

مقاله پژوهشی

## بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری

رضا سعیدی\*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

### چکیده

در این پژوهش حساسیت تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در مراحل متمایز رشد و برای شرایط کاربرد مقادیر مختلف آب آبیاری بررسی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل چهار سطح (I<sub>0</sub>)، (I<sub>1</sub>)، (I<sub>2</sub>) و (I<sub>3</sub>) ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه و تیمارهای مراحل رشد شامل چهار مرحله‌ی اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد بود. تبخیر-تعرق روزانه گیاه بر اساس بیلان آب خاک در منطقه ریشه اندازه‌گیری شد. مقادیر تبخیر-تعرق در مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I<sub>0</sub>)، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I<sub>1</sub>)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی‌متر (در تیمار I<sub>2</sub>)، ۶۲/۸، ۱۴۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی‌متر (در تیمار I<sub>3</sub>) اندازه‌گیری شد. مقدار عملکرد خشک ذرت در تیمارهای I<sub>0</sub>، I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۱۷/۱، ۱۵/۸، ۱۲/۶ و ۸/۷ تن بر هکتار بود. در کل دوره رشد و در سطوح آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت به ترتیب ۹۵/۶، ۸۵ و ۷۱/۶ درصد و مقدار عملکرد نسبی محصول به ترتیب ۹۲/۴، ۷۳/۷ و ۵۰/۹ درصد برآورد شد. در این پژوهش ضرایب حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، از طریق مدل جنسن مدل‌سازی شد. به این صورت که برای داده‌های واقعی هر تیمار تحت تنش (I<sub>1</sub> الی I<sub>3</sub>) و در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت، به ترتیب ضرایب حساسیت λ<sub>1</sub> الی λ<sub>4</sub> (موجود در مدل جنسن) توسط نرم‌افزار SPSS برآورد شد. میانگین ضرایب مذکور در تیمارهای تحت تنش به ترتیب برابر با ۰/۴۲۱، ۰/۳۷، ۰/۲۷۴ و ۰/۱۳۳ تعیین شد. برای صحت‌سنجی مدل جنسن در تخمین عملکرد نسبی واقعی ذرت، از آماره‌های ارزیابی R<sup>2</sup>، EF، RMSE، ME و CRM استفاده شد. آماره‌های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸، ۰/۹۸۶، ۲/۷۵۳، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل در تخمین عملکرد نسبی محصول بود. همچنین در سطوح مختلف آبیاری، بین دو پارامتر تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده خشک ذرت، رابطه‌ی Y=69.935ET-12281 با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹ برآورد شد. انتخاب مرحله‌ی رشد مناسب به منظور اعمال تنش آبی و سطح تنش وارده، تأثیر به‌سزایی در مقدار تبخیر-تعرق و تولید زیست‌توده گیاهی داشت. دستاورد کاربردی پژوهش این بود که با استفاده از مدل‌ها و روابط بین تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه، می‌توان بر اساس مقدار تبخیر-تعرق واقعی و تحت مدیریت در مراحل مختلف رشد، مقدار عملکرد واقعی محصول را تخمین زد. همچنین با توجه به تأثیر شدت تنش آبی بر کاهش تعرق گیاه و افزایش تبخیر از سطح خاک، استفاده از مالچ روی خاک به خصوص در مراحل اولیه و پایانی رشد قابل توصیه بود.

واژه‌های کلیدی: عملکرد، کم‌آبیاری، مدل جنسن، مراحل رشد

### مقدمه

بحران کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بر لزوم استفاده آب مطابق نیاز واقعی گیاه و با هدف افزایش بهره‌وری مصرف آب تأکید می‌نماید. کاربرد صحیح آب در بخش کشاورزی نیازمند اطلاع

دقیق از حساسیت‌های گیاه به تنش‌های محیطی و مدیریتی مانند تنش آبی می‌باشد. حساسیت گیاه به تنش آبی، ممکن است در مراحل مختلف رشد متفاوت بوده و اثر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه نسبت به شرایط پتانسیل (استاندارد) منطقه داشته باشد. با توجه به این که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنش کم‌آبی از عوامل اصلی محدود کننده عملکرد گیاهان زراعی می‌باشد. به همین دلیل محققان همواره در پژوهش‌های خود سعی داشته‌اند بررسی تحمل گیاه به کمبود آب را مدنظر قرار دهند (۱۷). از این‌رو انتخاب هر زمانی در دوره رشد گیاه برای اعمال یک حد مشخص از تنش آبی، ممکن است اثر متفاوتی بر مقدار عملکرد محصول داشته و بهره‌وری فیزیکی

۱- دکترای مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی (ه)  
\* - نویسنده مسئول:  
(Email: Saeidii@org.ikiu.ac.ir)

امکان رشد مجدد و افزایش ارتفاع محدود شده بود، گیاه با افزایش دما نیز روبه‌رو شده بود (۱۲). در تحقیقی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت تأثیر چهار سطح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی به دلیل کاهش رشد رویشی و به تأخیر افتادن گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی ذرت، کاهش عملکرد محصول معنی‌دار بود (۱). در تحقیقی در شمال غربی استان فارس، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در مراحل رشد استقرار گیاه تا ظهور گل تاجی، ظهور گل تاجی تا خمیری شدن دانه و از خمیری شدن دانه تا رسیدگی، تحت سطوح آبیاری بدون تنش، تنش ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و تنش ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه قرار گرفت. نتایج نشان داد تنش شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) در مرحله رشد رویشی، آسیب زیادی به گیاه وارد کرد به نحوی که با آبیاری کامل در مرحله گل‌دهی قابل جبران نبود. مرحله گل‌دهی و اوایل پرشدن دانه، حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی در گیاه ذرت تشخیص داده شد. همچنین بعد از مرحله خمیری شدن دانه، با قطع آبیاری، کاهش عملکرد معنی‌داری مشاهده نشد (۶). در تحقیق دیگر گزارش شد که افزایش 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 (۳). آنچه در نتایج پژوهش‌های گذشته مشاهده شد، تأثیر مستقیم و معنی‌دار تنش آبی بر مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت در کل دوره رشد بود. اما تأثیر سطوح متفاوت تنش آبی بر مقدار تبخیر-تعرق ذرت طی مراحل متمایز دوره رشد، چندان مورد بررسی قرار نگرفت. به طور کلی هدف از این پژوهش بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی و واکنش عملکرد محصول به آن، در سطوح مختلف آبیاری می‌باشد. در پژوهش حاضر ضمن انجام هدف فوق، ضرایب حساسیت درون فصلی گیاه به تنش آبی نیز با استفاده از مدل جنسن<sup>۱</sup> مدل‌سازی شد. در تعداد محدودی از پژوهش‌های گذشته نیز، ضرایب تنش آبی مدل جنسن برای ذرت در بلژیک (۱۱)، برای عملکرد کل گیاه، وزن و قطر میوه گوجه‌فرنگی در چین (۱۰)، برای مراحل رشد سورگوم در آمریکا (۹) و مراحل رشد نیشکر در برزیل (۱۸) برآورد شد. به‌طور کلی در پژوهش حاضر با در نظر داشتن حساسیت متفاوت گیاه ذرت به تنش آبی طی مراحل مختلف رشد، امکان مدل‌سازی و تخمین دقیق‌تر عملکرد نسبی محصول ذرت در منطقه قزوین بررسی شد. به عبارت دیگر از طریق یک مدل جامع‌تر، برآورد عملکرد محصول بر اساس اعمال سطوح مختلف تنش آبی به صورت متوالی در کل دوره رشد و

مصرف آب را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین در سطوح متنوع تنش آبی، می‌توان با بررسی حساسیت تبخیر-تعرق گیاه در مراحل مختلف رشد، راهکارهای مدیریتی برای مصرف بهینه‌ی آب ارائه نمود. با توجه به پژوهش‌های گذشته، دوره رشد گیاهان زراعی را می‌توان به چهار مرحله متمایز اولیه، توسعه گیاه، میانی و پایانی رشد تقسیم کرد. مرحله اولیه رشد از تاریخ کاشت بذر شروع شده و تا زمانی که پوشش گیاهی حدود ۱۰ درصد از سطح زمین را بپوشاند، ادامه می‌یابد. مرحله توسعه گیاه از زمان پوشش گیاهی ۱۰ درصدی آغاز شده و تا زمان رسیدن به پوشش مؤثر گیاه ادامه دارد. پوشش مؤثر هنگامی است که به علت هم‌پوشانی برگ‌های بوته‌های هم‌جوار، بر روی سطح خاک به‌طور کامل سایه‌اندازی می‌شود. پایان این زمان برای بسیاری از گیاهان، مصادف با شروع گل‌دهی می‌باشد. مرحله میانی رشد از ادامه مرحله قبل شروع شده و تا ابتدای رسیدن بیولوژیک محصول ادامه دارد. در این مرحله، ضریب گیاهی تبخیر-تعرق (Kc) به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مرحله پایانی رشد از رسیدگی بیولوژیک محصول آغاز شده و تا خشک شدن طبیعی اندام‌های گیاه (پلاسیدگی کامل) و برداشت آن ادامه می‌یابد. در این مرحله، ضریب گیاهی Kc کاهش یافته و تبخیر-تعرق گیاه نسبت به گیاه مرجع کم‌تر می‌شود (۲). در میان گیاهان زراعی که تحت کشت آبی قرار می‌گیرند، ذرت علوفه‌ای به عنوان یک نهاده دامی، نقش به‌سزایی در تأمین خوراک دام و طیور هر کشور داراست. از سوی دیگر به دلیل وجود مراحل فنولوژیک متمایز در دوره رشد ذرت و حساسیت متفاوت در آن‌ها، گیاه ذرت در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در پژوهشی مقدار تبخیر-تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش آبی بررسی شد. نتایج نشان داد با انجام آبیاری در سطح ۵۵ درصد نیاز آبی ذرت (کم‌آبیاری)، مقدار تبخیر-تعرق نسبت به شرایط آبیاری کامل حدود ۳۳ درصد کاهش یافت (۱۹). در تحقیق دیگر اعلام شد دوره‌های بحرانی اعمال تنش آبی بر ذرت شامل مراحل استقرار گیاهچه، دوره رشد سریع، مرحله گرده افشانی و پرشدن دانه بود. دلیل آن فرایندهای فیزیولوژیکی متفاوت در مراحل رشد ذرت بود که باعث تأثیر متفاوت تنش آبی بر روی عملکرد محصول می‌شد (۱۳). با بررسی کم‌آبیاری ذرت مشخص شد که مرحله‌ی گل‌دهی ذرت، حساس‌ترین مرحله به تنش آبی بود و اثر آن بر عملکرد محصول معنی‌دار بود. اما کم‌آبیاری در مرحله‌ی پرشدن دانه‌ها، اثر معنی‌داری بر رشد گیاه و تولید محصول نداشت (۴). در پژوهشی در شهرستان شاهرود تنش آبی با حذف یک مرحله آبیاری، در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ اعمال شد. عملکرد بیولوژیک ذرت تحت تأثیر تیمارهای مذکور به ترتیب ۶۸، ۶۲/۲ و ۶۶/۴۷ تن بر هکتار برآورد شد. نتایج نشان داد تنش آبی در مرحله گل‌دهی نسبت به مرحله رشد رویشی، تأثیر بیشتری بر کاهش عملکرد محصول داشت. علت این بود که در مرحله گل‌دهی، علاوه بر ورود گیاه به مرحله زایشی که

هم بود که به صورت سطحی آبیاری شد. بذرها با تراکم ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار در تاریخ ۲۴ خرداد ماه کاشته شد و زیست توده نهایی ذرت‌ها در تاریخ ۱۰ آبان ماه برداشت شد. دوره رشد گیاه مصادف با روزهای خشک سال بود و آمار بارندگی ثبت شده وجود نداشت. بنابراین نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق آبیاری تأمین شد. بر اساس نتایج بررسی شیمیایی خاک، مصرف کودهای ازت (اوره)، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به ترتیب به مقدار ۳۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار توسط آزمایشگاه خاک توصیه شد. کود اوره در طول دوره کشت و بقیه کودها قبل از کشت به خاک اضافه شد. تیمارهای اصلی شامل چهار سطح آبیاری (I<sub>0</sub>، I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub>، I<sub>3</sub>)، ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه بود. تیمارهای فرعی شامل مقادیر تبخیر-تعرق گیاه در چهار مرحله‌ی رشد اولیه (P<sub>0</sub>)، توسعه (P<sub>1</sub>)، میانی (P<sub>2</sub>) و پایانی (P<sub>3</sub>) بود. کل دوره رشد ذرت ۱۴۰ روز بود و مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز در نظر گرفته شد (۲). به طور کلی تیمارهای اصلی در سه تکرار و مجموعاً ۱۲ کرت، به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اعمال شد.

یا کم آبیاری دوره‌ای، امکان‌پذیر شد. همچنین در مدیریت‌های کم آبیاری دوره‌ای با هدف دستیابی به حداکثر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب، امکان شناسایی مرحله رشد مناسب برای اعمال تنش آبی فراهم شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی کلیات طرح آزمایشی

این پژوهش در منطقه قزوین و در موقعیت جغرافیایی با طول شرقی "۵۰°۰۷" و عرض شمالی "۳۶°۱۹'۳۳" انجام شد. آب مورد نیاز برای انجام آبیاری از آب زیرزمینی با هدایت الکتریکی ۰/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر و اسیدیته ۷/۲ تأمین شد. قبل از اجرای پژوهش، از نقاط مختلف مزرعه و از اعماق ۳۰-۶۰ و ۰-۳۰ سانتی‌متر، نمونه خاک تهیه شد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی بر روی نمونه‌ها، توسط آزمایشگاه خاک‌شناسی معتبر انجام شد و نتایج آن در جدول ۱ آورده شد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد ۳×۳ متر و با فاصله ۲ متر از هم کاشته شد. هر کرت دارای پنج ردیف کشت جویچه‌ای با فاصله‌ی ۶۰ سانتی‌متر از

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1- Physical and chemical properties of farm soil

پارامتر Parameter	واحد Unit	عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	
		0-30	30-60
قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity	dS.m <sup>-1</sup>	0.43	0.45
pH	-	7.3	7.2
کربن آلی Organic carbon	%	0.09	0.11
نیتروژن کل Total nitrogen	%	0.1	0.15
فسفر قابل جذب Available phosphorus	mg.kg <sup>-1</sup>	6	13
پتاسیم قابل جذب Available potassium	mg.kg <sup>-1</sup>	270	75
بافت خاک Soil texture	-	SL	SL
رس Clay	%	10	9
سیلت Silt	%	32	24
شن Sand	%	58	67
رطوبت جرمی در حد ظرفیت زراعی Moisture content at field capacity	%	23	24
رطوبت جرمی در نقطه پژمردگی Moisture content at wilting point	%	10	11
چگالی ظاهری Bulk density	g.cm <sup>-3</sup>	1.61	1.54

## تعیین حجم آب آبیاری

حجم آب آبیاری در تیمار آبیاری کامل ( $I_0$ )، با توجه به مقدار اختلاف رطوبت خاک در زمان آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه ( $FC^1$ ) تعیین شد. در این پژوهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه، به صورت روزانه با دستگاه بازتاب زمانی امواج ( $TDR^2$ ) مدل TRIME-FM اندازه گیری شد. قبل از شروع آزمایش، دستگاه TDR از طریق برآورد مقادیر مختلف رطوبت خاک مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت و اعداد ثبت شده توسط آن، نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. از سوی دیگر به منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، داده‌ی رطوبتی خاک از مرکز سطح هر کرت و از عمق توسعه ریشه گیاه برداشت شد. بنابراین بر اساس مقدار رطوبت مورد نیاز خاک (برای رسیدن به حد FC)، عمق ریشه گیاه و مساحت کرت، حجم آب آبیاری در تیمار  $I_0$  از طریق رابطه (۱) محاسبه شد. با توجه به اهداف پژوهش، به تیمارهای  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  به ترتیب مقدار  $0/8$ ،  $0/6$  و  $0/4$  حجم آب آبیاری کامل (تیمار  $I_0$ ) اختصاص داده شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت با کنتور حجمی کنترل شد. آب از مخزن مورد نظر توسط شیلنگ به کرت‌ها انتقال داده شد و آبیاری در جویچه‌ها به صورت سطحی انجام شد. آب به شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع شد و با توجه به محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌ها و عدم خروج آب از آن‌ها، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد بود.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_m)}{100} \cdot \rho b \cdot D_{rz} \cdot A \quad (1)$$

$V$ : حجم آب آبیاری ( $m^3$ )،  $\theta_{FC}$ : رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)،  $\theta_m$ : رطوبت وزنی خاک بلافاصله قبل از انجام آبیاری (درصد)،  $\rho b$ : چگالی ظاهری خاک ( $g \cdot cm^{-3}$ )،  $D_{rz}$ : عمق ریشه گیاه ( $m$ ) و  $A$ : مساحت کرت ( $m^2$ ).

## تعیین زمان انجام آبیاری

با توجه به تحقیقات گذشته، حد آب سهل‌الوصول خاک برای گیاه ذرت، در تمام مراحل رشد بین ۴۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد (۸). از این رو در کرت‌های شاهد (آبیاری کامل) برای اطمینان از این‌که به گیاه ذرت حتی در حساس‌ترین دوره رشد هم تنش آبی وارد نمی‌شود، حد آب سهل‌الوصول خاک به مقدار ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. یعنی پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی ( $PWP^3$ ) در کرت‌های شاهد، آبیاری انجام شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه‌های

صفحات فشاری و گرم‌خانه، محاسبه و در جدول ۱ ارائه شد.

## برآورد تبخیر-تعرق

در فاصله‌ی بین دو آبیاری، مقدار رطوبت روزانه خاک در مرکز هر کرت و در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. با توجه به عدم وجود بارندگی در دوره کشت و نبود زهکشی یا جریان‌های ترجیحی در عمق خاک، روند کاهش رطوبت در عمق ریشه متأثر از فرایند تبخیر-تعرق گیاهان بود. بنابراین مقدار تبخیر-تعرق گیاهان در واحد سطح، با توجه به بیلان آب خاک در شکل ۱ و از طریق رابطه (۲) برآورد شد.

$$(ET_c)_i = (\theta_{i-1} - \theta_i) \cdot \rho b \cdot D_{rz} \quad (2)$$

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

## اندازه‌گیری عملکرد محصول و تحلیل آماری

در تاریخ ۱۰ آبان ماه عملیات برداشت محصول انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن زیست‌توده محصول ذرت، بوته‌های هر کرت از کف زمین بریده شد و برای خشک شدن به آزمایشگاه منتقل شد. به این صورت که بوته‌ها به مدت ۴۸ ساعت در داخل گرم‌خانه قرار داده شد و در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل خشک شد. وزن کل بوته‌های خشک شده در واحد سطح، به عنوان عملکرد زیست‌توده خشک ذرت در نظر گرفته شد. از سوی دیگر تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های مربوط به مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده خشک محصول، توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

## مدلسازی ضرایب حساسیت تبخیر-تعرق به تنش آبی

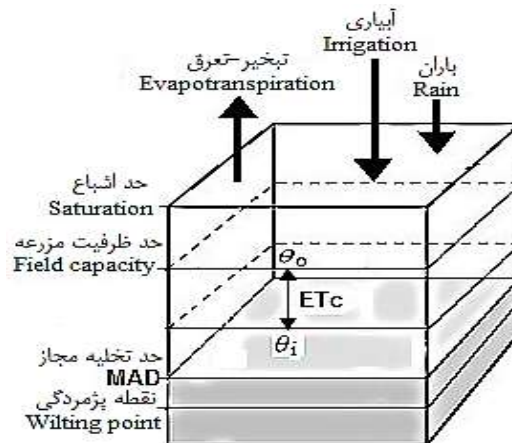
در این پژوهش ضرایب حساسیت درون فصلی ذرت به تنش آبی، از طریق مدل چنسن (رابطه ۳) مدل‌سازی شد (۹). با استفاده از داده‌های واقعی تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه، ضرایب مذکور در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت ( $\lambda_1$  الی  $\lambda_4$ ) به وسیله نرم‌افزار SPSS تعیین شد. برای مدل‌سازی دقیق‌تر، ضرایب مذکور در سطوح مختلف تنش آبی ( $I_1$  الی  $I_3$ ) به‌طور مجزا تعیین شد. به این ترتیب در مجموع تعداد ۱۲ ضریب  $\lambda$  در این پژوهش برآورد شد.

$$\frac{Y}{Y_m} = \left( \frac{ET_1}{ET_{m1}} \right)^{\lambda_1} \times \left( \frac{ET_2}{ET_{m2}} \right)^{\lambda_2} \times \left( \frac{ET_3}{ET_{m3}} \right)^{\lambda_3} \times \left( \frac{ET_4}{ET_{m4}} \right)^{\lambda_4} \quad (3)$$

1- Field Capacity

2- Time Domain Reflectometer

3- Permanent Wilting Point



شکل ۱- بیلان رطوبتی خاک تحت تأثیر فرایند تبخیر-تعرق گیاه  
Figure 1- Soil water balance under the effect of crop evapotranspiration process

صفر) بودن آماره‌های RMSE، ME و CRM و نزدیک به یک بودن آماره‌های  $R^2$  و EF، نشان‌دهنده همبستگی بهتر بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی بود. معادلات مربوط به آماره‌های ارزیابی در روابط (۴) الی (۸) ارائه شد (۱۴). حروف  $O^e$  و  $P^v$  در معادلات مذکور، به ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده‌ای در مزرعه و پیش‌بینی شده توسط مدل جنسن بود.

$$ME = \max|P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (4)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (6)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

## نتایج و بحث

### تبخیر-تعرق

در این پژوهش مقادیر تبخیر-تعرق ذرت، تحت سطوح متفاوت آبیاری و در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری شد. تأثیر مقدار آب آبیاری و مرحله رشد بر مقدار تبخیر-تعرق ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقادیر تبخیر-تعرق در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار  $I_0$ )، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر

Y: مقدار عملکرد محصول ذرت در تیمار تنش آبی ( $\text{kg. ha}^{-1}$ )، حداکثر عملکرد محصول ذرت در تیمار بدون تنش آبی یا تیمار آبیاری کامل ( $\text{kg. ha}^{-1}$ )،  $ET_1$  الی  $ET_4$ : تبخیر-تعرق واقعی ذرت (mm) به ترتیب در چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد تحت شرایط تنش آبی،  $ET_{m1}$  الی  $ET_{m4}$ : حداکثر تبخیر-تعرق ذرت (mm) در مراحل رشد مذکور و در شرایط بدون تنش آبی،  $\lambda_1$  الی  $\lambda_4$ : ضرایب حساسیت درون فصلی گیاه ذرت به تنش آبی در مراحل رشد مذکور می‌باشد.

در هر سطح کم آبیاری، براساس مقادیر واقعی عملکرد و تبخیر-تعرق گیاه طی مراحل رشد، عمل واسنجی و تعیین ضرایب ( $\lambda$ ) مدل جنسن انجام شد. در مرحله‌ی بعد برای ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد مدل، مقادیر واقعی تبخیر-تعرق نسبی گیاه در چهار مرحله رشد ( $\frac{ET_i}{ET_{mi}}$ )، در مدل به‌دست آمده قرار داده شد و مقدار عملکرد نسبی محصول ( $\frac{Y}{Y_m}$ ) تخمین زده شد. در این شرایط دو دسته داده‌ی عملکرد نسبی محصول در سطوح کم آبیاری ایجاد شد. یک دسته مربوط به داده‌های واقعی (مشاهده‌ای) در سطح مزرعه و یک دسته هم مربوط به داده‌های تولید شده توسط مدل (تخمینی) بود. بنابراین با داشتن داده‌های (عملکرد نسبی) مشاهده‌ای در مزرعه و تخمین زده شده توسط مدل، کارایی مدل جنسن صحت‌سنجی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا<sup>۱</sup> (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE)، ضریب تعیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ )، کارایی مدل‌سازی<sup>۴</sup> (EF) و ضریب باقیمانده<sup>۵</sup> (CRM) استفاده شد. حداقل (نزدیک به

5- Coefficient of Residual Mass  
6- Observation  
7- Predict

1- Maximum Error  
2- Root of Mean Squared Error  
3- Coefficient of determination  
4- modeling Efficiency

درصدی در مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت شد (شکل ۳). در تحقیقی مشابه در دشتهای مرکزی آمریکا، مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه اندازه گیری شد. نتایج نشان داد اعمال کم آبیاری (تنش آبی) در طول دوره رشد گیاه، باعث کاهش مقدار تبخیر-تعرق ذرت نسبت به شرایط آبیاری کامل شد. به طوری که مقدار تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مذکور به ترتیب ۶۴۸، ۵۶۷، ۵۲۴، ۵۰۷، ۴۲۲ و ۳۶۸ میلی متر برآورد شد. مقدار تبخیر-تعرق نسبی در سطوح آبیاری ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب برابر با ۸۷/۵، ۸۰/۸، ۷۸/۲، ۶۵/۱ و ۵۶/۸ درصد برآورد شد (۱۹). در پژوهشی در تایوان جنوبی، تبخیر-تعرق گیاه ذرت در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی گیاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مجموع تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مذکور به ترتیب برابر با ۳۷۵، ۳۲۵، ۲۷۵، ۲۲۵ و ۱۷۵ میلی متر بود. همچنین مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت در سطوح آبیاری ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد به ترتیب برابر با ۸۶/۷، ۷۳/۳، ۶۰/۶ و ۴۶/۶ درصد برآورد شد (۵). دستاورد کاربردی پژوهش این بود که حساسیت متفاوت گیاه در مراحل مختلف رشد و اعمال تنش آبی به عنوان یک تنش محیطی - مدیریتی، نقش مؤثری در کاهش جذب آب توسط گیاه و تعرق واقعی آن بر عهده داشت. لذا انتخاب مرحله‌ی رشد مناسب و اعمال حد منطقی از تنش آبی در مدیریت‌های کم آبیاری، می‌تواند در ایجاد تبخیر-تعرق بهینه برای گیاه و در نهایت افزایش بهره‌وری مصرف آب حائز اهمیت باشد.

(در تیمار I<sub>1</sub>)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی متر (در تیمار I<sub>2</sub>)، ۶۲/۸، ۱۴۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی متر (در تیمار I<sub>3</sub>) برآورد شد (شکل ۲). نتایج در همه سطوح آبیاری نشان داد ساختار کلی تبخیر-تعرق، از منحنی ضریب گیاهی تبخیر-تعرق در دوره رشد (Kc) تبعیت کرد. به طوری که بیشترین تا کمترین مقدار تبخیر-تعرق به ترتیب مربوط به مراحل توسعه، میانی، اولیه و پایانی رشد بود. کاهش مقدار تبخیر-تعرق نسبت به تیمار شاهد (I<sub>0</sub>)، در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به ترتیب برابر با ۰/۹، ۲/۸، ۹ و ۰ درصد (در تیمار I<sub>1</sub>)، ۸/۸، ۱۴، ۲۰ و ۱۹/۸ درصد (در تیمار I<sub>2</sub>)، ۲۰/۵، ۲۶/۹، ۳۴/۲ و ۴۲/۴ (در تیمار I<sub>3</sub>) برآورد شد. شیب کاهش مقدار تبخیر-تعرق در مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با ۹/۸، ۱۲، ۱۲/۶ و ۲۱/۲ درصد بود. عدم تولید زیست توده گیاهی پس از رسیدگی بیولوژیک، کاهش تعرق گیاه و در نهایت پلاسیدگی و اتمام عمر گیاه، فرایند مرحله پایانی رشد بود. با افزایش تنش آبی، بیشترین شیب کاهش تبخیر-تعرق در مرحله رشد مذکور اتفاق افتاد که نشان دهنده تأثیر تنش آبی بر سرعت فرایند فوق بود. به طور کلی میزان حساسیت به تنش آبی و نیاز متفاوت گیاه به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد ذرت، از علل کاهش متفاوت تبخیر-تعرق بود. همچنین نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق نسبی ذرت (طی دوره رشد) در سطوح آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب ۸۵، ۹۵/۶ و ۷۱/۶ درصد برآورد شد. اعداد مذکور نشان دهنده ضریب حساسیت تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی (Ks)، در سطوح مختلف آبیاری بود. از ضرایب فوق می‌توان در محاسبه مقدار تبخیر-تعرق واقعی ذرت، تحت شرایط تنش آبی در منطقه استفاده نمود. در مجموع کاهش هر واحد (درصد) آب آبیاری نسبت به آبیاری کامل، باعث کاهش ۰/۴۸

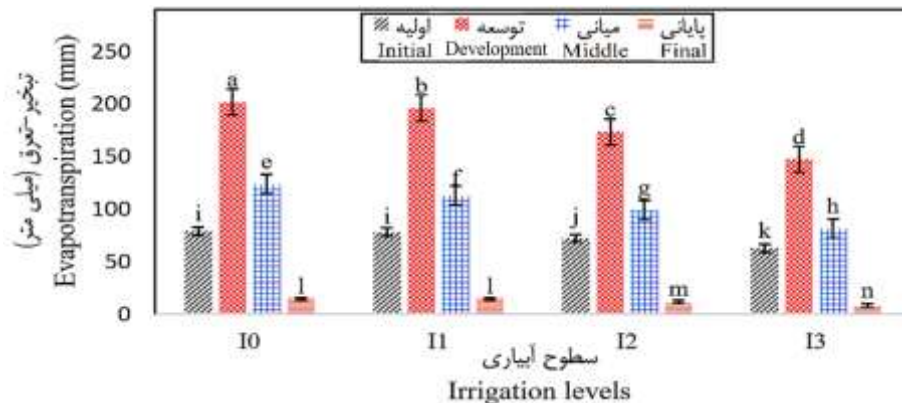
جدول ۲- تجزیه واریانس صفت تبخیر-تعرق طی دوره رشد

Table 2- Analysis of variance of the evapotranspiration adjective in growth stage

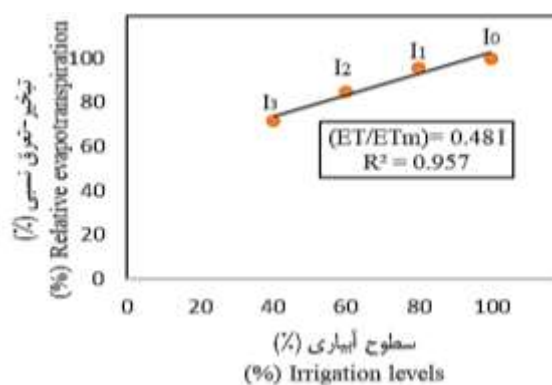
منابع تغییر Sources of variance	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares
تکرار Replication	2	4.542 <sup>ns</sup>
سطح آبیاری Irrigation level	3	2117**
دوره رشد Growth stage	3	58211**
سطح آبیاری × دوره رشد Growth stage × Irrigation level	9	300.9**
خطا Error	30	0.487

ns و \*\*: به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

ns and \*\*: Non significant and significant at a probability level of one percent, respectively.



شکل ۲- مقادیر تبخیر-تعرق ذرت تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری در مراحل رشد  
Figure 2- Evapotranspiration of maize under the effect of different irrigation levels in the growth stages



شکل ۳- تغییرات تبخیر-تعرق نسبی ذرت نسبت به سطوح مختلف آبیاری  
Figure 3- Changes in relative evapotranspiration of maize compared to different irrigation levels

### عملکرد محصول

۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، به ترتیب ۲۱/۵، ۱۹/۵ و ۱۲/۵ تن بر هکتار برآورد شد. مقدار عملکرد نسبی محصول در سطوح آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به ترتیب برابر با ۹۰/۷ و ۵۸/۱ درصد بود (۱۶). در پژوهشی با اعمال کم آبیاری در سطوح ۱۰۰، ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی گیاه، مقدار عملکرد دانه ذرت به ترتیب ۹۱۱/۳، ۸۳۲/۶، ۸۱۵/۳، ۶۸۲/۷ و ۵۶۷/۱ گرم بر متر مربع اندازه گیری شد. در نتیجه مقدار عملکرد نسبی محصول در سطوح آبیاری ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد به ترتیب ۹۱/۳، ۸۹/۴، ۷۴/۹ و ۶۲/۲ درصد برآورد شد (۵). در تحقیق دیگر عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر چهار سطح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار عملکرد در سطوح آبیاری مذکور به ترتیب ۸۱۵۸، ۷۸۶۳، ۷۵۰۰ و ۴۲۳۸ کیلوگرم بر هکتار بود (۱). در پژوهشی نیز برای بررسی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد ذرت، تیمارهایی بر اساس تأمین ۱۰۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد مقدار عملکرد دانه ذرت در تیمارهای مذکور به ترتیب ۹۱۷/۱ و ۲۴۵/۱ گرم در متر مربع اندازه گیری شد (۷).

در پایان دوره کشت، عملکرد زیست توده خشک ذرت در تیمارهای مختلف آبیاری اندازه گیری شد. با توجه به جدول ۳ تأثیر سطوح آبیاری بر مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. مقدار عملکرد خشک ذرت در تیمارهای I<sub>0</sub>، I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۱۷/۱، ۱۵/۸، ۱۲/۶ و ۸/۷ تن بر هکتار بود (شکل ۴). نتایج نشان داد که اعمال کم آبیاری باعث کاهش عملکرد محصول ذرت نسبت به شرایط آبیاری کامل (تیمار شاهد) شد. به طوری که مقدار کاهش عملکرد در تیمارهای I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۷/۶، ۲۶/۳ و ۴۹/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. در نتیجه مقدار عملکرد نسبی ذرت در سطوح آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب ۹۲/۴، ۷۳/۷ و ۵۰/۹ درصد در منطقه قزوین برآورد شد. نتایج نشان داد کاهش هر واحد (درصد) آب آبیاری نسبت به آبیاری کامل، باعث کاهش ۰/۸۳ درصدی در مقدار عملکرد نسبی ذرت شد (شکل ۵). به طور کلی کاهش آب قابل دسترس در خاک، بر فعل و انفعالات شیمیایی گیاه و تولید ماده گیاهی مؤثر بوده و باعث کاهش عملکرد محصول ذرت شد. در تحقیقی در منطقه لرستان گزارش شد که مقدار عملکرد ماده خشک ذرت علوفه ای در شرایط تأمین ۱۰۰،

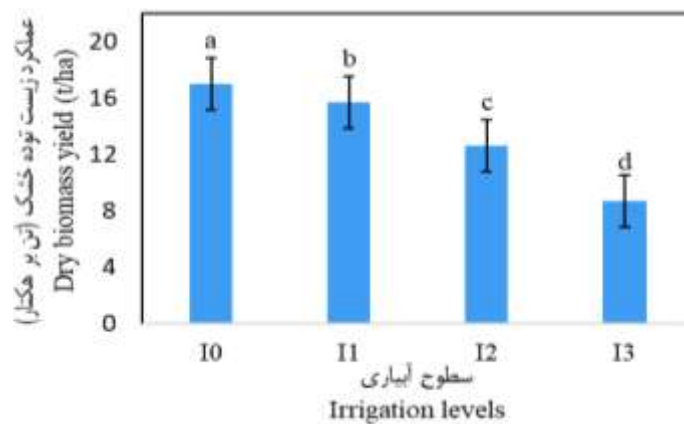
جدول ۳- تجزیه واریانس صفت عملکرد زیست توده خشک

Table 3- Analysis of variance of the dry biomass yield adjective

منابع تغییر Sources of variance	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares
تکرار Replication	2	0.09 <sup>ns</sup>
سطح آبیاری Irrigation level	3	6.34**
خطا Error	6	0.023

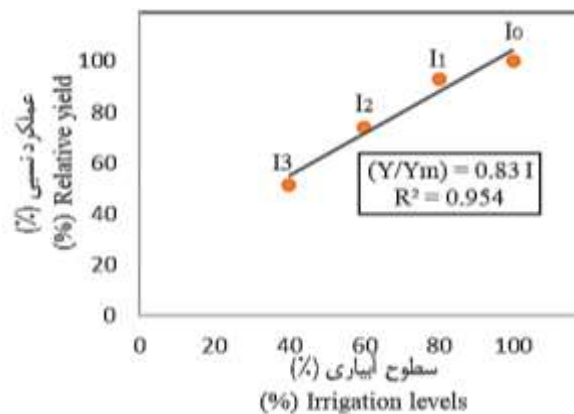
ns و \*\*: به ترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک درصد

ns and \*\*: Non significant and significant at a probability level of one percent, respectively.



شکل ۴- عملکرد زیست توده خشک ذرت تحت سطوح مختلف آبیاری

Figure 4- Dry biomass yield of maize under different irrigation levels



شکل ۵- تغییرات تبخیر-تعرق نسبی ذرت نسبت به سطوح مختلف آبیاری

Figure 5- Changes in relative evapotranspiration of maize compared to different irrigation levels

ضرایب حساسیت تنش  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  و  $\lambda_4$  در تیمارهای تحت تنش آبی برآورد شد (جدول ۴). میانگین ضرایب مذکور در تیمارهای تحت تنش به ترتیب برابر با ۰/۴۲۱، ۱/۳۷، ۰/۲۷۴ و ۰/۱۳۳ محاسبه شد. نتایج نشان داد بیشترین تا کمترین مقدار ضرایب تنش آبی ( $\lambda$ )

#### مدل سازی ضرایب حساسیت درون فصلی تنش آبی

در این پژوهش ضرایب حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی که در مدل جنسن معرفی شد، با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین شد. در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت



تعرق و عملکرد ذرت به دست می‌آید. از این رو با وجود محدود بودن داده‌های مزرعه‌ای، تردیدی از نظر صحت مدل‌سازی و دقت مدل به دست آمده، وجود نداشت. در مجموع دستاورد کاربردی این بخش از پژوهش، به کارگیری مدل تولید شده در برنامه‌ریزی کم‌آبیاری برای مراحل مختلف رشد ذرت بود. به طوری که در هر مرحله از رشد ذرت، با در نظر داشتن نسبت تبخیر-تعرق واقعی (تحت مدیریت) به تبخیر-تعرق پتانسیل (استاندارد) منطقه، می‌توان مقدار عملکرد واقعی محصول را نسبت به شرایط پتانسیل منطقه تخمین زد. در تحقیقی بر روی ذرت در بلژیک، ضریب  $\lambda$  برای دوره‌های مختلف رشد برآورد شد. نتایج نشان داد ضرایب حساسیت تنش آبی در هفته‌های ۴-۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰-۱۲ و ۱۳-۱۴ رشد ذرت، به ترتیب برابر با ۰/۰۸۸، ۰/۳۸۳، ۰/۱۲۱، ۰/۵۴۷، ۰/۱۱۷ و ۰/۰۷۶ بود (۱۱). در تحقیقات مشابه روی گیاهان دیگر، ضریب  $\lambda$  در مراحل مختلف رشد گوجه فرنگی شامل مراحل گل‌دهی و رشد میوه مدل‌سازی شد. طبق نتایج حاصل، ضریب  $\lambda$  برای عملکرد کل گیاه، وزن و قطر میوه به ترتیب ۰/۸۲، ۰/۳۹ و ۰/۴۴ (در مرحله گل‌دهی) و ۱/۷۴، ۰/۵۱ و ۰/۵ (مرحله رشد میوه) برآورد شد (۱۰). در تحقیق دیگر بر روی سورگوم ضریب  $\lambda$  برای مراحل رشد جوانه‌زنی، بذری، سیری شدن و رسیدگی دانه به ترتیب ۰/۵، ۱/۵ و ۰/۵ برآورد شد (۹). در پژوهشی بر روی نیشکر در برزیل ضریب  $\lambda$  برای مراحل رشد جوانه‌زنی تا پنجه‌زنی، توسعه و کاهش رشد (تجمع ساکاروز) به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۳۹ و ۰/۰۷ محاسبه شد (۱۸).

#### تابع عملکرد-تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد

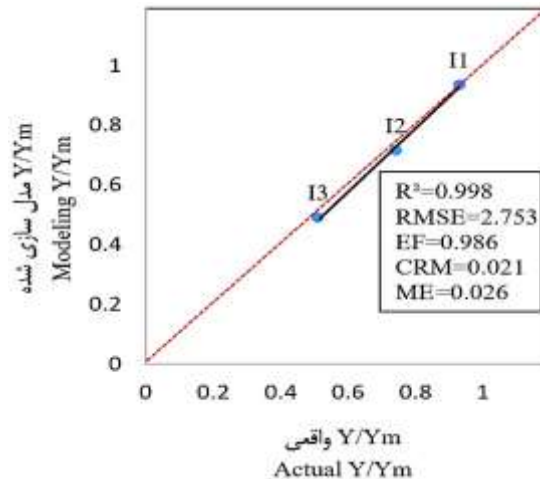
در سطوح مختلف آبیاری، بین دو پارامتر تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده خشک ذرت، رابطه‌ی ساده و خطی  $Y=69.935ET-12281$  با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹، برازش داده شد (شکل ۷). با استفاده از رابطه فوق می‌توان در مدیریت‌های کم‌آبیاری، بر اساس مقدار تبخیر-تعرق ذرت، مقدار عملکرد آن را در منطقه تخمین زد. اگر مقدار عملکرد در رابطه مذکور مساوی صفر قرار داده شود، عدد ۱۷۵ میلی‌متر برای مقدار تبخیر-تعرق به دست می‌آید. یعنی در کل دوره رشد ذرت، مقدار ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر-تعرق منجر به تولید هیچ زیست‌توده‌ای نشده است.

به ترتیب مربوط به مراحل توسعه، اولیه، میانی و پایانی رشد ذرت بود. به عبارت دیگر برای یک مقدار مشخص از تبخیر-تعرق نسبی، بیشتر بودن مقدار ضریب  $\lambda$  نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن مرحله خاص در تولید عملکرد محصول بوده است. بنابراین در مرحله توسعه رشد ذرت که زمان گسترش اندام‌های گیاهی و تولید انبوه زیست‌توده می‌باشد، تأثیر تنش آبی بر کاهش عملکرد محصول بیشتر بود. اما در مرحله پایانی رشد به دلیل رسیدگی محصول و عدم امکان رشد مجدد برای گیاه، صرفاً پُر شدن دانه‌های شیری ذرت باعث تغییر جزئی در عملکرد محصول شد. لذا کمترین مقدار ضریب  $\lambda$  در مرحله پایانی رشد ذرت مشاهده شد. در مدل جنسن، عملکرد نسبی محصول  $(\frac{Y}{Y_m})$  به عنوان متغیر وابسته و تبخیر-تعرق نسبی در مراحل رشد  $(\frac{ET_i}{ET_{mi}})$  به عنوان متغیر مستقل مدنظر قرار داشت. پس از برآورد ضرایب تنش  $\lambda$  در سطوح مختلف آبیاری، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای تبخیر-تعرق، مقدار عملکرد نسبی محصول توسط مدل تولیدی در این پژوهش، تخمین زده شد. برای صحت‌سنجی عملکرد مدل، همبستگی بین داده‌های واقعی و تخمینی عملکرد نسبی محصول در شکل (۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد آماره‌های ارزیابی  $EF$ ،  $R^2$ ،  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸، ۰/۹۸۶، ۲/۷۵۳، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۱ برآورد شد. نزدیک به یک بودن آماره‌های  $R^2$  و  $EF$  نشان‌دهنده همبستگی خوب بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی و حداقل یا نزدیک به صفر بودن آماره‌های  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل بود. در این پژوهش در مورد اعمال تنش‌های بیشتر از ۴۰ درصد نیاز آبی، این احتمال وجود داشت که به علت بسیار کم بودن حجم آب آبیاری، گیاهان به پایان دوره رشد نرسیده و در اواسط دوره رشد با خشک شدن و توقف رشد مواجه شوند. بنابراین در فرایند صحت‌سنجی مدل جنسن اگرچه تعداد تیمارهای تحت تنش محدود بود (شکل ۶)، اما مقدار تنش اعمال شده، در بر دارنده‌ی بیشترین تا کمترین حد تنش ممکن بود. از سوی دیگر هر مقداری از تنش آبی به‌طور مستقیم باعث کاهش مقادیر تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه ذرت نسبت به شرایط تحت کنترل (تیمار شاهد) می‌شد. در این شرایط اگر تعداد تیمارهای کم‌آبیاری افزایش می‌یافت، باز هم نتایج این پژوهش و روند خطی بین مقادیر تبخیر-

جدول ۴- ضرایب حساسیت درون فصلی ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری

Table 4- Intra-seasonal sensitivity coefficients of maize to water stress, at different irrigation levels

ضرایب تنش	سطح آبیاری I <sub>1</sub>	سطح آبیاری I <sub>2</sub>	سطح آبیاری I <sub>3</sub>	میانگین
Stress coefficients	I <sub>1</sub> Irrigation level	I <sub>2</sub> Irrigation level	I <sub>3</sub> Irrigation level	Average
$\lambda_1$	0.479	0.393	0.391	0.421
$\lambda_2$	1.432	1.326	1.351	1.37
$\lambda_3$	0.28	0.242	0.301	0.274
$\lambda_4$	0.3	0.044	0.055	0.133



شکل ۶- ارزیابی مدل جنسن در سطوح مختلف آبیاری

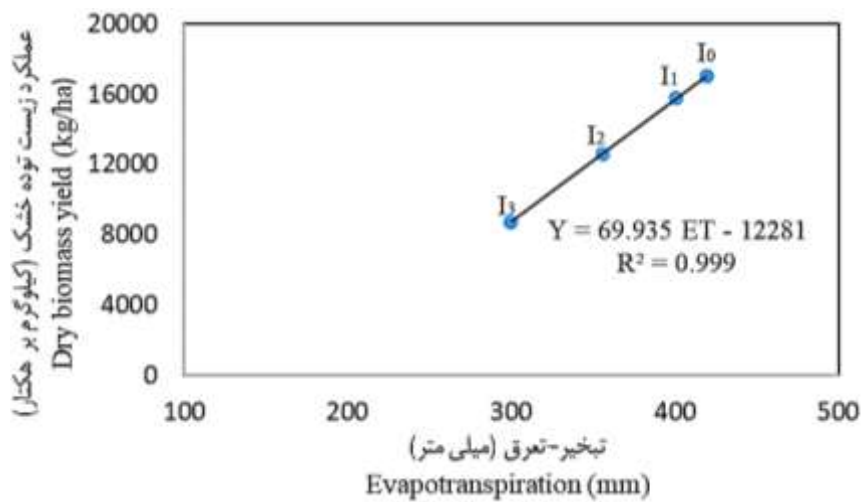
Figure 6- Evaluation of Jensen model at different irrigation levels

بود. در تحقیقی در کشور تایوان و تحت رژیم‌های آبیاری شامل آبیاری کامل، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر، تابع عملکرد دانه-تبخیر- تعرق ذرت به صورت رابطه  $Y(g.m^{-2})=1.41ET(mm)$  در ۲۱۱.۱۹ گزارش شد. به طوری که برای تولید اولین واحد (گرم بر متر مربع) دانه ذرت به ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بوده است (۵). در پژوهشی روی ذرت تحت تیمارهای شوری و حاصلخیزی گزارش شد که رابطه بین عملکرد زیست توده محصول و تبخیر-تعرق به صورت  $Y(t.ha^{-1})=0.21ET(mm)-14.4$  بود. نتایج نشان داد که در این شرایط، برای تولید اولین واحد (تن بر هکتار) زیست‌توده ذرت به ۶۸ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بوده است (۱۵).

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقادیر تبخیر-تعرق گیاه ذرت در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I<sub>0</sub>)، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I<sub>1</sub>)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی‌متر (در تیمار I<sub>2</sub>)، ۶۲/۸، ۱۴۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی‌متر (در تیمار I<sub>3</sub>) برآورد شد. میزان حساسیت به تنش آبی و نیاز متفاوت گیاه به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد ذرت، از علل کاهش متفاوت تبخیر-تعرق بود. لذا انتخاب مناسب مرحله‌ی رشد و اعمال حد منطقی از تنش آبی (در مدیریت‌های کم‌آبیاری)، می‌تواند در انجام تبخیر-تعرق بهینه گیاه مؤثر باشد. از سوی دیگر، مقدار عملکرد خشک زیست‌توده ذرت در تیمارهای I<sub>0</sub>، I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> به ترتیب برابر با ۱۷/۱، ۱۵/۸، ۱۲/۶ و ۸/۷ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد کاهش آب قابل دسترس در خاک، باعث کاهش جذب آب و تعرق گیاه و کاهش تولید ماده گیاهی شد.

به بیان دیگر، برای تولید اولین واحد زیست‌توده ذرت به ۱۷۵ میلی‌متر آب نیاز بوده است. ممکن است این مقدار تبخیر-تعرق بیشتر به سهم تبخیر از سطح خاک اختصاص یافته باشد و سهم تعرق گیاه که موجب تولید ماده گیاهی می‌شود، در آن ناچیز بوده باشد. بررسی دوره رشد ذرت نیز این نکته را تأیید می‌کند که در مرحله اولیه رشد، مقداری از آب آبیاری صرف جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه شده و قسمت بیشتر آن سهم تبخیر از خاک می‌شود. همچنین پس از رسیدگی بیولوژیک گیاه (مرحله پُر شدن دانه)، آب مصرفی تأثیری در تولید زیست‌توده گیاهی و تعرق گیاه نداشته و به تبخیر اختصاص می‌یابد. برای شناخت اثر هر محدوده تنش آبی بر نتایج فوق، رابطه عملکرد-تبخیر-تعرق در سطوح مختلف تحت تنش برآورد شد. از این‌رو روابط  $Y=69.62ET-12185$ ،  $Y=65.217ET-10339$  و  $Y=69.631ET-12189$  به ترتیب بین تیمار آبیاری کامل (I<sub>0</sub>) و سطوح آبیاری I<sub>1</sub>، I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> برقرار شد. نتایج نشان داد در تیمارهای ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد آبیاری گیاه، برای تولید اولین واحد زیست‌توده ذرت به ترتیب به ۱۷۵، ۱۷۵ و ۱۷۵ میلی‌متر آب نیاز بوده است. با عنایت به توضیحات فوق که اعداد به دست آمده را بیشتر به سهم تبخیر اختصاص می‌داد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تنش آبی بر کاهش تعرق گیاه مؤثر بود. به طوری که با افزایش شدت تنش آبی، از مقدار جذب آب و تعرق توسط گیاه کاسته شد و راندمان تبخیر-تعرق به منظور تولید محصول کاهش یافت. نتیجه کلی این‌که در مدیریت‌های کم‌آبیاری، با کاهش سهم تبخیر در مراحل اولیه و پایانی رشد، می‌توان از هدر رفت آب جلوگیری نمود و بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد. در پژوهشی در دشت‌های مرتفع آمریکا گزارش شد که برای تولید اولین واحد دانه ذرت، به ۲۷۰ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بود (۱۹). وجود تفاوت اقلیمی در منطقه آمریکا نسبت به قزوین، باعث ایجاد تفاوت در مقادیر به دست آمده نسبت به نتایج پژوهش حاضر



شکل ۷- ارتباط بین تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت در سطوح مختلف آبیاری

Figure 7- Relationship between evapotranspiration and maize yield at different irrigation levels

است. این مقدار آب ممکن است صرف جوانه‌زنی بذور و رشد گیاهچه شده در مرحله اولیه رشد و زنده نگه‌داشتن گیاه پس از رسیدگی بیولوژیک شده باشد. بنابراین تأثیری در سهم تعرق گیاه و تولید زیست‌توده گیاهی نداشته و بیشتر به تبخیر از سطح خاک اختصاص یافته است. نتایج نشان داد کاهش شدت تنش آبی، بر کاهش عرض از مبدأ رابطه مذکور و افزایش راندمان تبخیر-تعرق ذرت مؤثر بود. نتیجه کلی این که دو عامل شدت تنش آبی و حساسیت متفاوت گیاه در مراحل مختلف رشد، اثر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق واقعی، عملکرد محصول و مدل‌سازی آن داشت و در برنامه‌ریزی آبیاری حائز اهمیت بود. همچنین با کاهش آب آبیاری به‌خصوص در مراحل اولیه و پایانی رشد، سهم تبخیر از سطح خاک نسبت به تعرق گیاه افزایش یافت که این کار بر کاهش راندمان مصرف آب توسط گیاه مؤثر بود. بنابراین استفاده از مالچ در سطح خاک به‌هنگام اعمال کم‌آبیاری در مراحل رشد مذکور توصیه می‌گردد.

در پژوهش حاضر، ضرایب حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی (در مدل جنسن)، در تیمارهای تحت تنش برآورد شد. میانگین ضرایب مذکور ( $\lambda_1$  الی  $\lambda_4$ ) به ترتیب برابر با ۰/۴۲۱، ۱/۳۷، ۰/۲۷۴ و ۰/۱۳۳ تعیین شد. با توجه به مقدار ضرایب، در مرحله توسعه رشد ذرت که زمان گسترش اندام‌های گیاهی و تولید انبوه زیست‌توده می‌باشد، تأثیر تنش آبی بر کاهش عملکرد محصول بیشتر بود. در ارزیابی مدل جنسن، مقدار آماره‌های  $R^2$ ،  $EF$ ،  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸، ۰/۹۸۶، ۲/۷۵۳، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۱ برآورد شد. اعداد به‌دست آمده نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل جنسن در تخمین عملکرد نسبی محصول ذرت بود. بنابراین در هر مرحله از رشد ذرت، با در نظر داشتن نسبت تبخیر-تعرق واقعی (تحت مدیریت) به تبخیر-تعرق پتانسیل (استاندارد) منطقه، می‌توان مقدار عملکرد واقعی محصول را شبیه‌سازی نمود. در کل سطوح آبیاری، بین دو پارامتر تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، رابطه‌ی  $Y=69.935ET-12281$  برآزش داده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، برای تولید اولین واحد زیست‌توده ذرت به ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بوده

## منابع

- 1- Alinejadian Bidabadi A., Jorooni E., Barzegar A., and Maleki A. 2016. The effect of different irrigation levels on water use efficiency on the basis of maize grain and soil moisture variations. *Journal of Water and Irrigation Management* 6(1): 47-59. (In Persian with English abstract)
- 2- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation Drainage Paper No.56*: 1-326.
- 3- Akbari Nodehi D. 2018. Effect of water stress on different growth stages of yield and water use efficiency of maize. *Journal of Water and Irrigation Management* 7(2): 305-318. (In Persian with English abstract)
- 4- Farre I., and Faci J.M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Journal of Agricultural Water Management* 96: 383-394.
- 5- Greaves G., and Wang Y. 2017. Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for

- maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. *Journal of Plant Production Science* 20(4): 353-365.
- 6- Hemmati R., Maghsoudi K., and Emam Y. 2014. Morpho-physiological responses of maize to drought stress at different growth stages in northern semi-arid region of Fars. *Journal of Crop Production and Processing* 4(11): 67-74. (In Persian)
  - 7- Hooshmand A., Frutan M., and Boroomandnasab S. 2014. Evaluation of deficit irrigation and sown pattern on yield and water use efficiency of maize (KSC-704). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 37(3): 43-52. (In Persian with English abstract)
  - 8- Jarollahi R. 2001. Determination of readily available water in different stages of growth for grain corn in Karaj. *Journal of Soil and Water Sciences* 15(2): 290-298. (In Persian with English abstract)
  - 9- Jensen M.E. 1968. Water Consumption by Agricultural Plants. In: Kozlowski, T.T., (ed.) *Plant Water Consumption and Response. Water Deficits and Plant Growth*, Academic Press, New York, 2: 1-22.
  - 10- Jiang X., Zhao Y., Wang R., and Zhao S. 2019. Modeling the relationship of tomato yield parameters with deficit irrigation at different growth stages. *Journal of Hort Science* 54(9): 1492-1500.
  - 11- Kipkorir E.D., and Raes D. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. *Journal of Irrigation and Drainage Systems* 16: 47-52.
  - 12- Mohammadi Behmadi M., and Armin M. 2017. Effect of Drought Stress on Yield and Yield Components of Different Maize Cultivars in Delayed Cultivation. *Journal of Applied Research in Plant Ecophysiology* 4(1): 17-34. (In Persian)
  - 13- Nielsen R.L. 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. *Journal of Agry (Purdue)* 196: 19-25.
  - 14- Saeidi R., Sotoodehnia A., Ramezani Etedali H., Nazari B., and Kaviani A. 2018. Effect of water salinity and soil nitrogen deficiency on Ks-coefficient and readily available water of maize. *Journal of Water and Soil* 32(5): 865-878. (In Persian with English abstract)
  - 15- Saeidi R., Sotoodehnia A., Ramezani Etedali H., Kaviani A., and Nazari B. 2019. Modeling of coefficients of salinity and fertility stresses in estimation of actual evapotranspiration rate of maize. Ph.D. dissertation, Imam Khomeini International University of Qazvin. (In Persian with English abstract)
  - 16- Saeidinia M., Nasrolahi A.H., and Sharifipoor M. 2019. Investigating the Ability of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling and Estimating Corn Forage Yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(3): 555-565. (In Persian with English abstract)
  - 17- Solimanifard A., and Naseri R. 2016. The Effects of irrigation regimes and planting patterns on seed yield and some agronomic traits of maize (S.C. 604). *Journal of Crop Eco physiology* 1(37): 201-212. (In Persian).
  - 18- Souza J.L.M., Gerstemberger E., Gurski B.C., and Oliveira R.A. 2015. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. *Journal of Pesq. Agropec*, 45(4): 426-433.
  - 19- Trout T.J., and Dejonge K.C. 2017. Water productivity of maize in the US high plains. *Journal of Irrigation Science* 35: 251-266.

## Investigation of the Intra-Seasonal Sensitivity of Maize Evapotranspiration to Water Stress, at Different Irrigation Levels

R. Saeidi<sup>1\*</sup>

Received: 25-01-2021

Accepted: 11-04-2021

**Introduction:** Adequate water use in the agricultural sector requires accurate knowledge of crop sensitivity to environmental stresses (such as water stress). The crop sensitivity to water stress may be different at different growth stages and may have a different effect on the actual amount of crop evapotranspiration compared to the standard conditions. At different levels of water stress, studying the sensitivity of crop evapotranspiration at different growth stages can be provided management strategies for optimal water consumption. In the present research, the intra-seasonal sensitivity coefficients of maize were modeled by using the Jensen model.

**Materials and Methods:** In this research, the effect of water stress levels and growth stage sensitivity on the amount of maize (S.C 704) evapotranspiration was investigated. The experiment was performed as factorial based on randomized complete block design. The treatments included four irrigation levels of 100 ( $I_0$ ), 80 ( $I_1$ ), 60 ( $I_2$ ), and 40 ( $I_3$ ) percent of the crop water requirement and four growth stages of initial, development, middle and final. In between two irrigations, the amount of daily soil moisture was measured in the center of each plot and the depth of the crop root zone. Therefore, the amount of evapotranspiration of crops per unit area was estimated according to the soil water balance. Analysis of variance and mean data comparison of evapotranspiration and dry biomass yield were performed by SPSS software and using Duncan's multiple tests. By actual evapotranspiration and yield data, intra-seasonal sensitivity coefficients of maize to water stress ( $\lambda_1$  to  $\lambda_4$ ) were determined by SPSS software.

### Results and Discussion:

#### *Evapotranspiration*

The effect of irrigation water amount and growth stage on the maize evapotranspiration amount was significant at the probability level of 1%. Evapotranspiration amounts at the initial, developmental, middle, and final of maize growth stages were estimated equal to 79, 201.8, 123.8 and 14.6 mm (in  $I_0$  treatment), 78.3, 196, 126.6 and 14.6 mm (in  $I_1$  treatment), 72, 173.6, 99 and 11.7 mm (in  $I_2$  treatment), 62.8, 147.5, 81.5 and 8.4 mm (in  $I_3$  treatment), respectively. Reduction of evapotranspiration compared to control treatment ( $I_0$ ) in the initial, developmental, middle, and final growth stages were estimated equal to 0.9, 2.8, 9, and 0 (in  $I_1$  treatment), 8.8, 14, 20, and 19.8 (in  $I_2$  treatment), 20.5, 26.9, 34.2 and 42.4 (in  $I_3$  treatment) percent, respectively. The results showed that the slope of evapotranspiration reduction was not the same at different irrigation levels. Also, the relative evapotranspiration of maize (in all growth seasons) at irrigation levels of  $I_1$ ,  $I_2$ , and  $I_3$  were estimated equal to 95.6, 85, and 71.6 percent, respectively. Therefore, when applying water stress, the optimal evapotranspiration rate can be adjusted by selecting the suitable growth stage.

#### *Yield*

The effect of irrigation levels on the dry biomass yield of maize was significant at the level of 1% probability. The dry yield of maize in treatments of  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ , and  $I_3$  were equal to 17.1, 15.8, 12.6, and 8.7 (tons per hectare), respectively. The relative yield of maize at irrigation levels of  $I_1$ ,  $I_2$ , and  $I_3$  were estimated to be 92.4, 73.7, and 50.9 percent, respectively, in the Qazvin region. The reduction of soil available water affected the water uptake by the crop and reduced the yield of maize.

#### *Modeling of intra-seasonal sensitivity coefficients of water stress*

At the initial, developmental, middle, and final growth stages of maize, stress sensitivity coefficients of  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ , and  $\lambda_4$  were estimated in water stress treatments. The mean of mentioned coefficients in stress treatments was calculated to be 0.421, 1.37, 0.274, and 0.133, respectively. The results showed that during the development stage of maize growth, the effect of water stress on yield reduction was more. The model efficiency for estimating the amount of relative yield was evaluated. Evaluation statistics of  $R^2$ , EF, RMSE, ME and CRM were estimated to be 0.998, 0.986, 2.753, 0.026 and 0.021, respectively. The results showed that the Jensen

1- Ph.D. of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University

(\*- Corresponding Author Email: Saeidi@org.ikiu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2021.68147.1011

model efficiency was good, and it can be used in planning the low irrigation for different growth stages of maize.

*Yield-Evapotranspiration Function of Maize in all of the growth stages*

Across different irrigation levels, a simple linear relationship of  $Y=69.935ET-12281$  (with a correlation coefficient of 0.999) was fitted between two parameters of evapotranspiration and dry biomass yield of maize. Therefore, using the above equation in low irrigation management, the amount of maize yield can be estimated based on the evapotranspiration amount. In this research, 175 mm evapotranspiration was needed for the production of the initial unit of maize biomass. That is, the transpiration portion in the above amount was negligible, and it was mostly allocated to the soil evaporation portion.

**Conclusion:** The crop sensitivity to water stress and different needs to transpiration at different growth stages were the reasons for the different reduction of maize evapotranspiration. Reduction of soil available water reduced the water uptake and transpiration, and crop biomass. The results showed that reducing the water stress was effective in increase of maize evapotranspiration efficiency. In order to produce the maximum crop biomass, the sensitivity of the maize growth stage and the water stress level must be considered.

**Keywords:** Crop yield, Growth stages, Jensen model, Low irrigation