

اثر تنش خشکی و شوری در برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر-تعرق دوره‌ای، با استفاده از مدل‌های مختلف

رضا سعیدی^۱

دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
saeidi@org.ikiu.ac.ir

دریافت: تیر ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

تعیین حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت نسبت به تنش‌های محیطی، اثر مهمی بر مدل‌سازی دقیق‌تر عملکرد محصول می‌گذارد. در این پژوهش، اثر تنش‌های خشکی و شوری بر تبخیر-تعرق نسبی (در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد) و عملکرد نسبی ذرت در مزرعه‌ای با خاک لومی شنی بررسی شد. تیمارهای شوری از طریق آب دارای هدایت الکتریکی (S_0) ، (S_1) ، (S_2) و (S_3) دسی زیمنس بر متر اعمال شد. تیمارهای خشکی نیز شامل چهار سطح آبیاری بر اساس (I_0) ، (I_1) ، (I_2) و (I_3) نیاز آبی گیاه ذرت در نظر گرفته شد. آزمایش به صورت فاکتوریل، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار انجام شد. مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب بین $100 - 63/5\%$ ، $100 - 62/6\%$ ، $100 - 55/2\%$ و $100 - 66/4\%$ برآورد شد. مقدار عملکرد نسبی ذرت نیز در تیمارهای I_0S_0 تا I_3S_3 بین $100 - 42/6\%$ محاسبه شد. نتایج نشان داد تنش‌های شوری و خشکی باعث کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت شد و همچنین در مراحل حساس رشد، تبخیر-تعرق با شیب بیشتری کاهش یافت. اعمال تنش‌های مذکور در مراحل حساس رشد باعث اختلال در گل‌دهی و میوه‌دهی ذرت شد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های جمع‌پذیر بلنک، استوارت، سینگ و مدل‌های ضرب‌پذیر جنسن، رائو و مینهاس، عملکرد نسبی ذرت مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد، مدل استوارت با ضرایب حساسیت (در چهار مرحله رشد) برابر با $0/227$ ، $0/416$ ، $0/604$ ، $0/14$ و مدل جنسن با ضرایب حساسیت $0/301$ ، $0/41$ ، $0/608$ ، $0/147$ به‌عنوان مدل‌های بهینه انتخاب شدند. اما مدل‌های رائو، بلنک، سینگ و مینهاس در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. بنابراین در شرایط تنش‌های شوری و خشکی، عملکرد نسبی ذرت بر اساس مقدار تبخیر-تعرق آن در مراحل رشد مدل‌سازی شد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق نسبی، ضرایب حساسیت، عملکرد نسبی، مدل‌های تجربی، مراحل رشد

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

برآورد دقیق نیاز آبی واقعی گیاه مبتنی بر شرایط محیطی منطقه تحت کشت، مُنجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود. در هر منطقه‌ای ممکن است عواملی در قالب تنش‌های محیطی باعث کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده گیاه شوند. لذا با در نظر گرفتن اثر تنش‌ها در شرایط غیراستاندارد محیطی، از مصرف بیش‌ازاندازه آب در آبیاری جلوگیری به عمل می‌آید (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). البته اثر کاهش تنش‌ها بر تبخیر-تعرق گیاهان در مراحل مختلف رشد متفاوت است (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰)؛ اما با شناخت دقیق حساسیت درون‌فصلی تبخیر-تعرق گیاهان نسبت به تنش‌های محیطی و مدیریتی، می‌توان عملکرد محصول را بر اساس آن مدل‌سازی کرد و مدلی تجربی مطابق آن ارائه نمود. تنش‌های شوری و خشکی از جمله تنش‌هایی هستند که در محیط کشت گیاه، تبخیر-تعرق و عملکرد آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این رو در زراعت گیاهان زیر کشت آبی با نیاز آبی بالا (مانند ذرت)، ارائه راه‌کار عملی برای مدیریت کم‌آبایی و استفاده بهینه از آب‌های نامتعارف شور اهمیت زیادی دارد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی گزارش شد که دوره رشد ذرت شامل مراحل استقرار گیاهیچه، مرحله رشد سریع، گرده‌افشانی و پُر شدن دانه است که از لحاظ فرایندهای فیزیولوژیکی و حساسیت گیاه، متفاوت می‌باشد. به طوری که اعمال تنش خشکی در مراحل مذکور، تأثیر متفاوتی بر روی مقدار عملکرد محصول دارد (نیلسن، ۲۰۰۲). در پژوهش دیگر در منطقه شاهرود، اثر تنش خشکی در قالب حذف یک مرحله آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بررسی شد. عملکرد زیست‌توده تر ذرت در تیمارهای مذکور به ترتیب برابر با ۶۸، ۶۲/۲ و ۶۶/۴۷ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده اثر بیشینه تنش خشکی بر کاهش عملکرد محصول در مرحله گل‌دهی بود. به دلیل توقف رشد رویشی و ورود گیاه به مرحله زایشی، حساسیت گیاه ذرت در مرحله گل‌دهی از سایر مراحل رشد

بیشتر است (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶). در پژوهشی بر روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در استان فارس، تنش خشکی در سطح ۲۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، در مراحل رشد استقرار تا ظهور گل تاجی، ظهور گل تاجی تا خمیری شدن دانه و از خمیری شدن دانه تا رسیدگی کامل اعمال شد. نتایج نشان داد اعمال تنش ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رشد رویشی، آسیب جبران‌ناپذیری بر عملکرد محصول وارد آورد. همچنین مرحله گل‌دهی و اوایل پرشدن دانه، حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به تنش خشکی شناخته شد (همتی و همکاران، ۱۳۹۳). علاوه بر عملکرد محصول، اعمال یک حد ثابت از تنش خشکی در مراحل رشد چهار برگگی، ۱۲ برگگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌های گیاه ذرت، تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق گیاه داشت. نتایج نشان داد کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق مربوط به مرحله گل‌دهی بود که علت آن حساسیت بیشتر ذرت به تنش خشکی در این مرحله رشد می‌باشد (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). از سوی دیگر با افزایش تنش شوری در منطقه توسعه ریشه گیاه، پتانسیل آب موجود در خاک کاهش یافته و جذب آب توسط گیاه کم شد. از این رو با کاهش کیفیت آب آبیاری از طریق افزایش شوری از ۰/۵ به ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر، مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه ذرت به ترتیب ۳۱ و ۶۰ درصد کاهش یافت (لاکردا و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهشی دیگر گزارش شد تنش شوری باعث کاهش رشد برگ و کاهش انرژی لازم برای فتوسنتز گیاه شد. در نتیجه از تشکیل اندام گیاهی، رشد محصول و مصرف آب توسط گیاه کاسته شد (شین و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیق دیگر با اعمال سه تیمار شوری آب برابر با $(S_1) 0/6$ ، $(S_2) 2$ و $(S_3) 4$ دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح آبیاری $(I_1) 100$ ، $(I_2) 75$ و $(I_3) 50$ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش شوری آب از سطح S_1 به S_3 و کاهش مقدار آبیاری از سطح I_1 به I_3 ، به ترتیب ۱۲ و ۴۳ درصد از مقدار تعرق ذرت کاهش یافت. همچنین بهره‌وری مصرف آب برای دانه ذرت از تیمار S_1 به S_3 با کاهش ۲۶ درصدی همراه بود

رشد مورد مطالعه قرار گرفت و مدل‌سازی عملکرد نسبی ذرت براساس اجزای تبخیر-تعرق در مراحل رشد انجام شده است. با این کار حساسیت تبخیر-تعرق گیاه ذرت در مراحل مختلف رشد تعیین شد و مدلی جامع‌تر برای تخمین عملکرد محصول در شرایط تحت تنش معرفی شد.

مواد و روش‌ها

تشریح کلیات پژوهش

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۹ و در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. محل مطالعه در منطقه قزوین با اقلیم نیمه‌خشک سرد و در موقعیت جغرافیایی با طول شرقی $50^{\circ}07'$ و عرض شمالی $36^{\circ}19'29''$ قرار دارد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد 3×3 متر و با فاصله دو متر از هم کاشته شد. بذرها با تراکم 80000 بوته در هکتار و در کرت‌های محصور، به روش جویچه‌ای کاشته شد. هر کرت دارای پنج ردیف کشت با فاصله ۶۰ سانتی‌متر از هم بود و به‌صورت غرقابی آبیاری شد. آب لازم برای آبیاری از آب چاه با هدایت الکتریکی $0/5$ دسی‌زیمنس بر متر و اسیدپتِه $7/1$ تأمین شد. با توجه به هدف برداشت علوفه‌ای محصول ذرت، تاریخ کاشت و برداشت به ترتیب $1399/03/15$ و $1399/08/01$ و دوره رشد گیاه ۱۴۰ روز در نظر گرفته شد. علت ۱۴۰ روزه بودن دوره رشد این بود که در گزارش فائو ۵۶، مراحل رشد اولیه ۱، توسعه ۲، میانی ۳ و پایانی ۴ ذرت به ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز (جمعاً ۱۴۰ روز) اعلام شده بود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). از این‌رو طول دوره رشد مربوط به زمان کاشت و برداشت محصول در پژوهش حاضر، بر اساس گزارش فائو ۵۶ تطبیق داده شده است. در طول دوره رشد گیاه، مقدار بارندگی بسیار ناچیز بود و از سوی ایستگاه هواشناسی منطقه، گزارشی در مورد بارندگی در این بازه زمانی داده نشد. از این‌رو نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق انجام آبیاری تأمین شد. از طریق آزمایش خاک، مشخصات

(عزیزیان و سپاسخواه، ۲۰۱۴)؛ اما همانند تنش خشکی، حساسیت متفاوتی به تنش شوری در مراحل رشد گیاه ذرت وجود دارد. به طوری که اثر چهار سطح شوری آب شامل $0/5$ ، $2/1$ ، $3/5$ و $5/7$ دسی‌زیمنس بر متر، باعث کاهش ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) از عدد ۱ به $0/57$ طی مراحل مختلف رشد ذرت در منطقه قزوین گزارش شده است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). پژوهش‌های گذشته نشان داد که تنش‌های خشکی و شوری، هر دو از عوامل محدودکننده جذب آب و تعرق گیاه به‌شمار می‌روند. البته اثر زیانبار تنش‌های مذکور در مراحل مختلف رشد گیاه می‌تواند متفاوت باشد. از این‌رو با مدیریت تنش‌ها و حذف یا کاهش اثر آن‌ها در مراحل حساس رشد، می‌توان تبخیر-تعرق و عملکرد محصولات را در راستای افزایش بهره‌وری مصرف آب، مدیریت نمود. همچنین در شرایط وجود تنش‌های خشکی و شوری، از طریق کمی نمودن مقدار حساسیت گیاه در مراحل رشد، می‌توان مقدار عملکرد محصول را بر اساس مقدار تبخیر-تعرق گیاه تخمین زد. در پژوهش‌های گذشته و در شرایط تنش خشکی، مدل‌های بلنک (بلنک، ۱۹۷۵)، استوارت (استوارت و همکاران، ۱۹۷۶)، سینگ (سینگ و همکاران، ۱۹۸۷)، جنسن (جنسن، ۱۹۶۸)، راثو (راثو و همکاران، ۱۹۸۸) و مینهاس (مینهاس و همکاران، ۱۹۷۴)، برای تخمین عملکرد محصول از روی مقدار تبخیر-تعرق گیاه طی دوره رشد، ارائه شده است؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی عملکرد ذرت بر اساس تبخیر-تعرق دوره‌ای در شرایط تنش‌های شوری و خشکی، با استفاده از مدل‌های مذکور می‌باشد. لازم به ذکر است در پژوهش‌های گذشته اثر تنش‌های محیطی (مانند شوری و حاصلخیزی) بر عملکرد و تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد بررسی شده است و مدل‌سازی عملکرد محصول بر اساس مقدار تبخیر-تعرق در کل دوره رشد صورت گرفته است؛ اما در پژوهش حاضر و تحت تنش‌های شوری و خشکی، مقدار تبخیر-تعرق ذرت علوفه‌ای به‌صورت مجزا و جداگانه، در مراحل مختلف

شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰). از این‌رو آب شور تولید شده، ماهیت آب شور طبیعی را داشت. قبل از هر نوبت آبیاری، مقدار مورد نیاز آب شور بر اساس شوری مدنظر در تیمارها، در مخازن بزرگ تهیه شد و پس از کنترل هدایت الکتریکی (EC^e) مورد استفاده قرار گرفت. تیمارهای خشکی نیز شامل چهار سطح آبیاری بر اساس (I_0) ، (I_1) ، (I_2) ، (I_3) و (I_4) درصد نیاز آبی گیاه ذرت در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد ۱۶ تیمار در سه تکرار، به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. داده‌های پژوهش شامل مقادیر تبخیر-تعرق در دوره رشد گیاه و عملکرد نهایی زیست‌توده بود که تجزیه واریانس و مقایسه میانگین آن‌ها توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

فیزیکی و شیمیایی اعماق خاک مزرعه در جدول ۱ ارائه شد و نیازهای کودی گیاه براساس آن توصیه شد. تیمارهای پژوهش با هدف اعمال تنش‌های شوری و خشکی بر گیاه انتخاب شدند. تیمارهای شوری از طریق آب آبیاری در چهار سطح با هدایت الکتریکی (S_0) ، (S_1) ، (S_2) و (S_3) دسی‌زیمنس بر متر اعمال شدند. تیمارهای شوری با توجه به پتانسیل ۱۰۰، ۹۰، ۷۵ و ۵۰ درصدی عملکرد ذرت در شوری‌های مذکور (برای آب آبیاری) انتخاب شد (دورنبوس و پریوت، ۱۹۷۷). آب شور مورد نیاز برای آبیاری، از طریق اضافه کردن نمک صنعتی به آب باکیفیت چاه تهیه شد. عناصر موجود در نمک صنعتی شامل سدیم، کلسیم، منیزیم، سولفات و پتاسیم با درجه خلوص به ترتیب برابر با ۹۲، ۳/۸۴، ۱/۸۹، ۱/۷۳ و ۰/۵۴ درصد بودند. در پژوهش‌های گذشته وجود عناصر مذکور در آب‌های شور طبیعی ۵۰ نقطه از منطقه قزوین گزارش

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

پارامتر	واحد	عمق خاک (سانتی‌متر)		
		۰-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰-۹۰
هدایت الکتریکی اولیه عصاره اشباع خاک	$dS.m^{-1}$	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۵۵
اسیدیته خاک (pH)	-	۷/۳	۷/۳	۷/۴
بافت خاک	-	لوم شنی	لوم شنی	لوم شنی
رس	%	۱۰	۸	۱۱
سیلت	%	۳۳	۲۵	۲۷
شن	%	۵۷	۶۷	۶۲
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	۲۴	۲۳	۲۴
رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دائم	%	۱۳	۱۲	۱۲/۵
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	۱/۳۳	۱/۴	۱/۳۷
نیترژن کل	%	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۶
پتاسیم قابل جذب	p.p.m	۲۷۲	۱۶۳	۱۲۱
فسفر قابل جذب	p.p.m	۵	۳	۲
کربن آلی	%	۰/۰۹	۰/۱	۰/۰۳

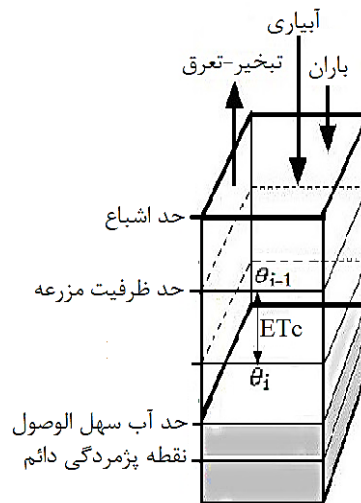
کارگذاری لوله‌های مخصوص دستگاه TDR در عمق یک متری از سطح زمین، امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک تا عمق مذکور را فراهم نمود. قبل از شروع آزمایش، اعداد قرائت شده توسط دستگاه TDR نسبت به مقادیر واقعی رطوبت وزنی خاک واسنجی شدند. به این صورت که برای هر داده‌ی واقعی رطوبت خاک (از حد اشباع تا حالت

اندازه‌گیری تبخیر-تعرق

در این پژوهش رطوبت عمق خاک منطقه ریشه گیاه، به صورت روزانه با دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR^v) مدل TRIME-FM اندازه‌گیری شد. به منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، محل برداشت داده‌های رطوبت خاک در مرکز سطح کرت‌ها تعیین شد. از سوی دیگر

پژوهش حاضر متوسط عمق توسعه ریشه ذرت، عدد ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (ابراهیمی‌زاده و حسن‌لی، ۱۳۸۷) که با اندازگیری عمق ریشه در پایان دوره رشد از طریق حفر گودال در خاک مزرعه مطابقت داشت. از سوی دیگر با توجه به نبود درز و ترک در اعماق خاک و یا جریان‌های ترجیحی در آن، اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خاک (منطقه ریشه) در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرایند تبخیر-تعرق گیاهان بوده است.

خشک)، یک داده نیز توسط دستگاه ثبت شد. سپس در یک نمودار، داده‌های واقعی در محور عمودی و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد. از این رو یک خط بین داده‌ها برازش داده شد و منحنی اِشِل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی تشکیل داده شد. در این شرایط از طریق پایش روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه و محاسبه بیلان آب (شکل ۱) در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه توسط رابطه (۱) فراهم شد. در



شکل ۱- بیلان آب خاک تحت تأثیر تبخیر-تعرق گیاه

سرعت جریان آب خاک به سمت ریشه گیاه برای تأمین آب مورد نیاز تعرق کاهش می‌یابد. با کاهش رطوبت خاک نسبت به حد RAW، گیاه وارد فاز تنش خشکی می‌شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). برای اندازه‌گیری مقدار حد RAW از رابطه (۲) استفاده شد.

$$RAW = \frac{\theta_{FC} - \theta_i}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، RAW: حد آب سهل‌الوصول، θ_{FC} : رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_i : رطوبت وزنی خاک (درصد) در زمان انجام آبیاری و θ_{PWP} : رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) می‌باشد.

لازم به ذکر است حد آب سهل‌الوصول خاک برای گیاه ذرت، در طول دوره رشد مقدار ثابتی نداشته و بین ۴۰

$$(ET_c)_i = \frac{(\theta_{i-1} - \theta_i)}{100} \cdot \rho_b \cdot D_{rz} \quad (1)$$

$(ET_c)_i$: تبخیر-تعرق روزانه گیاه (cm)، θ : مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i : شمارنده روزهای بین دو آبیاری، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρ_b : چگالی ظاهری خاک ($g \cdot cm^{-3}$)، D_{rz} : عمق توسعه ریشه گیاه (cm).

تعیین زمان و حجم آب آبیاری

زمان انجام آبیاری گیاهان بر اساس زمان اتمام آب سهل‌الوصول خاک (RAW^8) در تیمار آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) تعیین شد. این نقطه رطوبتی کسری از رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC^9) و نقطه پژمردگی دائم (PWP^{10}) است که با رسیدن به آن،

10- Permanent Wilting Point

8 - Readily Available Water

9 - Field Capacity

نسبی محصول ($\frac{Y_s}{Y_m}$) بر اساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی گیاه در مراحل رشد ($\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}$) و در شرایط تیمارهای مختلف تنش‌های شوری و خشکی بود. در این شرایط، پارامترهای تبخیر-تعرق نسبی در مراحل رشد به‌عنوان متغیرهای مستقل و پارامتر عملکرد نسبی به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. برای هدف مذکور، از روابط (۴) الی (۹) که به‌ترتیب شامل مدل‌های جمع‌پذیر بلنک، استوارت، سینگ و مدل‌های ضرب‌پذیر جنسن، راثو و مینهاس استفاده شد؛ بنابراین لازم بود که ضرایب حساسیت درون‌فصلی تبخیر-تعرق در مدل‌ها، مدل‌سازی شده و مدل بهینه برای تخمین عملکرد در شرایط تنش‌های شوری و خشکی معرفی شود. با استفاده از مقادیر واقعی تبخیر-تعرق و عملکرد محصول، ضرایب حساسیت در هر مدل به‌وسیله نرم‌افزار SPSS برآورد شد. به‌طور کلی در هر مدل، تعداد چهار ضریب حساسیت (مربوط به چهار مرحله رشد ذرت)، برای تعداد ۱۶ تیمار مورد نظر در این پژوهش مدل‌سازی شد.

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n B_i \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n C_i \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (7)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - \gamma_i \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \right) \quad (8)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right)^{\delta_i} \quad (9)$$

در روابط (۴) الی (۹)؛ Y_s : عملکرد ذرت در تیمارهای مختلف شوری و خشکی ($kg \cdot ha^{-1}$)؛ Y_m : عملکرد بیشینه ذرت در شرایط استاندارد یا تیمار I_0S_0 ($kg \cdot ha^{-1}$)؛ ET_s : تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مختلف شوری و خشکی (mm)؛ ET_m : تبخیر-تعرق بیشینه ذرت در شرایط استاندارد یا تیمار I_0S_0 (mm)؛ i : شمارنده مراحل

تا ۸۰ درصد گزارش شده است (جاراللهی، ۱۳۸۰). در این شرایط برای اطمینان از این‌که به گیاهان شاهد (تیمار آبیاری کامل) در حساس‌ترین دوره رشد هم تنش آبی وارد نمی‌شود، حد آب سهل‌الوصول خاک مقدار ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کرت شاهد، عملیات آبیاری انجام شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به‌ترتیب تحت فشارهای مکشی یک سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. حجم آب آبیاری در تیمارهای I_1 ، I_2 و I_3 به‌ترتیب مقدار ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد حجم آب در تیمار I_0 در نظر گرفته شد؛ اما حجم آب آبیاری در تیمار I_0 (آبیاری کامل)، با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک (در زمان اتمام حد سهل‌الوصول) تا حد FC ، عمق مؤثر ریشه و مساحت خاک کرت، بر اساس رابطه (۳) تعیین شد. برای آبیاری کرت‌ها، آب از مخازن تیمارها توسط شیلنگ و به‌صورت غرقابی به کرت‌ها داده شد و مقدار حجم آب با کنتور حجمی کنترل شد. لازم به‌ذکر است که آب به شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع شد و با توجه به کفایت آب برای منطقه ریشه، محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌ها و عدم ایجاد رواناب، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد در نظر گرفته شد.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_i)}{100} \cdot \rho_b \cdot D_{rz} \cdot A \quad (3)$$

V : حجم آب آبیاری (m^3)؛ θ_{FC} : رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)؛ θ_i : رطوبت وزنی خاک در زمان اتمام آب سهل‌الوصول خاک و قبل از انجام آبیاری (درصد)؛ ρ_b : چگالی ظاهری خاک ($g \cdot cm^{-3}$)؛ D_{rz} : عمق مؤثر ریشه گیاه (m) و A : مساحت کرت (m^2).

معرفی مدل‌های کاربردی

در پژوهش‌های گذشته گزارش شد که تنش‌های شوری و خشکی، بر مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد محصول ذرت تأثیرگذار بود. هدف از این پژوهش، تخمین عملکرد

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (12)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - t - 1} \quad (13)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

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

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق نسبی

مقدار تبخیر-تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش‌های خشکی و شوری، در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری شدند. هر دو عامل خشکی و شوری باعث کاهش تبخیر-تعرق نسبت به شرایط استاندارد (تیمار I₀S₀) شد. مقدار تبخیر-تعرق از تیمار I₀S₀ تا I₃S₃ (بیشترین تا کم‌ترین مقدار تنش)، در بازه ۷۸/۷ تا ۵۰ میلی‌متر (در مرحله اولیه رشد)، ۲۰/۱ تا ۱۲۶ میلی‌متر (در مرحله توسعه)، ۱۲۷/۵ تا ۷۰/۴ میلی‌متر (در مرحله میانی رشد) و ۱۴ تا ۹/۳ میلی‌متر (در مرحله پایانی رشد) قرار داشت. به‌طوری که مقدار تبخیر-تعرق در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد، به‌ترتیب ۲۸/۷، ۷۵/۲، ۵۷/۱ و ۴/۷ میلی‌متر نسبت به تیمار I₀S₀ کاهش یافت. کاهش مقدار و پتانسیل آب موجود در خاک، از علل کاهش جذب آب و مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت تنش‌های مذکور بود. با توجه به هدف پژوهش، مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت (نسبت به شرایط استاندارد منطقه) در تیمارهای مختلف بین ۱۰۰-۶۳/۵ درصد (مرحله اولیه)، ۱۰۰-۶۲/۶ درصد (مرحله توسعه)، ۱۰۰-۵۵/۲ درصد (مرحله میانی) و ۱۰۰-۶۶/۴ درصد (مرحله پایانی) برآورد شد (شکل ۲). تأثیر دو عامل شوری و خشکی و اثر متقابل آن‌ها در تمام مراحل رشد باعث کاهش و ایجاد تفاوت معنی‌دار در مقدار تبخیر-تعرق

رشد ذرت، n: تعداد مراحل رشد ذرت که در این پژوهش برابر با عدد چهار است، A_i: ضریب حساسیت به تنش در مدل بلنک (بلنک، ۱۹۷۵)، B_i: ضریب حساسیت به تنش در مدل استوارت (استوارت و همکاران، ۱۹۷۶)، C_i: ضریب حساسیت به تنش در مدل سینگ (سینگ و همکاران، ۱۹۸۷)، λ_i: ضریب حساسیت به تنش در مدل جنسن (جنسن، ۱۹۶۸)، γ_i: ضریب حساسیت به تنش در مدل رائو (رائو و همکاران، ۱۹۸۸) و δ_i: ضریب حساسیت به تنش در مدل مینهاس (مینهاس و همکاران، ۱۹۷۴) می‌باشد.

ارزیابی مدل‌ها

در این مرحله با استفاده از مدل‌های تولید شده در پژوهش، عملکرد نسبی تحت تنش‌های شوری و خشکی تخمین زده شد. سپس با داشتن داده‌های (عملکرد نسبی) مشاهده‌ای در مزرعه و تخمین زده شده توسط مدل‌ها، اعتبار مدل‌های مختلف ارزیابی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا^{۱۱} (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۲} (RMSE)، ضریب تعیین^{۱۳} (R²)، ضریب تعیین تنظیم شده^{۱۴} (R²_{adj})، کارایی مدل‌سازی^{۱۵} (EF) و ضریب باقیمانده^{۱۶} (CRM) استفاده شد. معادلات مربوط به آماره‌های مذکور در روابط (۱۰) الی (۱۵) ارائه شد. حداقل (نزدیک به صفر) بودن آماره‌های ME، RMSE و CRM و نزدیک به یک بودن آماره‌های R²، R²_{adj} و EF، نشان‌دهنده همبستگی بهتر بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی است. در روابط (۱۰) الی (۱۵)، حروف O^{۱۷} و P^{۱۸} به‌ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده‌ای در مزرعه و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها بود. حروف n و t نیز به‌ترتیب بیانگر تعداد تیمارها و تعداد فاکتورها (شوری و خشکی) بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (10)$$

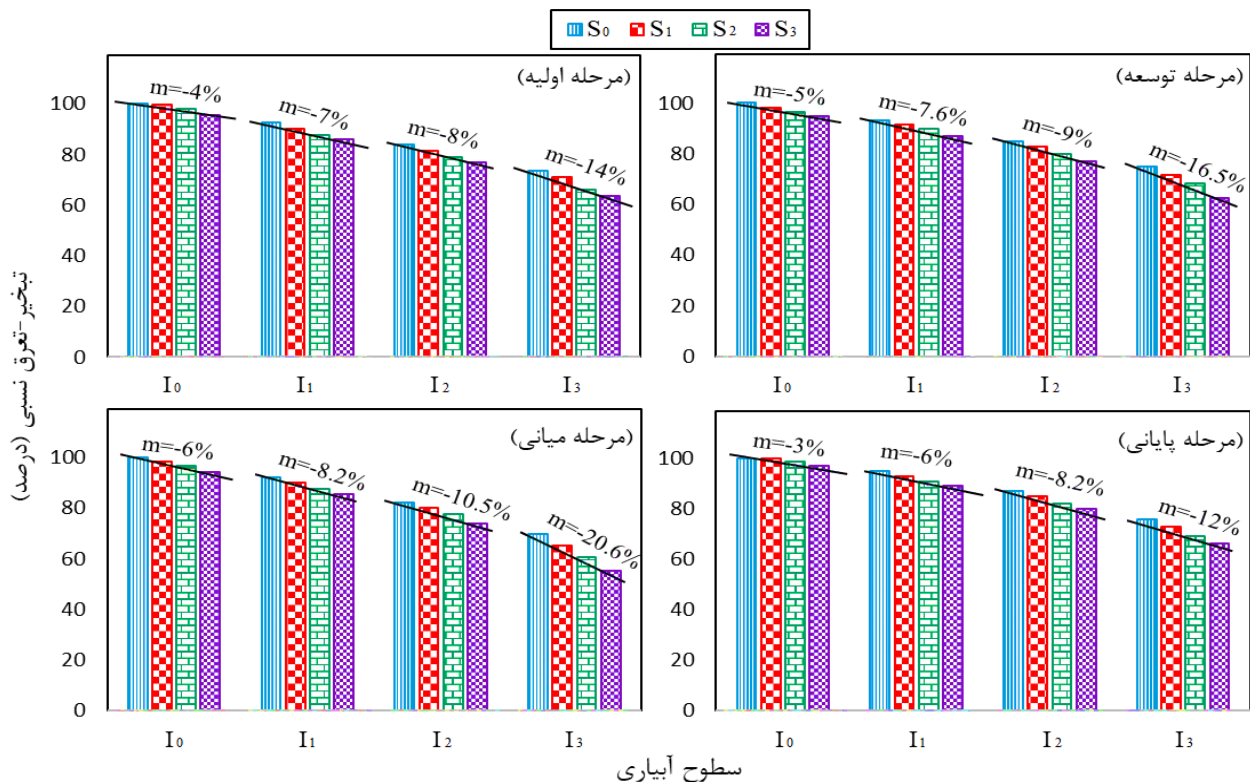
$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

15 - Efficiency of modeling
 16 - Coefficient of residual mass
 17 - Observed
 18 - Predicted

11 - Maximum error
 12 - Root of mean squared error
 13 - Coefficient of determination
 14 - Adjusted coefficient of determination

شد. افزایش غلظت املاح در خاک در اثر آبیاری با آب شور، علت کاهش قابلیت جذب آب توسط گیاه و کاهش تبخیر-تعرق ذرت بود (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی دیگر در منطقه قزوین، مقدار تبخیر-تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد بررسی شد. تیمارها شامل اعمال تنش آبی در مراحل رشد چهار برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی، خمیری شدن دانه‌ها و یک تیمار شاهد تحت آبیاری کامل بود. مقدار تبخیر-تعرق نسبی در مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با ۸۶/۸، ۶۹/۸، ۶۵/۹ و ۷۶/۸ درصد برآورد شد. میزان حساسیت متفاوت گیاه ذرت نسبت به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد، از علل کاهش متفاوت مقدار تبخیر-تعرق در دوره رشد ذرت گزارش شد (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). در پژوهش مذکور نیز نتیجه‌ای مشابه پژوهش حاضر به دست می‌آید. به این صورت که شناخت حساسیت مرحله رشد ذرت و کاستن از تنش آبی در مراحل حساس رشد (از طریق آبیاری کامل)، کمک شایانی در مدیریت آبیاری و افزایش تعرق گیاه می‌کند.

نسبی ذرت، در سطح احتمال یک درصد شد (جدول ۲). همچنین بررسی‌ها نشان داد که تأثیر توأمان تنش‌ها بر مقادیر تبخیر-تعرق نسبی در همه مراحل رشد به صورت ضرب‌پذیر بوده است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد تأثیر سطوح مختلف تنش بر مقدار تبخیر-تعرق نسبی، در مراحل مختلف رشد متفاوت بود (جدول ۳). با توجه به شکل (۲)، شیب کاهش تبخیر-تعرق در اثر افزایش تنش‌های شوری و خشکی و همچنین افزایش حساسیت گیاه در دوره رشد، افزایش یافت. نتیجه حاصل از رویداد فوق این است که در مراحل حساس رشد ذرت می‌توان از طریق مدیریت کاهش تنش‌های مذکور، نقش به‌سزایی در افزایش تبخیر-تعرق گیاه ایفا نمود. نتایج به دست آمده از پژوهش‌های گذشته نیز روند مشابهی با نتایج پژوهش کنونی داشت. در پژوهشی در منطقه اهواز، مقدار تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد، تحت سه تیمار تنش شوری آب شامل (S₁)، ۲ (S₂) و ۴/۵ (S₃) دسی‌زیمنس بر متر بررسی شد. در این شرایط مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت (نسبت به تیمار S₁) در تیمارهای S₂ و S₃ به ترتیب برابر با ۸۷/۵ و ۷۵/۲ برآورد



شکل ۲- تأثیر سطوح آبیاری و شوری بر مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت، در مراحل مختلف رشد (m، شیب خط است)

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در طرح

عملکرد نسبی	میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات
	تبخیر-تعرق نسبی					
	مرحله پایانی	مرحله میانی	مرحله توسعه	مرحله اولیه		
۰/۰۱۷ ^{NS}	۰/۰۰۳ ^{NS}	۰/۰۵ ^{NS}	۰/۰۹ ^{NS}	۰/۱۴ ^{NS}	۲	تکرار
۴۳۰/۴ ^{**}	۱۷۳۲/۶ ^{**}	۲۶۸۵ ^{**}	۱۷۴۵/۱۵ ^{**}	۱۹۱۶/۲۵ ^{**}	۳	تنش خشکی
۲۸۸ ^{**}	۸۹/۹ ^{**}	۱۷۵/۲۷ ^{**}	۱۳۶/۲۹ ^{**}	۱۲۱/۷۶ ^{**}	۳	تنش شوری
۱۰/۴۶ ^{**}	۴/۴۶ ^{**}	۸/۲۲ ^{**}	۵/۹۵ ^{**}	۳/۹۷ ^{**}	۹	تنش خشکی × تنش شوری
۰/۰۴۱	۰/۰۴۳	۰/۰۳۹	۰/۰۳۶	۰/۰۳۲	۳۰	خطا

NS و **: به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش های خشکی و شوری بر صفات مورد بررسی در طرح

عملکرد نسبی (درصد)	تبخیر-تعرق نسبی (درصد)				تیما
	پایانی	میانی	توسعه	اولیه	
۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^{a*}	I ₀ S ₀
۹۷/۷۴ ^b	۱۰۰ ^a	۹۸/۴ ^b	۹۷/۹ ^b	۹۹/۷۴ ^a	I ₀ S ₁
۹۵ ^c	۹۸/۹ ^b	۹۶/۷ ^c	۹۶/۴ ^c	۹۷/۷۹ ^b	I ₀ S ₂
۹۲/۷۵ ^d	۹۷/۱۴ ^c	۹۴/۱ ^d	۹۴/۹ ^d	۹۵/۲۹ ^c	I ₀ S ₃
۸۹/۱۳ ^e	۹۵ ^d	۹۲/۱۵ ^e	۹۲/۹۴ ^e	۹۲/۷۵ ^d	I ₁ S ₀
۸۶/۱ ^f	۹۲/۸۵ ^e	۹۰/۱۶ ^f	۹۱/۶ ^f	۹۰/۱۶ ^e	I ₁ S ₁
۸۲/۷ ^g	۹۰/۷ ^f	۸۷/۴۲ ^g	۸۹/۷۴ ^g	۸۷/۶۷ ^f	I ₁ S ₂
۷۹/۹ ^h	۸۹/۲۸ ^g	۸۵/۵ ^h	۸۶/۷۶ ^h	۸۵/۷۶ ^g	I ₁ S ₃
۷۸/۱۸ ⁱ	۸۷/۱۴ ^h	۸۲/۳۳ ⁱ	۸۴/۹۴ ⁱ	۸۳/۸۱ ^h	I ₂ S ₀
۷۴/۹ ^j	۸۵ ⁱ	۸۰ ^j	۸۲/۷۵ ^j	۸۱/۳۷ ⁱ	I ₂ S ₁
۷۱/۲۷ ^k	۸۲/۱۴ ^j	۷۷/۵ ^k	۸۰ ^k	۷۸/۷۸ ^j	I ₂ S ₂
۶۶/۴۶ ^l	۸۰ ^k	۷۳/۷ ^l	۷۷/۰۷ ^l	۷۶/۸۷ ^k	I ₂ S ₃
۵۹/۷ ^m	۷۵/۷ ^l	۶۹/۵۶ ^m	۷۵/۰۵ ^m	۷۳/۶۹ ^l	I ₃ S ₀
۵۵/۴۵ ⁿ	۷۲/۸۵ ^m	۶۵/۱ ⁿ	۷۱/۵۷ ⁿ	۷۱/۱۵ ^m	I ₃ S ₁
۴۹/۴ ^o	۶۹/۲۸ ⁿ	۶۰/۴ ^o	۶۸/۳۴ ^o	۶۶/۰۷ ⁿ	I ₃ S ₂
۴۲/۶۵ ^p	۶۶/۴۲ ^o	۵۵/۲ ^p	۶۲/۶۲ ^p	۶۳/۵۳ ^o	I ₃ S ₃

*: حروف غیر مشترک، نشان دهنده تفاوت معنی دار در بین تیمارهاست

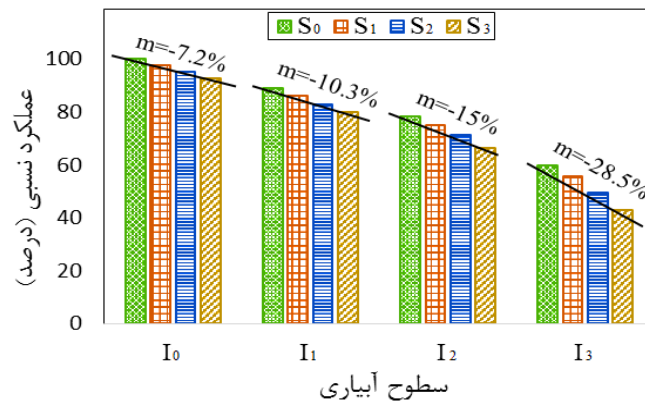
عملکرد نسبی

متقابل آن‌ها باعث کاهش معنی دار مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت در سطح احتمال یک درصد شد (جدول ۲). تأثیر توأمان تنش‌ها و آندرکنش بین آن‌ها بر عملکرد محصول نیز به صورت ضرب پذیر بود. همچنین با افزایش تنش‌های خشکی و شوری، شیب کاهش عملکرد نسبی محصول افزایش یافت (شکل ۳). تنش‌های مذکور به واسطه تأثیر بر کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق گیاه، موجب کاهش تولید اندام‌های گیاهی شدند. از سوی دیگر اعمال تنش‌های فوق در زمان‌های حساس رشد (مانند گل‌دهی ذرت) باعث اختلال در عمل گرده‌افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی در تولید بلال و دانه ذرت بود. در پژوهش‌های گذشته نیز، از تنش‌های شوری و خشکی به عنوان عوامل

در تیمارهای مختلف شوری (از تیمار S₀ تا S₃) مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت به ترتیب برابر با ۱۵۳۸۵، ۱۵۰۳۷، ۱۴۶۱۵ و ۱۴۲۶۹ تن بر هکتار (در تیمار I₀)، ۱۳۷۱۴، ۱۳۲۴۵، ۱۲۷۲۵ و ۱۲۲۹۳ تن بر هکتار (در تیمار I₁)، ۱۲۰۲۹، ۱۱۵۲۵، ۱۰۹۶۶ و ۱۰۲۲۵ تن بر هکتار (در تیمار I₂)، ۹۱۸۵، ۸۵۳۰، ۷۶۰۰ و ۶۵۶۳ تن بر هکتار (در تیمار I₃) اندازه‌گیری شد. با اعمال تنش شوری، مقدار عملکرد ذرت نسبت به شرایط استاندارد منطقه (عملکرد نسبی) در تیمارهای I₀ تا I₃ به ترتیب در بازه ۱۰۰-۹۲/۷، ۸۹/۱-۷۹/۹، ۷۸/۱-۶۶/۴ و ۶۶/۴-۵۹/۷ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد اعمال تنش‌های شوری و خشکی و اثر

آبی گیاه، به ترتیب برابر با ۲۱۵۶۰، ۱۹۵۰۰ و ۱۲۵۶۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهش دیگر گزارش شد که اعمال تنش آبی قبل از مرحله گل‌دهی ذرت، بر مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بسیار مؤثر بود. به طوری که افزایش تنش قبل از گل‌دهی، بر شدت کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نسبت به مراحل دیگر رشد افزود (اکبری نودهی، ۱۳۹۶). در پژوهشی در منطقه قزوین، عملکرد ذرت تحت چهار سطح تنش شوری آب شامل ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت تحت تیمارهای مذکور به ترتیب ۱۵/۲۱، ۱۴/۳۲، ۱۳/۰۸ و ۱۱/۲۹ تن بر هکتار برآورد شد (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱).

کاهش عملکرد محصول ذرت یاد شده است. در پژوهشی در شمال منطقه شاهرود، در اثر حذف یک مرحله آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت، مقدار عملکرد بیولوژیکی ذرت به ترتیب ۳۲/۸۲، ۳۸/۰۹ و ۱۸/۴۹ کاهش یافت. نتایج نشان داد اعمال تنش آبی در مرحله دانه‌بندی و گل‌دهی به ترتیب کمترین و بیشترین اثر را بر مقدار عملکرد بیولوژیکی ذرت داشت (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶). طبق نتایج پژوهش مذکور، مرحله گل‌دهی حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به تنش آبی بوده و با اعمال مدیریت آبیاری (انجام آبیاری کامل) در این مرحله رشد، می‌توان از کاهش شدید عملکرد محصول جلوگیری کرد. در پژوهشی در منطقه لرستان، مقدار عملکرد ماده خشک ذرت علوفه‌ای در شرایط تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز



شکل ۳- تأثیر سطوح آبیاری و تنش شوری بر مقدار عملکرد نسبی ذرت، در مراحل مختلف رشد

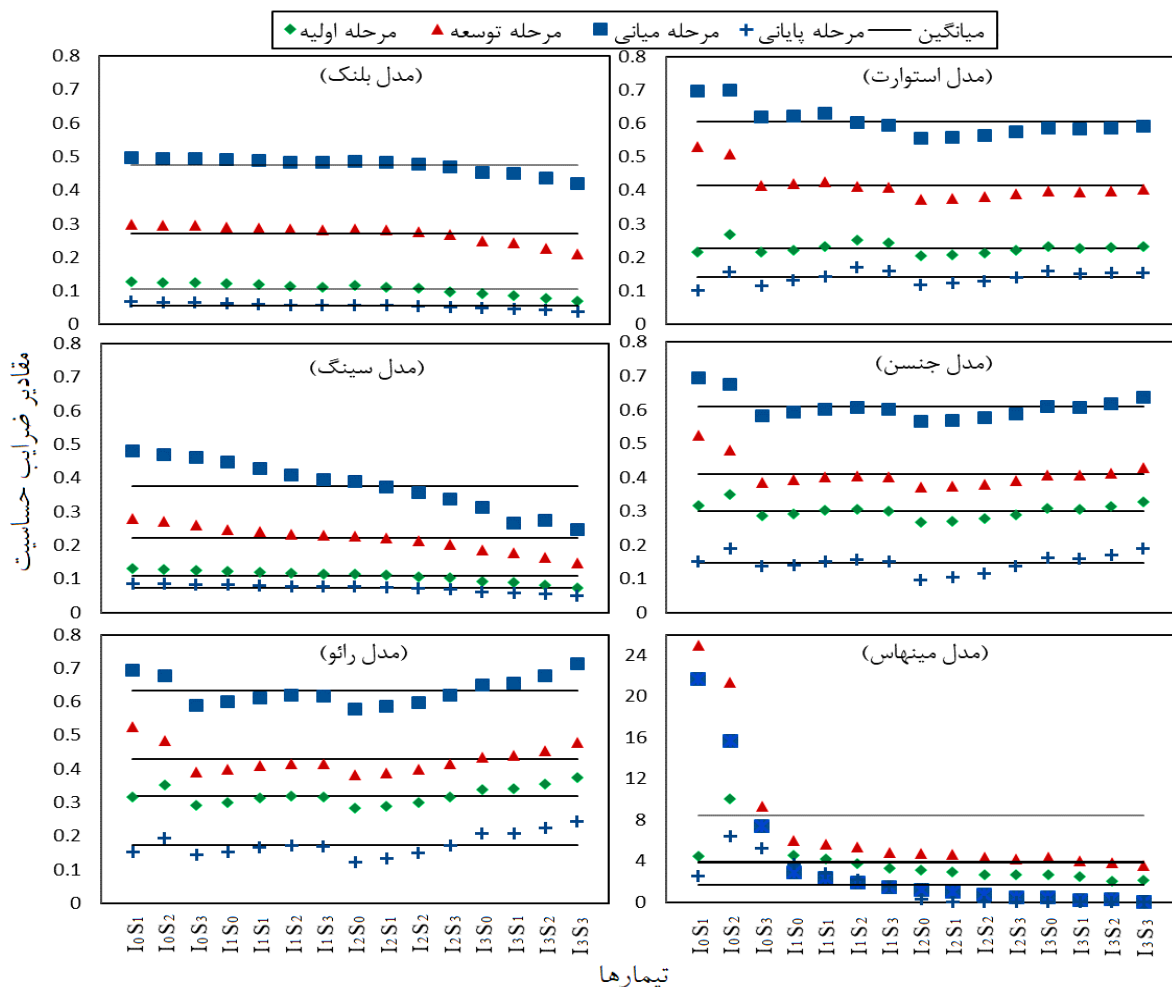
۰/۰۳۹ - ۲۱/۷۲ (مرحله میانی رشد) و ۰/۰۶۸ - ۰/۰۳۸، ۰/۱۶۹ - ۰/۱۰۱، ۰/۰۴۹ - ۰/۰۸۶، ۰/۱۰۳ - ۰/۱۹، ۰/۱۲۲ - ۰/۲۴۴، ۵×۱۰^{-۵}، ۶/۴۴ (مرحله پایانی رشد) برآورد شد (شکل ۴). نتایج نشان داد که مقادیر ضرایب در مدل‌های و مراحل مختلف رشد یکسان نبود. هر مرحله‌ای از رشد ذرت که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر بود، مقدار ضرایب حساسیت در آن مرحله بیشتر بود. به این دلیل که در مرحله حساس رشد، تأثیر تنش‌ها بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه و عملکرد محصول بیشتر بوده است. در این پژوهش مراحل رشد میانی، توسعه، اولیه و پایانی رشد از حساسیت بیشتر به کمتر رتبه‌بندی شد. از این‌رو اعمال تنش‌های شوری و خشکی در مراحل میانی و

مدل‌سازی ضرایب حساسیت درون فصلی

با عنایت به معادلات مدل‌های مختلف در روابط (۴) الی (۹)، ضرایب این معادلات توسط نرم‌افزار SPSS برای تیمارهای پژوهش حاضر برآورد شد. در تیمارهای مختلف مقدار ضرایب حساسیت در مدل‌های بلنک (A)، استوارت (B)، سینگ (C)، جنسن (λ)، راثو (γ) و مینهاس (δ) به ترتیب در بازه ۰/۰۷ - ۰/۱۲۸، ۰/۲۰۵ - ۰/۲۶۸، ۰/۰۷ - ۰/۱۳، ۰/۲۷۱ - ۰/۳۴۹، ۰/۲۸۲ - ۰/۳۷۴، ۰/۰۸ - ۰/۰۵، ۱۰/۰۵ (مرحله اولیه رشد)، ۰/۲۰۹ - ۰/۲۹۸، ۰/۳۷۴ - ۰/۵۳۱، ۰/۱۴۸ - ۰/۲۸، ۰/۳۷ - ۰/۵۲۵، ۰/۳۸۳ - ۰/۵۲۷، ۳/۵۵ - ۲۵ (مرحله توسعه)، ۰/۴۲ - ۰/۴۹۸، ۰/۷۰۱ - ۰/۷۱۲، ۰/۲۴۷ - ۰/۴۸، ۰/۶۹۳ - ۰/۵۶۵، ۰/۵۷۹ - ۰/۷۱۲.

پایانی) برآورد شد. نتایج این بخش از پژوهش نشان داد که از نظر یکنواختی مقادیر ضرایب حساسیت به تنش (در کل تیمارها)، مدل بلنک مدل مناسب‌تری بود؛ اما با توجه به پراکندگی ضرایب در تیمارها، برای تولید مدل‌های مورد نظر در پژوهش، از میانگین ضرایب استفاده شد. از این رو میانگین مقادیر ضرایب در مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن، رائو و مینهاس به ترتیب برابر با ۰/۱۰۷، ۰/۲۲۷، ۰/۱۰۸، ۰/۳۰۱، ۰/۳۲ و ۳/۹۰۲ (مرحله اولیه)، ۰/۲۷۱، ۰/۴۱۶، ۰/۲۲، ۰/۴۱، ۰/۴۲۹ و ۸/۴۲۲ (مرحله توسعه)، ۰/۴۷۳، ۰/۶۰۴، ۰/۳۷۶، ۰/۶۰۸، ۰/۶۳۲ و ۳/۸۴۶ (مرحله میانی) و ۰/۰۵۵، ۰/۱۴، ۰/۰۷۲، ۰/۱۴۷، ۰/۱۷۳ و ۱/۶۴۴ (مرحله پایانی) برآورد شد. در نهایت میانگین ضرایب (در تیمارها) در روابط (۴) الی (۹) وارد شد و مدل‌های مورد نظر به شرح جدول (۴) تولید شد.

پایانی رشد ذرت، به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد نسبی محصول داشت. علت این بود که در مرحله میانی رشد به دلیل آغاز تشکیل میوه، حساسیت گیاه بیشتر بود و در مرحله پایانی رشد نیز به دلیل رسیدگی محصول و تکمیل دوره رشد، حساسیت گیاه کمتر بود. از سوی دیگر در شکل (۴) مشاهده شد که با تغییر مقدار تنش در تیمارهای مختلف، مقدار ضرایب حساسیت با نوسان همراه بود. البته مقدار پراکندگی ضرایب در مدل‌های مختلف، متفاوت بود. به طوری که انحراف از میانگین مقادیر ضرایب در مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن، رائو و مینهاس به ترتیب برابر با ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۶، ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۷ و ۲/۱۵ (مرحله اولیه)، ۰/۰۲۷، ۰/۰۴۵، ۰/۰۳۸، ۰/۰۴۱، ۰/۰۴۱ و ۹/۸۱۵ (مرحله توسعه)، ۰/۰۲۳، ۰/۰۴۴، ۰/۰۷۶، ۰/۰۳۶، ۰/۰۴۲ و ۶/۳۹ (مرحله میانی) و ۰/۰۰۸، ۰/۰۱۹، ۰/۰۱۱، ۰/۰۲۷، ۰/۰۳۵ و ۲/۱۳ (مرحله



شکل ۴- مقادیر ضرایب حساسیت برآورد شده مدل‌ها، در تیمارها و مراحل مختلف رشد

جدول ۴- معادلات تولید شده برای مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش

نام مدل	معادله مدل
بلنک	$\frac{Y_s}{Y_m} = 0.107 \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.271 \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.473 \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.055 \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)$
استوارت	$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \left[0.227 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.416 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.604 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.14 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right]$
سینگ	$\frac{Y_s}{Y_m} = 0.108 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^2 \right) + 0.22 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^2 \right) + 0.376 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^2 \right) + 0.072 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^2 \right)$
جنسن	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^{0.301} \times \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^{0.41} \times \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^{0.608} \times \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^{0.147}$
رائو	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left(1 - 0.32 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) \right) \times \left(1 - 0.429 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) \right) \times \left(1 - 0.632 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) \right) \times \left(1 - 0.173 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right)$
مینهایس	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^2 \right)^{3.902} \times \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^2 \right)^{8.422} \times \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^2 \right)^{3.846} \times \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^2 \right)^{1.644}$

اعتبارسنجی مدل‌ها

برای ارزیابی مدل‌های ارائه شده در جدول (۴)، مقدار تبخیر-تعرق نسبی واقعی در چهار مرحله رشد ذرت، در مدل‌های مذکور قرار داده شد و مقدار عملکرد نسبی محصول تخمین زده شد. برای اعتبارسنجی توان مدل‌ها در تخمین عملکرد نسبی، از آماره‌های ارزیابی R^2_{adj} ، R^2_{EF} ، $RMSE$ ، ME و CRM استفاده شد و مدل‌ها در جدول (۵) رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد در مدل‌های جمع‌پذیر، مدل استوارت با آماره‌های ارزیابی ME ، R^2_{adj} ، R^2_{EF} ، $RMSE$ و CRM به ترتیب برابر با ۰/۰۲۴، ۰/۰۱۲، ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۵، ۰/۹۹۴ و ۷۲×۱۰^{-۴} به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. در مدل‌های ضرب‌پذیر نیز مدل جنسن با آماره‌های مذکور برابر با ۰/۰۲۹، ۰/۰۱۵، ۰/۹۹۲، ۰/۹۹۱، ۰/۹۹۲ و ۳۱×۱۰^{-۴} به عنوان مدل بهینه معرفی شد. آماره CRM نشان داد مدل رائو، مدل بیش برآورد و مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن و مینهایس مدل‌های کم

برآورد بودند. کارایی مدل‌سازی نشان داد که در شرایط پژوهش حاضر، برای انتخاب مدل بهینه به ترتیب مدل‌های استوارت، جنسن، رائو، بلنک، سینگ و مینهایس دارای اولویت بودند. از این رو در شکل (۵)، صحت اولویت‌بندی مدل‌های مذکور قابل مشاهده است. در نتیجه دستاورد کاربردی پژوهش این بود که با استفاده از مدل بهینه، می‌توان عملکرد نسبی ذرت را در شرایط تنش‌های شوری و خشکی تخمین زد. همچنین در صورت مدیریت مقدار تنش‌های شوری و خشکی در مراحل رشد، امکان تخمین عملکرد نسبی ذرت براساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی آن فراهم شد. در گذشته نیز پژوهش‌های مشابهی در این زمینه انجام شد. به طوری که برای انتخاب رقم مناسب ذرت در نواحی خشک چین، پاسخ عملکرد ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد مدل‌سازی شد. تنش خشکی (با ۱۶ تیمار آبیاری) در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و پُر شدن دانه‌ها اعمال شد. برای مدل‌سازی توابع تولید-آب،

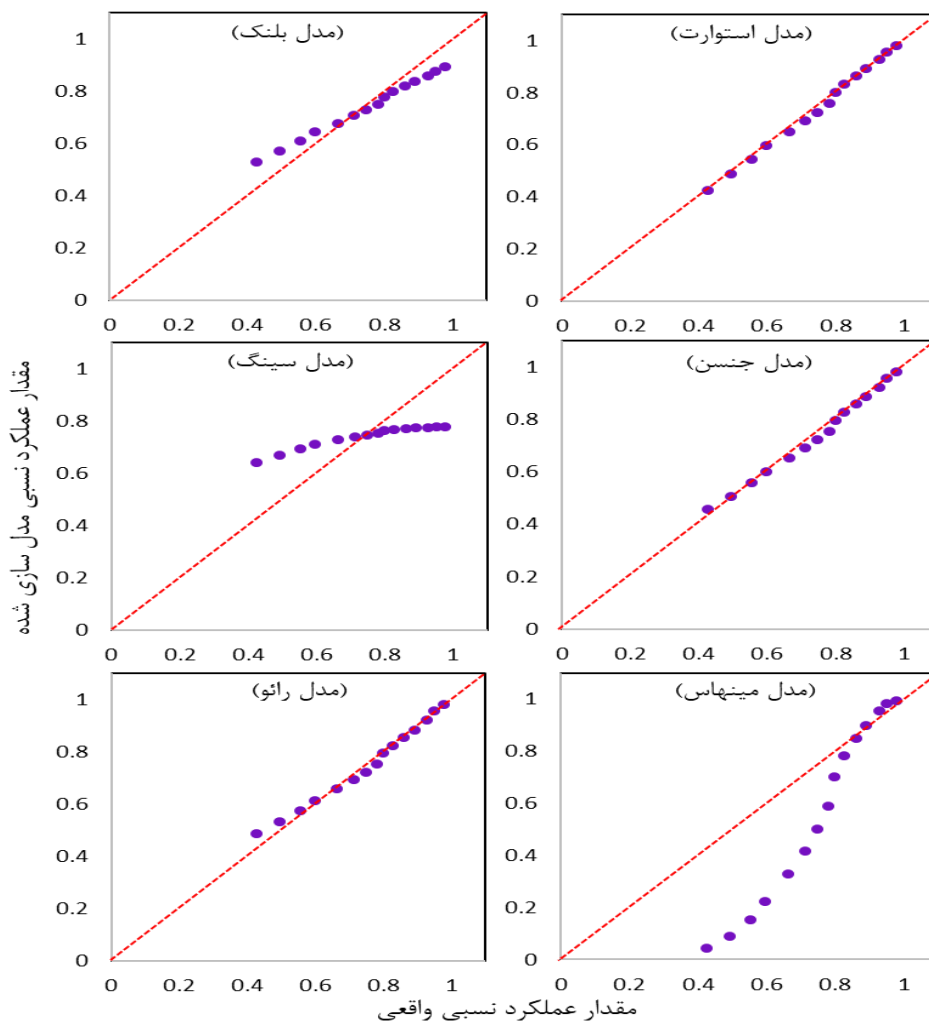
در سایر اقلیم‌ها (مانند اقلیم چین) داشته است. در پژوهش دیگر در بلژیک، عملکرد نسبی ذرت در شرایط تنش خشکی توسط مدل جنسن مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد ضرایب حساسیت λ در هفته‌های ۴-۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰-۱۲ و ۱۳-۱۴ رشد ذرت، به ترتیب برابر با ۰/۰۸۸، ۰/۳۸۳، ۱/۱۲۱، ۰/۵۴۷، ۰/۱۱۷ و ۰/۰۷۶ برآورد شد (کیپکوریر و ریس، ۲۰۰۲).

از مدل‌های بلنک، استوارت، راثو، جنسن و مینهاس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل راثو با ضرایب حساسیت ۰/۷۷۲، ۰/۳۴۳ و ۰/۹۱۶، بهترین مدل برای انتخاب رقم بذر مناسب در شرایط کم آبی بود. همچنین تأمین کمبود آب و جلوگیری از تنش خشکی در مرحله گل‌دهی ذرت توصیه شد (شی و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج پژوهش مذکور نشان داد که مدل‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، قابلیت مطلوبی برای تخمین عملکرد ذرت تحت تنش آبی

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی اعتبار مدل‌ها

نام مدل	ME	RMSE	R ²	R _{adj} ²	EF	CRM
بلنک	۰/۱۰۱ ^{(۳)*}	۰/۰۵۵ ^(۳)	۰/۹۹۷ ^(۱)	۰/۹۹۶ ^(۱)	۰/۸۸۵ ^(۳)	۱۲۶×۱۰ ^{-۴} (۳)
استوارت	۰/۰۲۴ ^(۱)	۰/۰۱۲ ^(۱)	۰/۹۹۶ ^(۲)	۰/۹۹۵ ^(۲)	۰/۹۹۴ ^(۱)	۷۲×۱۰ ^{-۴} (۳)
سینگ	۰/۲۱۴ ^(۵)	۰/۱۲۴ ^(۵)	۰/۹۴۴ ^(۵)	۰/۹۳۵ ^(۵)	۰/۴۲۴ ^(۵)	۱۲۰×۱۰ ^{-۴} (۳)
جنسن	۰/۰۲۹ ^(۲)	۰/۰۱۵ ^(۲)	۰/۹۹۲ ^(۳)	۰/۹۹۱ ^(۳)	۰/۹۹۲ ^(۲)	۳۱×۱۰ ^{-۴} (۱)
راثو	۰/۰۶۱ ^(۳)	۰/۰۲۳ ^(۳)	۰/۹۸۶ ^(۴)	۰/۹۸۴ ^(۴)	۰/۹۸ ^(۳)	۳۱×۱۰ ^{-۴} (۱)
مینهاس	۰/۴۰۵ ^(۶)	۰/۲۴۸ ^(۶)	۰/۷۷ ^(۶)	۰/۷۶۶ ^(۶)	۰/۱۲۸ ^(۶)	۲۴۱۱×۱۰ ^{-۴} (۵)

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری است



شکل ۵- مقایسه توان انواع مدل‌ها در تخمین عملکرد نسبی ذرت، تحت شرایط شوری و خشکی

نتیجه‌گیری

در مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد محصول ایجاد می‌شود. از سوی دیگر با هدف مدل‌سازی عملکرد نسبی بر اساس تبخیر-تعرق نسبی (در مراحل رشد)، مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن، رائو و مینهاس به کار گرفته شد. نتایج نشان داد در هر مرحله‌ای از رشد ذرت که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر بود، مقدار ضرایب حساسیت مدل‌ها بیشتر بود. به طوری که در مرحله حساس میانی رشد، تأثیر تنش‌ها بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه و عملکرد محصول بیشتر بود. در مرحله انتخاب مدل‌های بهینه، مدل استوارت و مدل جنسن به‌عنوان مدل‌های بهینه معرفی شدند. نتیجه کلی این‌که با استفاده از مدل‌های استوارت و جنسن، می‌توان عملکرد نسبی ذرت را برای شرایط تنش‌های شوری و خشکی در منطقه قزوین تخمین زد. همچنین در صورت مدیریت متفاوت کم‌آبایی و شوری آب در مراحل مختلف رشد، امکان تخمین عملکرد نسبی ذرت بر اساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی آن فراهم شد.

در این پژوهش، عملکرد نسبی و تبخیر-تعرق نسبی ذرت در چهار مرحله رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی، تحت تنش‌های شوری و خشکی بررسی شد. مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت از تیمار I_0S_0 تا I_3S_3 بین ۱۰۰-۶۳/۵ درصد (مرحله اولیه)، ۱۰۰-۶۲/۶ درصد (مرحله توسعه)، ۱۰۰-۵۵/۲ درصد (مرحله میانی) و ۱۰۰-۶۶/۴ درصد (مرحله پایانی) برآورد شد. مقدار عملکرد نسبی نیز در تیمارهای مذکور در بازه ۱۰۰-۴۲/۶ درصد قرار گرفت. تنش‌های خشکی و شوری به دلیل کاهش مقدار و پتانسیل آب موجود در خاک، باعث کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق گیاه و کاهش تولید زیست توده و عملکرد محصول شد. در این بین، تنش آبی نسبت به تنش شوری تأثیر بیشتری داشت. نتایج نشان داد اگر امکان کاهش تنش‌های مذکور در مراحل حساس رشد ذرت (مرحله میانی یا زمان گل‌دهی و بلال‌دهی) وجود داشته باشد، افزایش چشمگیری

فهرست منابع

۱. ابراهیمی زاده، م. ع. و ع. م. حسن‌لی. ۱۳۸۷. بررسی توسعه ریشه ذرت و تأثیر آن بر کاهش مصرف آب در روش‌های مختلف آبیاری با پساب در دشت نیمه‌خشک کربال در استان فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۴۴): ۸۲-۶۹.
۲. 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.
۳. جاراللهی، ر. ۱۳۸۰. تعیین ضریب آب سهل‌الوصول در مراحل مختلف رشد برای ذرت دانه‌ای در کرج. مجله علوم آب و خاک. ۱۵(۲): ۲۹۰-۲۹۸.
۴. 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.
۵. سعیدی، ر. ستوده‌نیا، ع. رضانی‌اعتدالی، ه. کاویانی، ع. و ب. نظری. ۱۳۹۷. مطالعه تأثیر تنش‌های شوری آب و حاصلخیزی خاک، بر تبخیر و تعرق ذرت علوفه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۴): ۹۴۵-۹۵۴.
۶. سعیدی، ر. رضانی‌اعتدالی، ه. ستوده‌نیا، ع. نظری، ع. و ب. کاوریانی. ۱۳۹۹. مدیریت مصرف آب شور و کود نیتروژن در کشت ذرت. مجله آب و خاک. ۳۴(۴): ۸۶۱-۸۷۷.
۷. 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 آب و خاک ایران. ۵۲(۳): ۶۱۱-۶۲۰.

۸. سعیدی نیا، م. نصراللهی، ع. ح. و م. شریفی پور. ۱۳۹۸. بررسی توانایی شاخص تنش آبی گیاه در برنامه ریزی آبیاری و برآورد میزان عملکرد ذرت علوفه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۳): ۵۵۵-۵۶۵.
۹. محمدی، م. محمدی قلعه‌نی، م. و ک. ابراهیمی. ۱۳۹۰. تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۸): ۴۱-۵۲.
۱۰. محمدی بهمدی، م. و م. آرمین. ۱۳۹۶. اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف ذرت در شرایط کشت تأخیری. نشریه تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی. ۴(۱): ۱۷-۳۴.
۱۱. همتی، ر. مقصودی، ک. و ا. یحیی. ۱۳۹۳. پاسخ مورفولوژیک ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در منطقه نیمه خشک شمال فارس. مجله تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی. ۴(۱۱): ۶۷-۷۴.
12. Allen, R. G. Pereira, L. S. Raes, D. and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage Paper No.56, 1-326.
13. Azizian, A. and A. R. Sepaskhah. 2014. Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. Journal of Plant Production. 8(2): 183- 214.
14. Blank, H. 1975. Optimal irrigation decisions with limited water. Ph. D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
15. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Food and agriculture organization (FAO) of the United Nations, Irrigation and drainage paper No. 24. Rome, Italy.
16. Jensen, M. E. 1968. Water consumption by agricultural plants. In: T.T. Kozlowski (ed.), Water deficits in plant growth. (pp. 1-22). Academic Press, New York, NY.
17. Kipkorir, E. D. and D. Raes. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. Journal of Irrigation and Drainage Systems. 16: 47-52.
18. 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 (2016): 192-202.
19. Minhas, B. Parikh, K. and T. Srinivasan. 1974. toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. Journal of Water Resource. 10(3): 383-393.
20. Nielsen, R. L. 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. Journal of Agronomy (Purdue). 196: 19-25.
21. Rao, N. Sarma, P. and S. Chander. 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. Journal of Agriculture water management. 13(1): 25-32.
22. 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.
23. She, R. Tong, L. Du, T. and M. Shukla. 2020. Response and Modeling of Hybrid Maize Seed Vigor to Water Deficit at Different Growth Stages. Journal of Water. 12(11): 1-20.
24. Singh, P. Wolkewitz, H. and R. Kumar. 1987. Comparative performance of different crop production functions for wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Irrigation Science, 8(4): 273-290.
25. Stewart, J. Hagan, R. and W. Pruitt. 1976. Production functions and predicted irrigation programmers for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency. Final Report. Department of Interior, Washington, D.C.
26. Xin, H. Peiling, Y. Shumei, R. Yankai L. Guangyu, J. and L. Lianhao. 2016. Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. Journal of Agriculture and Biology Engineering. 9(2): 63-73.

Effect of Drought and Salinity Stress on Estimation of Forage Maize Yield through Periodic Evapotranspiration Using Different Models

R. Saeidi¹

Ph.D. of 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

Received: July 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

Determining the intra-seasonal sensitivity of maize evapotranspiration to environmental stresses has an important effect on modeling of yield. In this research, the effect of drought and salinity stresses were investigated on the relative evapotranspiration (during initial, development, mid, and late stages) and relative yield of maize, in a field with sandy loam soil texture. Salinity treatments were applied by water with EC of 0.5(S₀), 2.1(S₁), 3.5(S₂), and 5.7(S₃) dS.m⁻¹. Drought treatments included four irrigation levels of 100% (I₀), 80% (I₁), 60% (I₂), and 40% (I₃) of the crop water requirement. The experiment was performed as factorial in a randomized complete block design, with three replications. The relative evapotranspiration of maize in the initial, development, middle and final stages was estimated between 63.5-100%, 62.6-100%, 55.2-100%, and 66.4-100%, respectively. The relative yield of maize in the I₀S₀ to I₃S₃ treatments was calculated between 42.6-100%. The results showed that salinity and drought stresses reduced both the evapotranspiration and maize yield. Also, evapotranspiration decreased with a steeper slope in sensitive growth stages compared to yield. Effect of the mentioned stresses at sensitive growth stages caused disruption in the flowering and fruiting of maize. In this study, the relative yield of maize was modeled by additive models of Blank, Stuart, Singh and multipliable models of Jensen, Rao, and Minhas. According to the results, Stewart model with sensitivity coefficients (in four growth stages) of 0.227, 0.416, 0.604, 0.14 and Jensen model with sensitivity coefficients of 0.301, 0.41, 0.608, and 0.147 were selected as the optimal models. However, Rao, Blank, Singh, and Minhas models were chosen as the next priorities. Therefore, under salinity and drought stress, the relative yield of maize was modeled based on the amount of evapotranspiration in the growth stages.

Keywords: Experimental models, Growth stages, Relative evapotranspiration, Relative yield, Sensitivity coefficients

¹ - Corresponding author: Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.