی مدل، مقدار آماره‌های R^2، CRM و NRMSE به‌ترتیب برابر با ۰/۹۲، ۰/۰۰۴ و ۱۰/۳۱ درصد برآورد شد (امیری و خورسند، ۱۳۹۷) که از این جهت به نتایج واسنجی در پژوهش حاضر نزدیک بود. از سوی دیگر با استفاده از مدل واسنجی شده، اقدام به شبیه‌سازی مقدار عملکرد محصول در تیمارهای دو مرحله‌ای رشد (C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3) شد. ارتباط بین داده‌های واقعی و مشاهده‌ای در شکل (۴) و آماره‌های ارزیابی مدل AquaCrop نشان داد که مدل مذکور تا حد مطلوبی توان تخمین مقدار عملکرد محصول را داشته است. ضریب تبیین (R^2) با مقدار ۰/۹۱ نشان‌دهنده همبستگی خوب بین داده‌ها بود. میزان آماره EF بیانگر کارایی مدل‌سازی قابل قبول برای شرایط پژوهش حاضر بود. آماره‌های ME و RMSE به‌ترتیب با مقادیر ۱۸/۳۲ و ۱۲/۰۵ گرم بر بوته نشان‌دهنده حداکثر خطا و ریشه میانگین مربعات خطا در فرآیند مدل‌سازی و مقدار آماره NRMSE (۱۱/۳۴ درصد) که در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد قرار داشت، نشانگر وضعیت قابل قبول مدل از نظر میزان خطای محاسباتی بود. آماره CRM با مقدار ۰/۰۸۴- نشان داد که مدل AquaCrop یک مدل بیش برآورد برای شرایط پژوهش حاضر بوده است. اما تفاوت بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده داده‌ها، ممکن است به‌علت عدم درنظر گرفتن حساسیت مرحله رشد گیاه و اثر متقابل تنش شوری در مراحل رشد ذرت بوده در این مدل باشد. زیرا مدل AquaCrop برای تخمین عملکرد محصول، از یک ساختار نسبتاً ساده محاسباتی پیروی می‌کند. به‌همین دلیل پاسخ گیاه به نحوه اعمال تنش شوری در مراحل رشد، با آنچه که توسط مدل شبیه‌سازی شد، قدری تفاوت داشته است. البته در پژوهش‌های گذشته نیز به بیش برآوردی مدل AquaCrop اشاره شده است.

به‌طوری که در پژوهشی در کشت ذرت، مقدار اجزای بیلان آب خاک توسط مدل مذکور تخمین زده شد. مقدار پارامترهای RMSE، NRMSE و R^2 در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۲/۷، ۷/۲۷٪ و ۰/۷۸ محاسبه شد. نتایج نشان داد که تمام اعداد شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، قدری بیش تخمینی داشته‌اند. ولی در مجموع عملکرد مدل در برآورد اجزای رطوبت خاک مناسب بود. پژوهشی مشابه تحت سطوح مختلف شوری آب و روش‌های آبیاری بر روی ذرت انجام شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی میزان زیست‌توده و شوری خاک دچار خطای بیش‌برآوردی شد، که البته قابل قبول بود (سرکهکی و همکاران، ۱۴۰۰ a). همچنین در پژوهشی ساختار ساده محاسبات در مدل AquaCrop، از دلایل بیش برآوردی مدل محسوب شد. اما از طرفی وجود معادلات بر پایه آب و توجه خاص به میزان آب مصرف شده در ساختار محاسباتی مدل AquaCrop سبب شد که دقت مدل در برآورد محتوای رطوبت خاک مناسب باشد (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهش دیگر تحت سطوح تنش شوری آب آبیاری و ازت خاک، همبستگی مناسب و انطباق خوب بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده عملکرد محصول، توسط مدل AquaCrop نشان داده شد (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). در مقایسه بین مدل AquaCrop و SWAP نیز گزارش شد که دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی میزان عملکرد ذرت و کارایی مصرف آب بیشتر از مدل SWAP بود (سرکهکی و همکاران، ب ۱۴۰۰). به‌طور کلی دستاورد پژوهش این بود که کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد نسبی محصول ذرت در شرایط اثر متقابل تنش شوری در مراحل مختلف رشد، نشان داده شد. درنتیجه 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 محصول وجود خواهد داشت.



شکل ۳- واسنجی مدل AquaCrop در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد (C_1، C_2 و C_3)



شکل ٤- صحت‌سنجی مدل AquaCrop در تیمارهای دو مرحله‌ای رشد (C_1C_2، C_1C_3 و C_2C_3)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، سابقه مواجهه گیاه ذرت با تنش شوری در مراحل ابتدایی رشد و اثر آن بر سازگار شدن گیاه به تنش در مراحل حساس رشد، بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان تنش شوری و اثر آن‌ها در هر یک از تیمارهای یک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای رشد بر عملکرد محصول، در سطح یک درصد معنی‌دار بود. به طوری که حساسیّت متفاوت مراحل رشد ذرت به اعمال ناپیوسته (یک و دو مرحله‌ای) تنش شوری، از دلایل آن می‌باشد. در این میان بیش‌ترین تا کم‌ترین حساسیت مرحله رشد ذرت به اعمال ناپیوسته تنش شوری، به‌ترتیب مربوط به مراحل رشد گل‌دهی، شیری شدن دانه‌ها و ۶ برگی بود. اما اعمال دو مرحله‌ای تنش شوری بسته به این‌که تنش شوری در چه مراحلی از رشد وارد شده است، نتایج مهم و متفاوتی در بر داشت. به‌طوری که با اعمال تنش شوری در دو تیمار ۶ برگی- گل‌دهی (C_1C_2) و ۶ برگی- شیری شدن دانه‌ها (C_1C_3) مشاهده شد که اثر منفی تنش شوری نسبت به تیمارهای یک مرحله‌ای گل‌دهی (C_2) و شیری شدن دانه‌ها (C_3) به‌ترتیب ۱۶ و ۷ درصد کمتر بود. پاسخ گیاه به کاربرد دو مرحله‌ای تنش شوری (تیمارهای C_1C_2 و C_1C_3)، نشان‌دهنده نوعی سازگاری فیزیولوژیکی به تنش شوری از ابتدای دوره رشد بود. از سوی دیگر واکنش گیاه به کاربرد یک مرحله‌ای تنش که به‌صورت ناگهانی و در مرحله حساس رشد انجام شد، بیانگر اثر مهم حساسیت مرحله رشد گیاه بر میزان تولید زیست‌توده گیاهی بود. البته کاربرد تنش شوری دو مرحله‌ای در مراحل حساس رشد (تیمار C_2C_3) باعث شد که بیشترین اثر منفی تنش شوری بر عملکرد محصول ایجاد شود. به‌طوری که کاهش عملکرد محصول در تیمار C_2C_3 نسبت به تیمارهای C_2 و C_3 به‌ترتیب ۵ و ۱۸ درصد بیشتر بود. این به مفهوم نامناسب بودن مراحل رشد مذکور برای اعمال تنش شوری بوده است.

در بخش دیگر، قابلیت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی میزان عملکرد محصول در شرایط پژوهش حاضر بررسی شد. به‌این صورت که ابتدا مدل مذکور برای شرایط کاربرد تنش شوری در تیمارهای یک مرحله‌ای رشد واسنجی شد. سپس با استفاده از مدل واسنجی شده، میزان عملکرد محصول در شرایط کاربرد تنش شوری ناپیوسته در دو مرحله رشد، برآورد شد و مدل AquaCrop مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. آماره‌های ارزیابی CRM، EF، R^2، RMSE، NRMSE و ME به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰۸۴-، ۰/۸۳۳، ۰/۹۱، ۱۲/۰۵، ٪۱۱/۳۴ و ۱۸/۳۲ نشان دادند که مدل AquaCrop تا حد مناسبی عملکرد محصول ذرت را شبیه‌سازی کرده است. البته حساسیت متفاوت مراحل رشد گیاه و پاسخ گیاه به نحوه کاربرد ناپیوسته تنش شوری در مراحل رشد، از جمله مواردی بود که در ساختار محاسباتی مدل AquaCrop درنظر گرفته نشده بود. به‌همین دلیل مدل AquaCrop در شرایط پژوهش حاضر، یک مدل بیش برآورد تشخیص داده شد. ولی بر اساس مقدار آماره CRM (کم‌تر از ۱۰ درصد) در ارزیابی مدل، این بیش برآوردی قابل قبول بود. نتیجه کلی این‌که با شناخت دقیق پاسخ گیاهان به تنش‌ها در مراحل مختلف رشد، می‌توان کاربرد تنش‌ها را به‌گونه‌ای مدیریت کرد که اثر تنش‌ها بر کاهش تولید ماده گیاهی در حد کمینه باشد. در این میان استفاده از مدل‌هایی مانند AquaCrop به‌منظور پیش‌بینی اثر تنش‌های کاربردی بر میزان کاهش عملکرد محصول، زمینه ذهنی مناسبی برای تصمیم‌گیری مدیران و برنامه‌ریزان فراهم می‌نماید.

منابع

امیری، ا. و خورسند، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی ماده خشک کل و عملکرد دانه ذرت، تحت مدیریت آبیاری و نیتروژن. مجله اکوفیزیولوژی گیاهی. ۱۰(۳۳): ۱۷۴-۱۸۵.

بابازاده، ح. و سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم‌آبیاری سویا. مجله آب و خاک. ۲۶(۲):

۳۳۹-۳۲۹.

بذرافشان، ا.، شرفا، م.، محمدی، م. ح. و ذوالفقاری، ع. ا. ۱۳۹۸. پاسخ ذرت به تنش شوری با استفاده از مدل‌های جذب آب در فصول مختلف. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۹): ۲۱۷۱-۲۱۸۲.

حسن‌لی، م.، افراسیاب، پ. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶(۳): ۴۸۷-۴۹۸.

حیدری‌نیا، م.، برومند نسب، س.، ناصری، ع. ع. و الباجی، م. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت و شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری با آب شور. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۸(۱): ۵۰-۶۱.

خلیلی، ن.، داوری، ک.، علیزاده، ا.، کافی، م. و انصاری، ح. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل گیاهی آکواکراپ، مطالعه موردی ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم سیساب، خراسان شمالی. مجله آب و خاک. ۲۸(۵): ۹۳۰-۹۳۹.

دهقانی، ا.، کاظمینی، س. ع.، زارعی، م. و علی‌نیا، م. ۱۳۹۶. تأثیر تنش شوری و قارچ میکوریزا بر ویژگی های مورفوفیزیولوژیک گیاه ذرت شیرین. نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی. ۷(۱): ۱۰۱- ۱۱۳.

دهقانی سانیج، ح.، کنعانی، ا. و اخوان، س. ۱۳۹۶. ارزیابی تبخیر-تعرق ذرت و اجزای آن و ارتباط آن‌ها با شاخص سطح برگ در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. مجله آب و خاک. ۳۱(۶): ۱۵۴۹-۱۵۶۰.

رنجبر، ا.، رحیمی خوب، ع. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۶. ارزیابی روش نیمه‌کمی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی پاسخ ذرت به کود نیتروژن. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۱۱): ۲۸۶-۲۹۸.

سرکهکی، ا.، اگدرنژاد، ا. و مینایی، س. الف ۱۴۰۰. تعیین دقت و کارایی دو مدل گیاهی آب‌محور و کربن‌محور برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب ذرت. نشریه علوم آب و خاک. ۳۵(۱): ۱۴۱-۱۵۶.

سرکهکی، ا.، اگدرنژاد، ا. و مینایی، س. ب ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب در کشت ذرت با مدیریت های مختلف آبیاری تحت تنش شوری. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵(۱): ۱۳۳-۱۴۷.

سرکهکی، ا.، اگدرنژاد، ا. و مینایی، س. ۱۴۰۱. تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای رشد گیاه ذرت تحت تنش شوری در روش‌های مختلف آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۴): ۷۲۷-۷۳۸.

سعیدی، ر.، رمضانی اعتدالی، ه.، ستوده‌نیا، ع.، کاویانی، ع. و ب. نظری. ۱۳۹۷. تعیین روابط بین عملکرد و تبخیر-تعرق ذرت علوفه‌ای، در شرایط تنش شوری و محدودیت نیتروژن. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲(۳): ۳۵۱-۳۶۶.

سعیدی، ر.، سلطانی، م.، لیاقت، ع. و ستوده‌نیا، ع. ۱۳۹۸. تأثیر شوری بر عملکرد ذرت در مراحل مختلف رشد. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۸): ۱۹۷۵-۱۹۸۳.

سعیدی، ر. الف 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.

سعیدی، ر. ب ۱۴۰۰. جداسازی تبخیر و تعرق در کشت ذرت و بررسی پاسخ آن‌ها به سطوح مختلف آبیاری. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۵): ۱۲۶۳-۱۲۷۳.

سعیدی، ر. و ستوده‌نیا، ع. ۱۴۰۰. واکنش عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت، تحت تأثیر تنش آبی در مراحل مختلف رشد (در دشت قزوین). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۳): ۶۱۱- ۶۲۰.

سعیدی، ر.، رمضانی اعتدالی، ه.، ستوده‌نیا، ع.، نظری، ب. و کاویانی، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی. مجله تنش‌های محیطی. ۱۴(۱): ۱۹۵-۲۱۰.

سعیدی، ر. ۱۴۰۱. تعیین ضریب تنش شوری در مراحل مختلف رشد ذرت علوفه‌ای. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۳۶(۱): ۷۵- ۹۲.

ضیائی، غ.، بابازاده، ح.، عباسی، ف. و کاوه، ف. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۴۳۵-۴۴۵.

محمدی، ح.، ایمانی، ا.، اصغری، م. ر.، طلایی، ع. و عبدوسی، و. ۱۴۰۰. بررسی اثرات تنش شوری آب آبیاری و اسید سالیسیلیک بر عناصر غذایی برگ در سه رقم بادام پیوندی. مجله فرآیند و کارکرد گیاهی. ۱۰(۴۱): ۵۳-۷۵.

مولوی، ح.، محمدی، م.، و لیاقت، ع. ۱۳۹۱. اثر مدیریت آب شور طی دوره رشد بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه ای و پروفیل

شوری خاک. مجله علوم مهندسی و آبیاری. ۳۵(۳): ۱۱-۱۸.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage. 56: 1-326.

Ayers, R. S., and Westcott. D. W. 1985. Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage. 29: 31.

Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A. and Kadambot, H. M. 2015. Salt stress in maize: effects, resistance mechanisms, and management. Institute national de la recherché agronomies (INRA). 35: 461-481.

Nielsen, R. L. 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. Journal of Agronomy (Purdue). 196: 19-25.

Saeidi, R., Ramezani Etedali, H., Sotoodenia, A., Kaviani, A. and Nazari, B. 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.

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. 1-15.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 17, Oct.-Nov. 2023, p. 743-757

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۷، مهر - آبان ۱۴۰۲، ص. ۷۵۷-۷۴۳

Evaluation of the AquaCrop Model for Conditions of Interaction Effect of Salinity Stress in Different Growth Stages of Maize (in Qazvin Region)

R. Saeidi[1] *

Recived: Feb.09, 2023 Accepted: Jun.14, 2023

Abstract

The knowledge of crops response to salinity stress application methods in growth stages, can lead to better management of stresses. This research was done on the S.C 704 maize, in the mini-lysimeter space and in Qazvin region. The experiment was performed factorial and in a completely randomized design. The salinity treatments of soil saturated extract (the main factor) were applied at four levels of 1.7(S_1), 3(S_2), 5(S_3) and 7(S_4) $dS.m^{-1}$. The crop growth stage treatments (sub-factor) were defined as one-stage of 6 leaves (C_1), flowering (C_2), seeds milking (C_3) and two-stages of C_1C_2, C_1C_3 and C_2C_3. The research target was to simulate the maize yield by AquaCrop model, in conditions of pulsed salinity stress application in crop growth stages. The stress application data in one and two growth stages, were used for calibration and evaluation the AquaCrop model, respectively. From S_1 to S_4 treatment, the crop dry matter was decreased from 157.2 g. $plant^{-1}$ to 115.9, 53.2, 77.7, 86.1, 97 and 46.5 g. $plant^{-1}$ in the C_1, C_2, C_3, C_1C_2, C_1C_3 and C_2C_3 treatments, respectively. The sudden application of salinity stress in a sensitive growth stage (C_2 and C_3 treatments), was caused the more damage relative to C_1C_2, C_1C_3 treatments. Because once application of salinity stress in the 6-leaf stage (C_1) has caused the crop adaptation to future stresses (increasing the tolerance threshold). In AquaCrop model evaluation, the statistical parameters of CRM, EF, R^2, RMSE, NRMSE and ME were equal to -0.084, 0.833, 0.91, 12.05, 11.34% and 18.32, respectively. Those showed good accuracy of AquaCrop model in simulation the maize yield. As a result, by management the salinity stress in crop growth stages, will be reduced the negative effects on the maize yield. With simulation the crop yield by AquaCrop model, different stress application states can be evaluated.

Keywords: Growth stage sensitivity, Simulation, Yield

1- Ph.D. of irrigation and drainage engineering, department of water engineering, faculty of agriculture and natural resources, Imam Khomeini international university, Qazvin, Iran
(*-Corresponding author email: saeidi@org.ikiu.ac.ir)