

## مدل سازی مقدار رطوبت خاک با استفاده از شاخص تنش آبی (CWSI) در کشت ذرت

رضا سعیدی<sup>۱</sup>، محمدمهدی ضرابی<sup>۲\*</sup> و عباس ستوده‌نیا<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۴/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

مقاله پژوهشی

### چکیده

به منظور تخمین مقدار رطوبت خاک با استفاده از مقدار شاخص تنش آبی CWSI، پژوهشی بر روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی بود. در تیمار شاهد، آبیاری کامل و در تیمارهای دیگر، تنش آبی تا حد پژمردگی موقت در مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها اعمال شد. پارامترهای هواشناسی، مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. در مراحل مختلف رشد، خط مبنای پایین تنش دارای عرض از مبدأ و شیب به ترتیب ۲/۶۴ تا ۳/۷۵ و ۰/۰۹ تا ۰/۱۴ بود. مقدار خط مبنای بالای تنش نیز بین ۳/۳ تا ۴/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. در روزهای اعمال تنش، شاخص CWSI محاسبه و مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج حاصل، بین مقادیر رطوبت خاک و شاخص CWSI رابطه‌ای معکوس و با همبستگی خوب برقرار شد. لذا مدل‌های رگرسیونی با فرم‌های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بین دو پارامتر مذکور برآزش داده شد. قوی‌ترین و ضعیف‌ترین مدل تخمین مقدار رطوبت خاک، به ترتیب مدل‌های درجه دوم و توانی با ضرایب همبستگی ۰/۹۸۷ و ۰/۶۵ بود. نتایج نشان داد مقادیر بحرانی شاخص CWSI در زمان افزایش دمای سطح برگ نسبت به دمای هوا، تعیین‌کننده زمان آبیاری بود. همچنین با برآورد غیر مستقیم مقدار رطوبت خاک از روی شاخص CWSI، کمبود رطوبت خاک و آب مورد نیاز برای آبیاری محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح برگ، مدل رگرسیونی، مراحل رشد

۱- دکترای مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup>، قزوین، ایران. (Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir)

۲- دانشیار گروه مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup>، قزوین، ایران. (\*- نویسنده مسئول: Email: zarrabi@eng.ikiu.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup>، قزوین، ایران. (Email: sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir)

## مقدمه

تأمین به موقع نیاز آبی گیاهان به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب، همواره از نکات قابل توجه برنامه‌ریزان آبیاری بوده است، لذا تعیین زمان انجام آبیاری با توجه به واکنش‌های گیاهی و مقدار رطوبت خاک، حائز اهمیت می‌باشد. در میان گیاهان علوفه‌ای، ذرت نقش به‌سزایی در فراهم نمودن خوراک دام و طیور دارا است. کشت این گیاه به صورت آبی بوده و مانند گندم، جو و برنج دارای اهمیت استراتژیک می‌باشد. به همین دلیل، محققان بخش کشاورزی همواره به دنبال یافتن راه‌کارهایی برای تعیین دقیق زمان انجام آبیاری، تأمین مناسب نیاز آبی گیاه و افزایش بهره‌وری مصرف آب در این محصول بوده‌اند. پر واضح است که در صورت تأخیر در تأمین آب مورد نیاز گیاه، تنش آبی به گیاه اعمال شده و عملکرد محصول کاهش می‌یابد. از این رو تعیین مقدار رطوبت خاک در آستانه‌ی ورود تنش آبی به گیاه، می‌تواند معیاری در جهت انجام به‌موقع آبیاری به‌شمار رود. برای بررسی مطالب مذکور، در تحقیقی گزارش شد تنش آبی، فتوسنتز را از طریق بسته شدن روزنه‌ها و عدم رسیدن دی‌اکسید کربن به کلروپلاست و کاهش پتانسیل آب سلول‌های گیاهی، تحت تأثیر قرار می‌دهد (Huner and Hopkins, 2008). در زمان کاهش آب خاک، جذب آب توسط گیاه کاهش یافته، تعرق گیاه کندتر شده و روزنه‌های گیاه شروع به بسته شدن می‌نمایند. در این شرایط تبادل گرمای نهان بین سطح برگ و هوای محیط کمتر شده و انرژی تابشی خورشید باعث افزایش دمای برگ می‌گردد. هنگامی که دمای سطح برگ ( $T_c^1$ ) از دمای هوا ( $T_a^2$ ) بیشتر شد، تنش آبی به گیاه اعمال شده و تعرق آن نسبت به تعرق پتانسیل گیاهان در منطقه تحت کشت کمتر می‌شود (Taiz and zeiger, 2008). در تحقیق دیگر گزارش شد در وضعیتی که مقدار دمای سطح برگ منهای دمای هوا بزرگتر از صفر بود ( $T_c - T_a > 0$ )، گیاه تحت اعمال تنش آبی می‌باشد. در این شرایط گیاه برای مقابله با تنش آبی و حفظ آب اندام‌های خود، اقدام به بستن روزنه‌ها نموده تا از شدت تعرق کاسته شود. به همین علت دمای پوشش سبز گیاهی

نسبت به دمای هوا افزایش می‌یابد (Gonzalez et al., 2005). محققان دیگر نیز اعلام کردند در شرایط تنش آبی، روزنه‌های برگ‌ها برای حفظ آب در اندام‌های گیاه شروع به بسته شدن می‌نمایند. در نتیجه هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه کاهش یافته و دمای سطح برگ افزایش می‌یابد (Ballester et al., 2013). نتایج تحقیق دیگر نشان داد مقاومت روزنه‌ای و تعرق گیاه رابطه‌ای مستقیم با مقدار رطوبت خاک داشت. از سوی دیگر، مقاومت روزنه‌ای گیاه با اختلاف دمای سطح برگ و هوا و رطوبت نسبی محیط نیز همبستگی داشت (Blonquist et al., 2009). بنابراین نتایج نشان داد که کاهش آب خاک و اعمال تنش آبی برگ‌ها، واکنش‌هایی از قبیل افزایش دمای سطح برگ گیاه نسبت به دمای هوا را به همراه داشته است. بر اساس تحقیقات گذشته، بین اختلاف دمای سطح برگ و دمای هوا با پارامتر کمبود فشار بخار هوا ( $AVPD$ ) یک رابطه خطی قابل برآزش بوده است (Idso, 1981). بر روی خط برآزش یافته که به خط مبنای پایین تنش آبی نامیده شد، اختلاف بین دمای هوا و سطح برگ منفی بوده و تعرق گیاه به‌طور کامل (در حد پتانسیل) انجام می‌شد. اما خط دیگری به نام خط مبنای بالای تنش آبی نیز وجود داشت که اختلاف دمای هوا و سطح برگ بر روی آن مثبت بود و در حداکثر مقدار خود قرار داشت. به‌طوری که در آن نقطه دمایی، تعرق گیاه متوقف گردید (Ids, 1981). Oترسیم خط مبنای بالای تنش آبی مستلزم اندازه‌گیری بیشترین دمای سطح برگ گیاه در طول روز بود. به همین دلیل در تحقیقی بر روی ذرت گزارش شد بیشترین دمای پوشش سبز در گیاه، دو ساعت بعد از ظهر خورشیدی اتفاق افتاد (Taghvaeian et al, 2014). در تحقیقات دیگر، زمان اندازه‌گیری بالاترین دمای سطح برگ ذرت طی روز در ساعات بین ۱۲ الی ۱۷ (Gonzalez et al., 2013)، ساعات ۱۱ الی ۱۴ (قربانی و برومندنسب، ۱۳۹۵) و ساعات ۱۳ الی ۱۵ (Gardner et al., 1981) توصیه شد. بنابراین با توجه به نقطه‌ی مشترک تحقیقات گذشته، ساعت ۱۴ مناسب‌ترین زمان برای اندازه‌گیری بالاترین دمای سطح برگ بوده است. از سوی دیگر در محدوده‌ی خطوط مبنای



رابطه‌ای خطی با همبستگی معکوس وجود داشت. لذا استفاده از این روابط در برنامه‌ریزی آبیاری توصیه شد (Paltineanu et al., 2013). تحقیق مشابهی نیز بر روی لوبیا، شامل تیمارهایی با چهار سطح آبیاری (۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی) و سه رقم (چیتی، صدری و کوشا) انجام شد. نتایج نشان داد یک رابطه‌ی خطی بین شاخص CWSI و مقدار آب مصرفی در ارقام مختلف وجود داشت که از دقت بالایی برخوردار بود (نوری و همکاران، ۱۳۹۷). لذا با توجه به وجود همبستگی بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت خاک، می‌توان انواع مدل‌های تجربی را برای این منظور بررسی نموده و مناسب‌ترین مدل را معرفی نمود. به‌طوری که در تحقیقات گذشته، تابع درجه دوم به‌عنوان تابع بهینه تولید گندم (محمدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ Kalra et al., 2007) و تولید بذر یونجه (Shock et al., 2007) معرفی شد. در حالت کلی هدف از انجام پژوهش کنونی، تعیین خطوط مبنای پایین، بالا و شاخص تنش آبی در مراحل مختلف رشد ذرت در منطقه قزوین بود. تاکنون در تحقیقات زیادی، حساسیت متفاوت مراحل رشد ذرت به تنش آبی گزارش شد. به‌طوری که حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به تنش آبی، مرحله‌ی گل‌دهی تا شیری شدن دانه اعلام گردید (Ayana, 2011). در پژوهش حاضر، احتمال تأثیر متفاوت مرحله‌ی رشد گیاه ذرت بر مقدار شاخص CWSI و همبستگی بین مقدار رطوبت خاک و شاخص CWSI در مراحل مختلف رشد، به‌عنوان طرحی نو مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش با استفاده از انواع مدل‌های رگرسیونی، مقدار رطوبت خاک (متغیر وابسته) از روی مقدار شاخص CWSI (متغیر مستقل) تخمین زده شد و مدل بهینه برای این منظور معرفی شد. بنابراین با استفاده از پارامترهای گیاهی (مانند دمای سطح برگ) و پارامترهای هواشناسی (مانند دمای هوا و رطوبت نسبی) علاوه بر بررسی وضعیت تنش آبی در گیاه، مقدار رطوبت خاک ناحیه ریشه نیز برآورد شد. یعنی بدون اندازه‌گیری مستقیم و فقط از روی واکنش‌های گیاهی و وضعیت محتوای آب موجود در گیاه، مقدار رطوبت خاک تخمین زده شد با این کار ضمن تعیین کمبود رطوبت خاک و

پایین و بالای تنش، شاخص تنش آبی گیاه<sup>۱</sup> (CWSI) توسط آیدسو و همکاران (۱۹۸۱) ارائه شد که نشان‌دهنده وضعیت تنش آبی در گیاه بود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). دامنه تغییرات شاخص CWSI، بین صفر تا یک تعیین شد. عدد صفر یعنی گیاه با تنش آبی مواجه نبود و در وضعیت حداکثر تعرق قرار داشت. اما عدد یک، گویای حداکثر تنش آبی اعمال شده به گیاه و توقف تعرق بود (Idso, 1981). در تحقیقات گذشته گزارش شد که برای محاسبه شاخص CWSI، نمی‌توان به‌طور مستقیم از پارامتر رطوبت خاک استفاده نمود و فقط مقدار دمای سطح برگ مد نظر قرار می‌گیرد. اما شاخص CWSI معیار مناسبی برای تخمین وضعیت رطوبتی گیاه و خاک، در مراحل مختلف رشد گیاه بوده است (فیضی اصل و همکاران، ۱۳۹۳). دلیل نتایج مذکور این بود که افزایش یا کاهش شاخص CWSI، تحت تأثیر مقدار رطوبت خاک ناحیه‌ی ریشه‌ی گیاه بوده است. یعنی اگر رطوبت خاک ناحیه ریشه در حد ظرفیت زراعی بود، شاخص CWSI به عدد صفر نزدیک می‌گردد و اگر رطوبت خاک کاهش یافته و تنش آبی تا حد پژمردگی به گیاه اعمال شود، شاخص CWSI به عدد یک نزدیک می‌گردد. در این صورت یک رابطه‌ی معکوس بین مقدار رطوبت خاک و شاخص CWSI برقرار خواهد بود. همچنین از رابطه‌ی مذکور می‌توان به‌عنوان یک مدل تجربی در تخمین غیر مستقیم رطوبت خاک بهره‌برداری نمود. در تحقیقات گذشته با هدف زمان‌بندی تک آبیاری گندم با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه، گزارش شد که بین دمای پوشش سبز گیاه و مقدار آب موجود در پروفیل خاک (در عمق توسعه ریشه) همبستگی خطی با ضریب تبیین ۰/۷۸ برقرار بود (دهقانی سانج و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیق دیگر، رابطه‌ی خطی بین شاخص تنش آبی (CWSI) و مقدار رطوبت خاک (SMC2) برازش داده شد. نتایج نشان داد با کمک رابطه‌ی خطی مذکور و داشتن مقادیر CWSI، می‌توان مقدار رطوبت خاک را تخمین زد و آبیاری را برای تأمین رطوبت مورد نیاز گیاه انجام داد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳). در تحقیقی بر روی درختان هلو گزارش شد که در روزهای آفتابی، بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت خاک

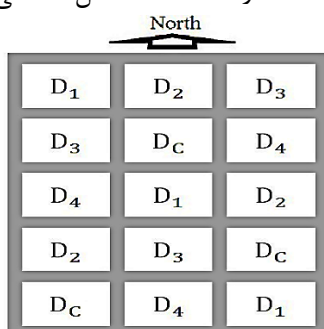
رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد ۳×۳ متر و با فاصله ۲ متر از هم کاشته شد. هر کرت دارای چهار ردیف کشت جوپچه‌ای بود که به صورت سطحی آبیاری شد. تاریخ کاشت بذرها در هفتم تیر ماه و تراکم آن‌ها ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار بود. بر اساس نتایج تحلیل شیمیایی خاک در جدول (۲)، مصرف کودهای نیتروژن (اوره)، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به ترتیب به مقدار ۳۵۰، ۲۰۰، ۲۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار توسط آزمایشگاه خاک توصیه شد. کود نیتروژن در طول دوره کشت و بقیه کودها قبل از کشت به خاک اضافه شد. در تیمار شاهد ( $D_C$ ) آبیاری کامل انجام شد و در تیمارهای دیگر، تنش آبی تا آستانه پژمردگی موقت گیاه (انسداد جزئی روزه برگ‌ها) در چهار مرحله رشد ۶ برگی ( $D_1$ )، ۱۲ برگی ( $D_2$ )، گل‌دهی ( $D_3$ ) و خمیری شدن دانه‌ها ( $D_4$ ) اعمال شد. تیمارها در سه تکرار و مجموعاً ۱۵ کرت، به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به اجرا درآمد (شکل ۱).

محاسبه‌ی آب مورد نیاز در زمان انجام آبیاری، از صرف وقت و انرژی اضافی برای اندازه‌گیری مستقیم مقدار رطوبت خاک جلوگیری شد.

## مواد و روش‌ها

### اطلاعات مزرعه‌ای

محل اجرای پژوهش در مزرعه دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ه)</sup> با عرض جغرافیایی "۳۶°۱۸'۱۷" شمالی، طول جغرافیایی "۵۰°۰۰'۳۳" شرقی و ارتفاع ۱۳۸۲ متر از سطح دریا بود. آمار روزانه هواشناسی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی و غیره، طی دوره رشد گیاه از ایستگاه هواشناسی کنار مزرعه جمع‌آوری شد و آمار ماهانه آن‌ها در جدول (۱) ارائه شد. آب مورد نیاز برای انجام آبیاری از آب چاه با هدایت الکتریکی  $\frac{ds}{m}$  ۰/۵ و اسیدیته ۷/۲ تأمین شد. پیش از اجرای پژوهش، در ۵ نقطه از مزرعه و از اعماق ۳۰-۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری، نمونه خاک تهیه شد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی بر روی نمونه‌ها انجام شد. گیاه مورد مطالعه ذرت



شکل (۱): نقشه اعمال تیمارها در مزرعه جدول (۱): آمار هواشناسی در دوره زمانی کشت ذرت

ماه	دما ( $^{\circ}C$ )		درصد رطوبت نسبی		بارندگی (mm)	ساعات آفتابی	تبخیراز (mm)	حداکثر سرعت باد ( $m.s^{-1}$ )
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر				
تیر	۱۳/۶	۴۰	۸	۸۵	۰	۳۷۵/۱	۳۴۱/۳	۱۴
مرداد	۱۴/۲	۴۰/۶	۹	۸۸	۰	۳۵۵/۷	۲۷۱/۹	۱۶
شهریور	۱۱	۳۶/۴	۷	۹۲	۰	۳۲۴	۲۵۶/۵	۱۰
مهر	۱	۳۲	۹	۹۴	۰	۲۸۸/۶	۱۷۰/۷	۱۵

جدول (۲): خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

عمق خاک (سانتی‌متر)	واحد	پارامتر
۳۰-۶۰	۰-۳۰	هدایت الکتریکی خاک
۰/۶	۰/۵۴	$dS.m^{-1}$
۷/۶	۷/۶	-
۰/۰۹	۰/۰۶	درصد
۰/۱	۰/۰۶	درصد
۱	۴	p.p.m
۶۰	۲۸۸	p.p.m
SL	SL	-
۸	۱۰	درصد
۲۸/۵	۳۲	درصد
۶۳/۵	۵۸	درصد
۲۴	۲۴/۷	درصد
۱۰/۵	۱۱	درصد
۱/۵۵	۱/۵۱	$g.cm^{-3}$

است که قبل از شروع کشت، دستگاه TDR در خاک مزرعه (عمق متوسط ریشه) واسنجی شد. عمق متوسط ریشه ذرت ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (ابراهیمی زاده و حسن‌لی، ۱۳۸۷). تیمار شاهد متشکل از سه کرت بود که برای جلوگیری از اعمال تنش آبی به آن، قبل از اتمام آب سهل‌الوصول (RAW2) خاک، آبیاری آن انجام شد. با توجه به تحقیقات گذشته، حد آب سهل‌الوصول خاک در تمام مراحل رشد ذرت، بین ۴۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد (جاراللهی، ۱۳۸۰؛ وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین برای اطمینان از انجام تبخیر-تعرق استاندارد در کرت‌های شاهد و این‌که در حساس‌ترین دوره رشد هم تنش آبی به آن‌ها وارد نمی‌گردد، حداکثر تخلیه‌ی مجاز رطوبت به مقدار ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. یعنی زمان آبیاری کرت‌های شاهد، پس از تخلیه‌ی ۴۰ درصد از مقدار رطوبت بین حد ظرفیت زراعی ( $FC^3$ ) و نقطه‌ی پژمردگی دائم ( $PWP^4$ ) بوده است. درصد رطوبت خاک در حد  $FC$  و  $PWP$  با استفاده از دستگاه‌های صفحات فشاری و آون حرارتی، محاسبه و در جدول (۲) ارائه شد. اما سایر تیمارها شامل اعمال تنش خشکی در مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بود. به‌طور کلی

#### اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ

در هر مرحله از رشد ذرت، مقدار مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ‌ها به‌ترتیب توسط دستگاه‌های پرومتر مدل AP4 و دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری شد. داده‌های مقاومت روزنه‌ای هر روز در ساعت ۷ صبح اندازه‌گیری شد. در این زمان مقدار رطوبت خاک، مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ در یک حد متعادل قرار داشت و فاقد خطای احتمالی تحت تأثیر گرمای میانی روز بود. دمای برگ‌ها نیز به‌صورت روزانه، از ساعت ۷ الی ۱۴ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پارامترهای مذکور، از هر کرت به‌طور تصادفی سه گیاه و از هر گیاه سه برگ جوان انتخاب شد. از سوی دیگر برای جلوگیری از تأثیر تابش مستقیم نور خورشید بر دمای سطح برگ گیاه، این پارامتر از چهار جهت مختلف اندازه‌گیری شد. بنابراین میانگین داده‌ها در هر کرت، معرف مقدار پارامتر مد نظر بوده است.

#### تعیین زمان انجام آبیاری

در این پژوهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه، به‌صورت روزانه با دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR<sup>۱</sup>) مدل TRIME-FM اندازه‌گیری شد. لازم به‌ذکر

4- Permanent Wilting Point

1- Time Domain Reflectometer

2- Readily Available Water

3- Field Capacity

تیمار بودند، دمای هوا، رطوبت نسبی، مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ‌ها به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. از نظر زمانی، تعرق کامل گیاهان در شرایط قبل از اعمال تنش خشکی و بلافاصله پس از آبیاری کرت‌ها وجود داشت. اما پس از اعمال تنش آبی و کاهش رطوبت خاک، حداقل تعرق ممکن (نزدیک به صفر) نیز در روز قبل از آبیاری اتفاق افتاد. با استفاده از داده‌های هواشناسی و دمای سطح برگ، کمبود فشار بخار هوا (VPD) بر اساس رابطه (۲) و خط مبنای پایین تنش آبی بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد. خط مبنای پایین تنش آبی معرف شرایطی بود که هیچ‌گونه محدودیت کمبود رطوبت در ناحیه ریشه گیاه وجود نداشت و مقدار تعرق گیاه برابر با مقدار تعرق پتانسیل بود. در این پژوهش، بیشترین تعرق (تعرق کامل) در تیمار بدون تنش آبی (شاهد) وجود داشت. برای ترسیم خط مبنای بالای تنش آبی (رابطه ۴)، بیشترین اختلاف دمای سطح برگ و هوا در ساعت ۱۴ روزهای اعمال تنش اندازه‌گیری شد. این خط نشان‌دهنده مکان هندسی مقادیر اختلاف دمایی (بین هوا و سطح برگ) بود که در آن شرایط، تعرق گیاه نزدیک به صفر بود. در زمان اعمال تنش در هر مرحله‌ی رشد، نوسانات دمایی ناگهانی وجود نداشت. لذا در رابطه ۴، خط مبنای بالای تنش تقریباً یک خط مستقیم با مقدار فرضی h بود. شاخص تنش خشکی گیاه (CWSI) نیز از طریق رابطه (۵) محاسبه شد.

$$VPD = 10 \times \exp \left[ \frac{16.78 T_a - 116.9}{T_a + 237.3} \right] \left( 1 - \frac{RH}{100} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، VPD: کمبود فشار بخار هوا (میلی بار)،  $T_a$ : دمای هوا (سانتی‌گراد) و RH: درصد رطوبت نسبی هوا بود.

$$(T_c - T_a)_{l,l} = a - b(VPD) \quad (3)$$

رابطه (۳) نشان‌دهنده خط مبنای پایین تنش آبی،  $T_c$ : دمای سطح برگ (سانتی‌گراد) و  $T_a$ : دمای هوا (سانتی‌گراد) بود. نماد l.l بیانگر خط پایین (low line) بود که در شکل (۲) نشان داده شد.

$$(T_c - T_a)_{u,l} \approx h \quad (4)$$

رابطه (۴) نشان‌دهنده خط مبنای بالای تنش آبی و h: مقدار اختلاف دمای سطح برگ و هوا در زمان حداکثر دمای روزانه بود. نماد u.l بیانگر خط بالا (up line) بود که در شکل (۲) نشان داده شد.

با کاهش رطوبت خاک در روزهای پس از آبیاری، مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاهان نسبت به روزهای اولیه پس از آبیاری افزایش می‌یابد. در این شرایط تا قبل از اعمال اثر تنش آبی، مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاهان شاهد و تحت تنش با هم برابر خواهد بود. اما در اثر تنش اعمال شده، به اختلاف مقاومت روزنه‌ای در گیاهان شاهد و تحت تنش (تا زمان انسداد روزنه‌ی گیاهان تحت تنش) افزوده می‌شود. از سوی دیگر دمای سطح برگ گیاه نیز رفتاری شبیه به مقاومت روزنه‌ای خواهد داشت. به طوری که تحت تأثیر تنش آبی، بیشتر از دمای هوای مجاور گیاه خواهد شد. لحظه‌ی افزایش مقاومت روزنه‌ای گیاهان تحت تنش نسبت به شاهد و افزایش دمای سطح برگ نسبت به دمای هوا، نشان‌دهنده آستانه‌ی تحمل تنش آبی توسط گیاه می‌باشد. همچنین واکنش‌های گیاهی مذکور، بیانگر اتمام آب سهل‌الوصول خاک منطقه‌ی ریشه، کاهش پتانسیل جذب آب و اثرگذاری تنش آبی بر گیاهان می‌باشد. در مورد کرت‌هایی که در مرحله‌ی اعمال تیمار بودند، باید بیان نمود که تا حد پژمردگی موقت گیاه (انسداد جزئی روزنه‌ها) به آن‌ها تنش آبی اعمال شد و سپس آبیاری آن‌ها انجام شد.

### محاسبه‌ی حجم آب آبیاری

حجم آب آبیاری برای هر کرت، با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک تا حد FC، عمق ریشه گیاه و مساحت کرت، بر اساس رابطه (۱) تعیین شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. آب از منبع مورد نظر توسط لوله به کرت‌ها انتقال داده شد و آبیاری به صورت سطحی، بدون تلفات و با بازده کاربرد صد در صد انجام شد.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_i)}{100} \cdot \rho_b \cdot D_{rz} \cdot A \quad (1)$$

$V$ : حجم آب آبیاری ( $m^3$ ),  $\theta_{FC}$ : درصد رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت زراعی،  $\theta_i$ : درصد رطوبت وزنی خاک در زمان آبیاری،  $\rho_b$ : چگالی ظاهری خاک ( $\frac{gr}{cm^3}$ ),  $D_{rz}$ : عمق ریشه گیاه (m) و A: مساحت کرت ( $m^2$ ) بود.

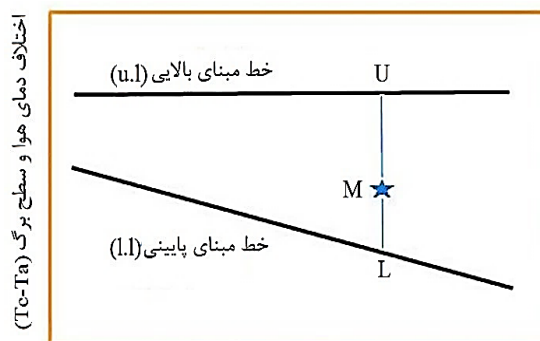
### برآورد شاخص تنش آبی (CWSI)

به منظور محاسبه‌ی خطوط مبنای پایین، بالا و شاخص تنش آبی (CWSI) برای گیاهانی که در مرحله‌ی اعمال

$(T_c - T_a)_M$  با خط مبنای پایین و LU نشان دهنده مقدار اختلاف بین خط مبنای پایین و بالا بود که در شکل (۲) نشان داده شد.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_M - (T_c - T_a)_{l,l}}{(T_c - T_a)_{u,l} - (T_c - T_a)_{l,l}} = \frac{ML}{LU} \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $(T_c - T_a)_M$  اختلاف دمایی سطح برگ و هوا در زمان ثبت داده بود. به طور کلی، ML بیانگر اختلاف بین



کمبود فشار بخار هوا (VPD)

شکل (۲): موقعیت خط مبنای بالا و پایین تنش آبی

$$\theta = A_0 (CWSI)^{A_1} \quad (11)$$

در مرحله ی بعد، از طریق توابع رگرسیونی فوق و با داشتن مقدار شاخص CWSI، مقادیر رطوبت خاک ( $\theta$ ) پیش بینی شد. سپس با داشتن داده های مشاهده ای (Observation) و پیش بینی شده (Predict) رطوبت خاک، عملکرد توابع مذکور صحت سنجی شد. آماره های ارزیابی توابع شامل حداکثر خطا  $(ME)^1$ ، ریشه میانگین مربعات خطا  $(RMSE)^2$ ، ضریب تعیین  $(R^2)^3$ ، کارایی مدل سازی  $(EF)^4$  و ضریب باقیمانده  $(CRM)^5$  بود. به این ترتیب اعتبار توابع، ارزیابی و تابع بهینه بر اساس آن انتخاب شد. برای اولویت بندی توابع، هر تابعی که آماره  $RMSE$ ،  $ME$  و  $CRM$  آن حداقل (نزدیک به صفر) بود و یا آماره های  $R^2$  و  $EF$  آن نزدیک به یک بود، به عنوان تابع بهینه برگزیده شد. معادلات مربوط به آماره های ارزیابی در روابط (۱۲) الی (۱۶) ارائه شد. حروف P و O در معادلات مذکور، به ترتیب بیانگر داده های مشاهده ای در مزرعه و پیش بینی شده توسط مدل مربوطه بود (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷).

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (12)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13) \quad R^2 =$$

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

$$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

### تخمین رطوبت خاک ( $\theta$ )

در این پژوهش امکان مدل سازی مقدار رطوبت خاک ( $\theta$ ) با استفاده از مدل های تجربی بر مبنای رابطه (۶) بررسی شد. در این رابطه شاخص تنش آبی (CWSI) متغیر مستقل و مقدار رطوبت وزنی خاک ( $\theta$ ) متغیر وابسته به شاخص CWSI بود. با توجه به این که فقط تأثیر تغییرات شاخص CWSI بر رطوبت خاک در نظر گرفته شد، سایر عوامل تأثیرگذار ثابت و پارامتر  $A_0$  نشان دهنده بردار عوامل ثابت بود. شاخص CWSI به صورت بی بُعد و مقدار پارامتر  $\theta$  برحسب درصد در نظر گرفته شد. برای مدل سازی و نشان دادن ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته، از توابع رگرسیونی در نرم افزار اکسل استفاده شد. این توابع (مدل ها) شامل فرم های خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی بود که به عنوان توابع تولید  $\theta$ -CWSI به ترتیب در روابط (۷) الی (۱۱) ارائه شد. در نرم افزار SPSS ضرایب توابع رگرسیونی برآورد شد و برای تعیین معنی داری کلی توابع، از آماره F استفاده شد.

$$\theta = f(CWSI, A_0) \quad (6)$$

$$\theta = A_0 + A_1 (CWSI) \quad (7)$$

$$\theta = A_0 \cdot e^{[A_1 (CWSI)]} \quad (8)$$

$$\theta = A_0 + A_1 \ln(CWSI) \quad (9)$$

$$\theta = A_0 + A_1 (CWSI) + A_2 (CWSI)^2 \quad (10)$$

کنونی، مقدار عرض از مبدأ (پارامتر a) خط مبنای پایین تنش بین ۲/۶۴ تا ۳/۷۵ و مقدار شیب آن (ضریب b) بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۴ بود. در تحقیق مشابهی بر روی ذرت، مقدار a در طول فصل رشد بین ۳/۲۹ تا ۴/۱۶ و ضریب b بین ۰/۰۶۸ تا ۰/۱ برآورد شد (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸). تحقیقات دیگر نشان داد که مقادیر a و b در طول فصل رشد ذرت نوساناتی داشته است. علت آن به تغییرات پتانسیل جذب آب و مقدار متفاوت تعرق در طول دوره رشد مربوط بوده است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). آیدسو (۱۹۸۲) مقادیر a و b را برای ذرت، در مناطقی از آمریکا به ترتیب برابر با ۳/۱۱ و ۰/۱۹۷ به دست آورد. نتایج نشان داد مقادیر a و b می‌توانند تحت تأثیر رقم محصول، شرایط آب، خاک و اقلیم منطقه تحت کشت قرار گیرند (Colak and Yazar, 2017). در تحقیقی در کرج، تأثیر تخلیه رطوبت خاک در چهار مرحله رشد استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد خطوط مبنای بالا و پایین تنش آبی در کل دوره رشد به ترتیب ۳/۲ درجه سانتی‌گراد و  $(T_c - T_a)_{l,1} = 1.609 - 0.164VPD$  برآورد شد (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). در تحقیقی بر روی ذرت در خوزستان، خط مبنای پایین تنش برای ماه‌های اردیبهشت و خرداد به ترتیب  $(T_c - T_a)_{l,1} = 1.1 - 0.216VPD$  و  $(T_c - T_a)_{l,1} = 1.28 - 0.207VPD$  برآورد شد (طاهری قناد، ۱۳۸۱). در تحقیق دیگر بر روی ذرت در اهواز، مقدار خط بالای تنش در ماه‌های شهریور و مهر به ترتیب ۵ و ۴/۹ درجه سانتی‌گراد و معادله‌ی خط مبنای پایین تنش آبی به ترتیب  $(T_c - T_a)_{l,1} = 2.62 - 0.209VPD$  و  $(T_c - T_a)_{l,1} = 2.77 - 0.23VPD$  محاسبه شد (قربانی و برومندنسب، ۱۳۹۵). در تحقیقی دیگر بر روی ذرت، خط مبنای پایین تنش در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد تحت شرایط اقلیمی اهواز به ترتیب  $(T_c - T_a)_{l,1} = 3.09 - 0.198VPD$  و  $(T_c - T_a)_{l,1} = 4.36 - 0.167VPD$  برآورد شد و خط بالای تنش به ترتیب ۴/۳۴، ۶/۱ و ۴/۶۴ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (محمدی، ۱۳۹۲). تحقیقی نیز شامل سه سطح آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی، بر روی ذرت در منطقه ارومیه انجام شد. معادله‌ی خط مبنای پایین تنش برای ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب  $(T_c - T_a)_{l,1} = 3.461 -$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

## نتایج و بحث

### خطوط مبنای پایین و بالای تنش آبی

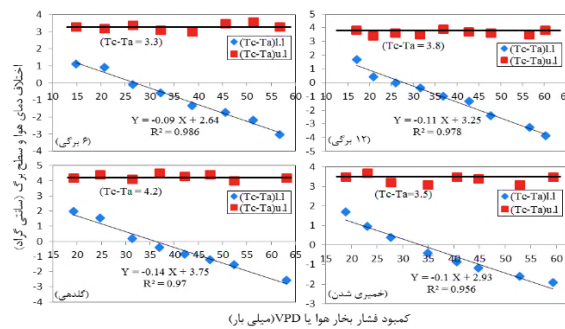
خط مبنای پایین تنش آبی بین مقادیر کمبود فشار بخار هوا (VPD) و اختلاف دمای سطح برگ و هوا ( $T_c - T_a$ ) برازش داده شد و معادله‌ی آن در هر مرحله از رشد ذرت برآورد شد (شکل ۳). موقعیت خط مبنای بالای تنش در مراحل مختلف رشد، با توجه به مقدار اختلاف دمای سطح برگ و هوا در لحظه‌ای که بیشترین دمای روز وجود داشت، تعیین گردید. در خط مبنای پایین تنش، هنگامی که رطوبت خاک در حد بهینه بود و به گیاهان تنشی اعمال نمی‌شد، مقدار  $(T_c - T_a)$  منفی بود. اما با کاهش رطوبت خاک و زمانی که گیاهان تحت تنش آبی قرار داشتند، مقدار  $(T_c - T_a)$  مثبت شد. نتایج نشان داد تأثیر تنش آبی بر خط مبنای پایین و بالای تنش، در مراحل مختلف رشد متفاوت بود (جدول ۳). بیشترین تا کمترین مقدار خط بالای تنش به ترتیب برای مراحل رشد گل‌دهی، ۱۲ برگی، خمیری شدن دانه و ۶ برگی بود که به دلیل حساسیت متفاوت مراحل مختلف رشد ذرت به تنش آبی بوده است. همچنین واکنش متفاوت به کاهش رطوبت خاک در مراحل مختلف رشد ذرت، باعث تفاوت در شیب و عرض از مبدأ خط مبنای پایین تنش بود. به طوری که مراحل حساس رشد، دارای شیب منفی‌تر و عرض از مبدأ بیشتر بود. از این رو مرحله‌ی گل‌دهی ذرت، حساس‌ترین مرحله‌ی رشد گیاه بود. علت آن کاهش آستانه‌ی تحمل ذرت به تنش آبی، در مرحله‌ی گرده افشانی بود. در نتیجه با اعمال تنش آبی در این مرحله، بیشترین کاهش عملکرد محصول اتفاق افتاد (Mansourifar et al., 2010). نتایج حاصل را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که کاهش رطوبت خاک در مراحل حساس رشد ذرت، باعث افزایش اختلاف دمای سطح برگ و هوا نسبت به سایر مراحل رشد شد. یعنی علی‌رغم شرایط یکسان کمبود آب خاک، تنش بیشتری در مراحل حساس رشد به گیاهان اعمال شد. در تحقیقات مشابه نیز گزارش شد که در مناطق گرم و خشک، شیب خط پایین تنش آبی منفی‌تر و در مناطق سرد و مرطوب، شیب منحنی به سمت صفر میل می‌کند (Kirnak et al., 2005). در پژوهش





هوا، امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر آبیاری فراهم شد. به این صورت که لحظه‌ی  $(T_c - T_a) \geq 0$  در شکل (۳)، نقطه‌ی بحرانی و زمان اعمال تنش آبی به گیاه بود و این شرایط، اتمام آب سهل‌الوصول خاک و لزوم انجام آبیاری را نشان داد

$(T_c - T_a)_{l,1} = 2.553 - 0.055VPD$  و  $0.155VPD$   
 $(T_c - T_a)_{l,1} = 7.28 - 0.157VPD$  و مقدار خط بالای تنش به ترتیب  $4/69$ ،  $2/83$  و  $10/01$  برآورد شد (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸). به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با ترسیم معادله‌ی خط مبنای پایین تنش آبی در مراحل مختلف رشد ذرت و داشتن داده‌های اختلاف دمای سطح برگ و



شکل (۳): موقعیت خطوط مبنای بالا و پایین تنش آبی، در مراحل مختلف رشد ذرت  
 جدول (۳): مقادیر خطوط مبنای بالا و پایین تنش، در مراحل مختلف رشد ذرت

مرحله‌ی رشد	خط مبنای بالا (°C)	معادله‌ی خط مبنای پایین	آماره $R^2$
۶ برگگی	$(T_c - T_a)_{l,1} = 3.3$	$(T_c - T_a)_{l,1} = 2.64 - 0.09VPD$	۰/۹۸۶
۱۲ برگگی	$(T_c - T_a)_{l,1} = 3.8$	$(T_c - T_a)_{l,1} = 3.25 - 0.11VPD$	۰/۹۷۸
گل‌دهی	$(T_c - T_a)_{l,1} = 4.2$	$(T_c - T_a)_{l,1} = 3.75 - 0.14VPD$	۰/۹۷
خمیری شدن	$(T_c - T_a)_{l,1} = 3.5$	$(T_c - T_a)_{l,1} = 2.93 - 0.1VPD$	۰/۹۵۶

اثرگذاری تنش آبی بر گیاه بوده است. بنابراین مقادیر مذکور می‌توانند به‌عنوان حد آستانه تحمل گیاه به تنش آبی، در برنامه‌ریزی‌های آبیاری مد نظر قرار گیرند. در این پژوهش، کمترین مقدار بحرانی شاخص CWSI مربوط به مراحل ابتدائی رشد و بیشترین آن مربوط به مرحله گل‌دهی ذرت بود. تفاوت مقدار شاخص CWSI، نشان‌دهنده‌ی تأثیر متفاوت تنش آبی بر مقدار تعرق ذرت در مراحل مختلف رشد بوده است. در تحقیق مشابه، مقادیر بحرانی شاخص CWSI برای برنامه‌ریزی زمان آبیاری ذرت در مراحل رشد ظهور کاکل، کامل شدن تاج گل تا خمیری شدن دانه و رسیدن دانه برآورد شد که برای مراحل مذکور به ترتیب  $0/63$ ،  $0/33$  و  $0/42$  گزارش شد (وردی نژاد و همکاران، ۱۳۹۰).

برای بررسی توانایی شاخص CWSI در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای در منطقه خرم‌آباد، تحقیقی با چهار

### شاخص CWSI و رطوبت خاک در مراحل رشد ذرت

شاخص CWSI از طریق رابطه (۵) و به‌صورت روزانه در مراحل مختلف رشد ذرت محاسبه شد. افزایش و یا کاهش مقدار CWSI نتیجه‌ای برعکس بر مقدار تعرق گیاه داشت. به‌عنوان مثال؛ بیشتر بودن مقدار CWSI به دلیل افزایش پارامترهای مقاومت روزنه‌ای و دمای سطح برگ و در نتیجه کاهش تعرق گیاه بود. بنابراین از روز پس از آبیاری تا زمان پایان اعمال تنش، مقادیر متفاوت و رو به افزایشی برای شاخص CWSI ثبت شد. در مراحل رشد ۶ برگگی، ۱۲ برگگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه، مقدار شاخص CWSI به ترتیب در محدوده‌ی  $0/16 - 0/6$ ،  $0/21 - 0/6$ ،  $0/4 - 0/7$  و  $0/24 - 0/55$  برآورد شد. مقادیر بحرانی شاخص CWSI در مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با  $0/37$ ،  $0/54$ ،  $0/63$  و  $0/47$  بود. منظور از مقادیر بحرانی، لحظه‌ی  $(T_c - T_a) \geq 0$  بود که نشان‌دهنده‌ی زمان اعمال و

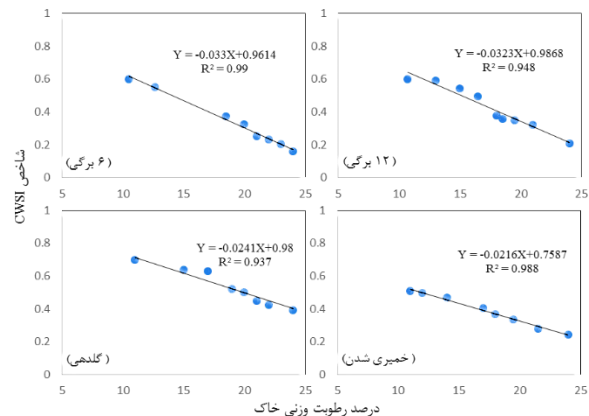
تنش آبی بر گیاه وارد شده است. مقادیر متفاوت رطوبت خاک در لحظه ورود تنش آبی، نشان‌دهنده آستانه‌ی تحمل متفاوت به تنش آبی در مراحل رشد ذرت بود. در این شرایط توان جذب آب توسط گیاه و حد تخلیه رطوبتی مجاز در مراحل مختلف رشد ذرت، متفاوت بود. به طوری که در این پژوهش، مقدار حداکثر تخلیه رطوبتی مجاز در مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب ۴۵، ۶۶، ۶۱، ۷۰ درصد برآورد شد. در تحقیق ویسی و همکاران (۱۳۹۵) نیز به این نکته اشاره شد که سن گیاه از پارامترهای اساسی در جذب آب توسط گیاه و همچنین مقدار تنش آبی وارده به گیاه بود. در تحقیق دیگر، ارتباط بین تغییرات شاخص تنش آبی (CWSI) با کل عمق آب آبیاری (I) در دوره رشد ذرت بررسی شد و به صورت رابطه‌ی  $CWSI = -0.0008(I) + 0.7917$  ضریب تعیین ۰/۹۷ گزارش شد (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی بر روی گندم، بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت حجمی خاک ( $\theta_v$ )، رابطه خطی به صورت  $CWSI = -0.022 \theta_v + 0.952$  ارائه شد. در این تحقیق مقدار رطوبت حجمی متناظر با آستانه تحمل تنش آبی (CWSI = ۰/۳۶) برابر با ۲۶ درصد برآورد شد. از طریق مقدار رطوبت مذکور، متوسط میزان آب قابل استفاده در عمق ریشه‌ی گیاه نیز محاسبه شد (دهقانی سانج و همکاران، ۱۳۹۶). در تحقیقی رابطه‌ی بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت وزنی خاک ناحیه ریشه در کشت نیشکر بررسی و زمان آبیاری آن تعیین شد. نتایج نشان داد در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک رابطه  $CWSI = 1.07 + 3.255 \theta$  برقرار بود. همچنین در میزان همبستگی بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت خاک در سنین مختلف رشد گیاه، تفاوت قابل توجهی مشاهده نشد (ویسی و همکاران، ۱۳۹۵). در تحقیق دیگر ارتباط بین شاخص CWSI و مقدار آب مصرفی در کشت لوبیا بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل، رابطه  $CWSI = -10^{-6}I + 0.52$  با ضریب تبیین ۰/۹۹ ارائه شد که نشان‌دهنده‌ی همبستگی خوب شاخص CWSI با مقدار آب مصرف شده توسط گیاه بود (نوری و همکاران، ۱۳۹۷). به طور کلی دستاورد کاربردی پژوهش این بود که با تشخیص آستانه اعمال تنش آبی به گیاه و برآورد مقدار رطوبت خاک از روی

تیمار ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۵۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه اجرا شد. نتایج نشان داد مقدار شاخص CWSI به صورت معنی‌داری تحت تأثیر مقدار تنش آبی قرار گرفت و در تیمارهای مذکور مقدار CWSI به ترتیب برابر با ۰/۱۷، ۰/۲۱، ۰/۲۹ و ۰/۳۹ بود (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیق دیگر در منطقه ارومیه، متوسط شاخص CWSI طی دوره رشد ذرت برای تیمارهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ترتیب ۰/۵۳، ۰/۴۴ و ۰/۲۸ محاسبه شد. نتایج تحقیق مذکور نشان داد با کاهش آب مورد نیاز گیاه در خاک، شاخص CWSI افزایش یافت. علاوه بر تأثیر مقدار آب آبیاری، نتایج نشان داد که مرحله‌ی رشد گیاه ذرت نیز بر مقدار شاخص CWSI مؤثر بوده است (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸). در این پژوهش، مقدار رطوبت خاک نیز در عمق ریشه‌ی گیاه، به صورت روزانه و در مراحل مختلف رشد ذرت اندازه‌گیری شد. با توجه به تأثیر کاهش آب خاک بر افزایش تنش آبی، ارتباط بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت خاک بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، بین مقادیر رطوبت وزنی خاک ( $\theta$ ) و شاخص CWSI، رابطه‌ی خطی با همبستگی بالا و معکوس برقرار بود. در مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب روابط  $CWSI = -0.033\theta + 0.961$ ،  $CWSI = -0.024\theta + 0.98$  و  $CWSI = -0.032\theta + 0.986$  با ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۴۸، ۰/۹۳۷ و ۰/۹۸۸ برآورد شد (شکل ۴). علت وجود شیب معکوس در روابط فوق، به دلیل افزایش شاخص CWSI هم‌زمان با کاهش مقدار رطوبت خاک بود. روابط به دست آمده این امکان را فراهم ساخت که با استفاده از مقدار شاخص CWSI، بتوان مقدار رطوبت خاک را برآورد نمود. در این پژوهش، حد بحرانی شاخص CWSI در مراحل رشد ذرت به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۵۴، ۰/۶۳ و ۰/۴۷ برآورد شد. لذا با استفاده از روابط حاصل از شکل (۴)، مقدار رطوبت وزنی متناظر با آستانه ورود تنش آبی محاسبه شد که برای مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب برابر با ۱۷/۹، ۱۳/۸، ۱۴/۵ و ۱۳/۶ درصد بود. مقادیر مذکور نشان‌دهنده‌ی حداکثر تخلیه رطوبتی مجاز قبل از ورود تنش آبی به گیاه، در مراحل مختلف رشد ذرت بوده است. یعنی پس از کاهش رطوبت خاک از مقادیر فوق،



به ترتیب مربوط به مدل‌های درجه دوم، خطی، نمایی، لگاریتمی و توانی بود. از لحاظ آماره ME تقریباً ترتیب فوق حفظ شد و فقط جایگاه مدل‌های درجه دوم و خطی با هم تعویض گردید. در نهایت آماره CRM نشان داد که به ترتیب مدل‌های خطی، لگاریتمی و درجه دوم، مدل‌های کم برآورد و مدل‌های توانی و نمایی، مدل‌های بیش برآوردی بوده‌اند. برای مشاهده نتایج حاصل از مدل‌سازی مقادیر رطوبت خاک، عملکرد مدل‌های مذکور در شکل (۵) نشان داده شد. بر این اساس نزدیک‌ترین و دورترین مقادیر به داده‌های واقعی، به ترتیب توسط مدل درجه دوم و مدل توانی تخمین زده شد. نتیجه کلی این که مدل درجه دوم از لحاظ آماری و مدل خطی از لحاظ سادگی در بهره‌برداری، به عنوان مدل‌های بهینه تخمین مقدار رطوبت خاک برگزیده شد. در تحقیقات گذشته، موضوع پژوهش کنونی کمتر مورد مطالعه قرار گرفت و صرفاً وجود روابط خطی بین شاخص CWSI و مقدار رطوبت خاک در کشت برخی گیاهان (غیر از ذرت) گزارش شد. به طوری که در تحقیقی بر روی درختان پسته، رابطه‌ی بین شاخص تنش آبی (CWSI) و مقدار رطوبت خاک (SMC) در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، رابطه‌ی بین CWSI و SMC به صورت  $SMC = -2.27 CWSI + 27.57$  با ضریب تعیین ۰/۵۳ گزارش شد. رابطه‌ی مذکور برای ارزیابی تنش آب در درختان پسته و برنامه‌ریزی آبیاری توصیه شد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳). در تحقیقی بر روی درختان هلو، رابطه‌ی بین شاخص تنش آبی (CWSI) و مقدار رطوبت خاک (SMC) در کشور رومانی بررسی شد. بر اساس نتایج، رابطه‌ی مذکور در شرایط آفتابی بودن آسمان به صورت  $\theta_v = -11.06 CWSI + 23.524$  و در شرایط تحت سایه بودن گیاهان به صورت  $\theta_v = 12.289 CWSI + 21.425$  گزارش شد. همبستگی بین پارامترها در شرایط آفتابی بیش از دو برابر شرایط سایه بود. بنابراین استفاده از رابطه‌ی فوق در شرایط آفتابی، برای برنامه‌ریزی آبیاری توصیه شد (Paltineanu et al., 2013). در تحقیق دیگر اثر چهار سطح آبیاری شامل ۱۲۵، ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی بر روی پنج رقم گندم شامل شیراز، بهار، پیش‌تاز، سیستان و یاوروس بررسی شد. بر

شاخص CWSI، می‌توان کمبود مقدار رطوبت خاک تا حد ظرفیت مزرعه را برآورد نمود. در این شرایط با محاسبه‌ی حجم دقیق آب مورد نیاز برای آبیاری، می‌توان نیاز آبی واقعی گیاه را تأمین نموده و از مصرف بی‌رویه‌ی آب جلوگیری به عمل آورد.



شکل (۴): بررسی رابطه بین مقدار رطوبت خاک و شاخص CWSI در مراحل مختلف رشد ذرت

### مدل‌سازی مقدار رطوبت خاک (θ)

به منظور مدل‌سازی و برآورد مقدار رطوبت خاک (متغیر وابسته) از روی مقدار شاخص CWSI (متغیر مستقل) در طول دوره رشد ذرت، روابط رگرسیونی بین دو پارامتر مذکور برازش داده شد. در این پژوهش توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی، به عنوان مدل‌های رگرسیونی انتخاب شد. محدودیت این قبیل مدل‌ها، شامل وابستگی آن‌ها به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه بود. اما نسبت به سایر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی بودند، ترجیح داده شد. لذا پس از معرفی توابع مذکور در نرم‌افزار SPSS، ضرایب ثابت هر کدام از توابع، مطابق جدول (۴) تعیین شد. در جدول مذکور، آماره F بیانگر معنی‌داری کلی مدل رگرسیونی در تخمین مقادیر رطوبت خاک بود. بنابراین با استفاده از مدل مورد نظر، ابتدا مقادیر رطوبت خاک تخمین زده شد و سپس اعتبار مدل از طریق روابط (۱۲) الی (۱۶) ارزیابی شد (جدول ۵). برای اولویت‌بندی مدل‌ها، هر مدلی که آماره RMSE، ME و CRM آن نزدیک به صفر بود و یا آماره‌های R<sup>2</sup> و EF آن نزدیک به یک بود، به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. از نظر آماره‌های RMSE، R<sup>2</sup> و EF اولویت انتخاب مدل بهینه

اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک شد. این کار موجب برآورد مقدار کمبود رطوبت خاک، محاسبه‌ی حجم دقیق آب مورد نیاز و برنامه‌ریزی آبیاری متناسب با نیاز آبی گیاه شد

اساس نتایج حاصل، بین شاخص CWSI و مقدار آب مصرفی (W) رابطه  $W = -1020.8CWSI + 1006.8$  گزارش شد (Bijan-zadeh and emam, 2012). با عنایت به پژوهش کنونی، تخمین مقدار رطوبت خاک از طریق شاخص CWSI، باعث جلوگیری از اتلاف انرژی در

جدول (۴): ضرایب فرم‌های مختلف توابع تولید رطوبت-شاخص CWSI

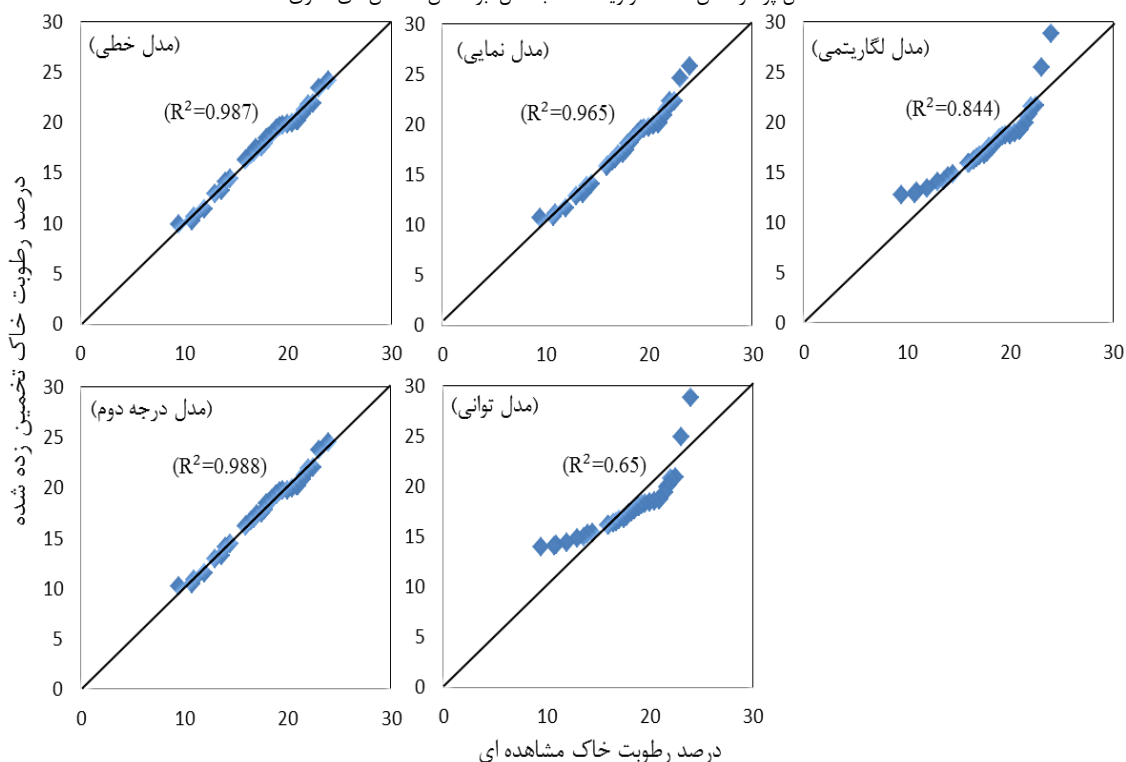
ضرایب	فرم خطی	فرم نمایی	فرم لگاریتمی	فرم درجه دوم	فرم توانی
A <sub>0</sub>	۲۵/۰۵۸	۲۷/۲۱۸	۱۲/۷۶۴	۲۵/۴۸۶	۱۴/۰۳۷
A <sub>1</sub>	-۱۵/۱۰۷	-۰/۹۳۶	-۵/۶۶۳	-۱۷/۰۶۴	-۰/۲۵۵
A <sub>2</sub>	-	-	-	۱/۷۶	-
آماره F	۲۳۹۱**	۲۳۶۲**	۲۳۱۶**	۱۹۸۰۸**	۱۳۸۸**

\*\* نشان‌دهنده معنی‌دار بودن کلی تابع، در سطح احتمال یک درصد است.

جدول (۵): پارامترهای آماری محاسبه شده برای ارزیابی اعتبار توابع تولید

نوع تابع	ME (%)	RMSE	R <sup>2</sup>	EF	CRM
خطی	۰/۷۷۶ <sup>(۱)</sup> *	۲/۳۸۷ <sup>(۲)</sup>	۰/۹۸۷ <sup>(۳)</sup>	۰/۹۹ <sup>(۳)</sup>	۳/۳×۱۰ <sup>-۳</sup> <sup>(۳)</sup>
نمایی	۱/۷۵۶ <sup>(۳)</sup>	۳/۱۸۵ <sup>(۳)</sup>	۰/۹۶۵ <sup>(۳)</sup>	۰/۹۷ <sup>(۳)</sup>	-۱۴/۶×۱۰ <sup>-۴</sup> <sup>(۴)</sup>
لگاریتمی	۴/۷۹۳ <sup>(۴)</sup>	۸/۳۳۲ <sup>(۴)</sup>	۰/۸۴۴ <sup>(۴)</sup>	۰/۸۶۵ <sup>(۴)</sup>	۱/۵×۱۰ <sup>-۳</sup> <sup>(۳)</sup>
درجه دوم	۰/۷۹۴ <sup>(۲)</sup>	۲/۲۹ <sup>(۱)</sup>	۰/۹۸۸ <sup>(۱)</sup>	۰/۹۹۲ <sup>(۱)</sup>	۰/۵×۱۰ <sup>-۱</sup> <sup>(۱)</sup>
توانی	۴/۸۹ <sup>(۵)</sup>	۱۰/۷۳ <sup>(۵)</sup>	۰/۶۵ <sup>(۵)</sup>	۰/۷۴۱ <sup>(۵)</sup>	-۲۳۳×۱۰ <sup>-۵</sup> <sup>(۵)</sup>

\*: اعداد داخل پرانتز نشان دهنده اولویت انتخاب مدل، بر اساس شاخص‌های آماری است.



شکل (۵): صحت سنجی مدل‌های رگرسیونی، در تخمین مقدار رطوبت خاک



## نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک، از نکات ضروری در برنامه‌ریزی‌های آبیاری به شمار می‌رود. روش‌های اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک، مستلزم صرف نیروی انسانی و به‌کارگیری ابزارهای تخصصی در این زمینه می‌باشد. لذا تخمین مقدار رطوبت خاک از روی واکنش‌های گیاهی (مانند تغییرات دمای سطح برگ)، کمک شایانی در برآورد غیر مستقیم پارامتر مذکور خواهد داشت. در این پژوهش در مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌های ذرت، تنش خشکی تا حد پژمردگی موقت به گیاه اعمال شد. به‌منظور برآورد شاخص تنش آبی (CWSI) که به دمای سطح برگ وابسته بود، خطوط مبنای پایین و بالای تنش آبی در مراحل رشد ذرت تعیین شد. در نتیجه، عرض از مبدأ و شیب خط مبنای پایین به‌ترتیب از ۲/۶۴ تا ۳/۷۵ و از ۰/۰۹ تا ۰/۱۴ و مقدار خط مبنای بالا نیز بین ۳/۳ تا ۴/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. مقدار شاخص CWSI در مراحل رشد مذکور، به‌ترتیب در محدوده‌ی ۰/۱۶-۰/۱۶، ۰/۲۱-۰/۱۶، ۰/۴-۰/۱۶ و ۰/۲۴-۰/۵۵ قرار داشت. مقادیر بحرانی شاخص CWSI در زمان افزایش دمای سطح برگ نسبت به دمای هوا، به‌ترتیب برابر با ۰/۳۷،

۰/۵۴، ۰/۶۳ و ۰/۴۷ تعیین شد. مقادیر مذکور نشان‌دهنده‌ی توان جذب آب توسط گیاه و آستانه‌ی تحمل متفاوت آن به تنش آبی، در مراحل مختلف رشد ذرت بود. ایجاد آستانه بحرانی شاخص CWSI نشان‌دهنده اتمام آب سهل‌الوصول و الزام آبیاری بود. از سوی دیگر روند افزایشی مقادیر شاخص CWSI تحت تأثیر کاهش رطوبت خاک، بیانگر وجود ارتباط مستقیم و معکوس بین دو پارامتر مذکور بود. لذا با هدف مدل‌سازی مقدار رطوبت خاک (متغیر وابسته) از روی مقدار شاخص CWSI (متغیر مستقل)، روابط رگرسیونی بین دو پارامتر مذکور برآزش داده شد. در این پژوهش توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم و توانی، به‌عنوان مدل‌های رگرسیونی انتخاب شد. از نظر آماره‌های  $RMSE$ ،  $R^2$ ،  $EF$ ،  $ME$  و  $CRM$ ، توابع درجه دوم و خطی به‌عنوان مدل‌های بهینه تخمین مقدار رطوبت خاک برگزیده شد. نتایج کلی نشان داد بدون نیاز به داده‌برداری میدانی، مقدار رطوبت خاک از طریق مدل‌های رگرسیونی و شاخص‌های گیاهی مانند CWSI قابل تخمین بود. بنابراین ضمن برنامه‌ریزی زمان آبیاری بر اساس مقادیر بحرانی CWSI، امکان محاسبه‌ی حجم دقیق آب مورد نیاز در عملیات آبیاری نیز فراهم شد

## منابع

- ابراهیمی زاده، م. ع. و حسن‌لی، ع. م. 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. نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲(۴۴): ۶۹-۸۲.
- احمدی، ح.، نصرالهی، ع. ح.، شریفی پور، م. و عیسوند، ح. ر. ۱۳۹۶. بررسی تغییرات شاخص تنش آبی گیاه سویا تحت سطوح مختلف آبیاری. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۷(۱): ۱۲۱-۱۳۴.
- جاراللهی، ر. ۱۳۸۰. تعیین ضریب آب سهل‌الوصول در مراحل مختلف رشد برای ذرت دانه‌ای در کرج. نشریه علوم آب و خاک، ۱۵(۲): ۲۹۸-۲۹۰.
- خورسند، ا.، وردی نژاد، و. ر.، عسگرزاده، ح.، مجنون هریس، ا.، رحیمی، ا.، بشارت، س. و صدرالدینی، ع. ا. ۱۳۹۸. تعیین شاخص تنش آبی (CWSI) جهت تشخیص زمان تنش آبی محصول ذرت در منطقه ارومیه. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۴): ۸۸۴-۸۷۳.
- دهقانی سانج، ح.، نخجوانی مقدم، م. م. و قهرمان، ب. ۱۳۹۶. کاربرد شاخص تنش آبی گیاه برای زمان‌بندی تک آبیاری گندم دیم. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۱۱): ۵۵۲-۵۶۱.
- سعیدی، ر.، ستوده‌نیا، ع.، رضانی اعتدالی، ه.، نظری، ب. و کاویانی، ع. ۱۳۹۷. اثر شوری آب و کمبود ازت خاک، بر ضریب  $K_s$  و مقدار آب سهل‌الوصول ذرت. نشریه آب و خاک، ۳۲(۵): ۸۶۵-۸۷۸.

- سعیدی‌نیا، م.، نصراللهی، ع. ح. و شریفی پور، م. ۱۳۹۸. بررسی توانایی شاخص تنش آبی گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری و برآورد میزان عملکرد ذرت علوفه‌ای. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۳): ۵۵۵-۵۶۵.
- سیفی، ا.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانج، ح. و ترابی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی همبستگی بین مقدار رطوبت خاک و شاخص تنش آب گیاه پسته در خاک سیلت لوم. اولین همایش ملی پسته ایران، شهریور ۱۳۹۳، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- طاهری قناد، س. ۱۳۸۱. استفاده از درجه حرارت پوشش سبز گیاه جهت برنامه‌ریزی آبیاری ذرت بهاره در شرایط شمال خوزستان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- فیضی اصل، و.، فتوت، ا.، آستارایی، ع.، لکزبان، ا. و موسوی شلمانی، م. ا. ۱۳۹۳. تعیین موازنه آبی و مراحل بحرانی آن در گندم دیم با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه (CWSI). نشریه آب و خاک، ۲۸ (۴): ۸۰۴-۸۱۷.
- قربانی، م. و برومند نسب، س. ۱۳۹۵. بررسی اثر شوری آب در آبیاری سطحی بر میزان شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت تابستانه. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۷ (۲۵): ۵۴-۶۷.
- محمدی، ه. ۱۳۹۲. برنامه‌ریزی آبیاری ذرت بهاره تحت آبیاری قطره‌ای با استفاده از دماسنج مادون قرمز در شرایط اقلیمی اهواز. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی علم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- محمدی، م.، قهرمان، ب.، داوری، ک.، وظیفه‌دوست، م. و نوری، ح. ۱۳۹۲. بهینه‌سازی مصرف آب و عملکرد گندم زمستانه در شرایط تنش شوری و خشکی با استفاده از مدل SWAP (مطالعه موردی: شهرستان برخوار). نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۷ (۳): ۳۱۴-۲۹۹.
- نوری، س.، نصراللهی، ع. ح.، ملکی، ع. و شریفی پور، م. ۱۳۹۷. رابطه بین میزان آب مصرفی و شاخص تنش آبی گیاه در ارقام مختلف لوبیا چیتی. اولین همایش ملی علوم کشاورزی و زیست محیطی ایران، بهمن ۱۳۹۷، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
- وردی نژاد، و.، بشارت، س.، عبقری، ه. و احمدی، ح. ۱۳۹۰. برآورد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد با استفاده از اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا. نشریه آب و خاک، ۲۵ (۶): ۱۳۴۴-۱۳۵۲.
- ویسی، ش.، ناصری، ع. ع. و حمزه، س. ۱۳۹۵. تعیین زمان آبیاری مزارع نیشکر با استفاده از دماسنج مادون قرمز حرارتی و رطوبت خاک ناحیه ریشه. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳ (۶): ۲۳۵-۲۵۱.
- Ayana, M. 2011. Deficit irrigation practices as alternative means of improving water use efficiencies in irrigated agriculture: Case study of maize crop at Arba Minch, Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 6(2): 226-235
- Ballester, C., Jimenez-Bello, M. A., Castel, J. R. and Intrigliolo, D. S. 2013. Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Journal of Agricultural and forest Meteorology*, 168: 120-129.
- Bijanazadeh, E. and Emam, Y. 2012. Evaluation of Crop Water Stress Index, Canopy Temperature and Grain Yield of Five Iranian Wheat Cultivars Under Late Season Drought Stress. *Journal of Plant Physiology and Breeding*, 2 (1): 23-33.
- Blonquist, J. M., Norman, J. M. and Bugbee, B. 2009. Automated measurement of canopy stomata conductance based on infrared temperature. *Journal of Agricultural and forest Meteorology*, 149: 2183-2197.
- Çolak, Y. B. and Yazar, A. 2017. Evaluation of crop water stress index on Royal table grape variety under partial root drying and conventional deficit irrigation regimes in the Mediterranean Region. *Journal of Scientia horticulture*, 224: 384-394.
- Gardner, B. R., Blad, B. L. and Watts, D. G. 1981. Plant and air temperatures in differentially irrigated corn. *Journal of Agricultural Meteorology*, 25: 207-217.
- Gonzalez, M. P., Moran, M. S., Mateos, L. and Bryant, R. 2005. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Journal of Irrigation Science*, 24: 233-240.
- Gonzalez, V., Zarco-Tejada, P., Nicolas, E., Nortes, P. A., Alarcon, J. J., Intrigliolo, D. S. and Fereres, E. 2013. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water



status of five fruit tree species within a commercial orchard. *Journal of Precision Agriculture*, 14: 660–678.

Hüner, N. P. and Hopkins W. G. 2008. *Introduction to Plant Physiology*: Wiley, New York.

Idso, S. B., Jackson, R. D. Pinter, P. J. Reginato, R. J. and Hatfield, J. L. 1981. Normalizing the stress degree-day parameter for environmental variability. *Journal of Agric, Meteorol*, 24: 45-55.

Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Journal of Agricultural Meteorology*, 27(1-2): 59-70.

Kalra, N., Chakraborty, D., Ramesh Kumar, P., Jolly, M. and Sharma, P. K. 2007. An approach to bridging yield gaps, combining response to water and other resource inputs for wheat in northern India, using research trials and farmers' fields data. *Journal of Agricultural Water Management*, 93 (2007): 54-64.

Kirnak, H., Çopur, O., Doan, E., Bahçeci, I., Demir, S. and Tonkaz, T. 2005. Evaluation of relationship between crop water stress index and generative-fiber characteristics of cotton (in Turkish). GAP IV. Tarım Kong, Sanlıurfa, 21-23 September, pp: 1164-1171

Mansourifar, C., Modarres Sanavy, S. A. M. and Saberli, S. F. 2010. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. *Journal of Agricultural Water Management*, 97:12–22.

Paltineanu, C., Septar, L. and Moale, C. 2013. Crop Water Stress in Peach Orchards and Relationships with Soil Moisture Content in a Chernozem of Dobrogea. *Journal of Irrig. Drain Eng.*, 139 (1): 20-25.

Shock, C. C., Feibert, E. B. G., Saunders, L. D. and Klauzer, J. 2007. Deficit Irrigation for Optimum Alfalfa Seed Yield and Quality. *Journal of Agronomy*, 99: 992-998

Taghvaeian, S., Chávez, J. L., Bausch, W. C., DeJonge, K. C. and Trout, T. J. 2014. Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Journal of Irrigation Science*, 32 (1): 53-65

Taiz, L. and Zeiger, E. 2008. *Bitkifiziyojisi*. 1th Ed. Palme Yayincilik, Ankara, Turkey, 720 p (in Turkish).

## Modeling the Amount of Soil Moisture using Crop Water Stress Index (CWSI) in Maize Planting

Reza Saeidi<sup>1</sup>, Mohammad Mahdi Zarrabi<sup>\*2</sup> and Abbas Sotoodehnia<sup>3</sup>

### Abstract

In order to estimate the amount of soil moisture by the Crop Water Stress Index (CWSI), research was performed on the maize (SC 704). The experiment was a factorial and in format of randomized complete block design. In the control, treatment was done full irrigation and in other treatments, was applied water stress in the stages of 6-leaf, 12-leaf, flowering and seeds milking. The meteorological parameters, stomata resistance and leaf surface temperature were measured daily. At different growth stages, the stress low line had a slope of 0.09 to 0.14. The amount of the stress up line was estimated between 3.3 and 4.2°C. In the period of stress, the CWSI index was calculated and the amount of soil moisture was measured. According to the results, between soil moisture and CWSI index values, the inverse relationship was established with good correlation. Therefore, regression models with linear, exponential, logarithmic, polynomial and power forms were fitted between the above (two) parameters. The best and worst models for estimating soil moisture were the polynomial ( $R^2:0.987$ ) and the power ( $R^2:0.65$ ) models, respectively. The results showed that the critical values of CWSI index (at the time of increasing leaf surface temperature compared to air temperature), determined the irrigation time. Also, by indirectly estimating the amount of soil moisture, was calculated the soil moisture deficiency and water requirements for irrigation.

**Keywords:** Leaf surface temperature, Regression model, Growth stages

---

1-Ph.D. of irrigation and drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir)

2- Associate professor, Department of Horticulture Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (\*- Corresponding Author Email: zarrabi@eng.ikiu.ac.ir)

3 - Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (Email: sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir)



## Research Paper

## Modeling the Amount of Soil Moisture Using Crop Water Stress Index (CWSI) in Maize Planting

Reza Saeidi<sup>1</sup>, Mohammad Mahdi Zarrabi<sup>\*2</sup> and Abbas Sotoodehnia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>-Ph.D. of irrigation and drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (Email: [saeidi@org.ikiu.ac.ir](mailto:saeidi@org.ikiu.ac.ir))

<sup>2</sup>- Associate professor, Department of Horticulture Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (\*- Corresponding Author Email: [zarrabi@eng.ikiu.ac.ir](mailto:zarrabi@eng.ikiu.ac.ir))

<sup>3</sup> - Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (Email: [sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir](mailto:sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir))



10.22125/IWE.2020.232863.1357

Received:  
**May.24.2020**  
Accepted:  
**November.07.2020**  
Available online:  
**March.13.2022**

Keywords:  
**Leaf surface temperature, Regression model, Growth stages**

### Abstract

In order to estimate the amount of soil moisture by the Crop Water Stress Index (CWSI), research was performed on the maize (SC 704). The experiment was a factorial and in format of randomized complete block design. In the control treatment was done full irrigation and in other treatments, was applied water stress in the stages of 6-leaf, 12-leaf, flowering and seeds milking. The meteorological parameters, stomata resistance and leaf surface temperature were measured daily. At different growth stages, the stress low line had a slope of 0.09 to 0.14. The amount of the stress up line was estimated between 3.3 and 4.2°C. In the period of stress, the CWSI index was calculated and the amount of soil moisture was measured. According to the results, between soil moisture and CWSI index values, the inverse relationship was established with good correlation. Therefore, regression models with linear, exponential, logarithmic, polynomial and power forms were fitted between the above (two) parameters. The best and worst models for estimating soil moisture were the polynomial ( $R^2:0.987$ ) and the power ( $R^2:0.65$ ) models, respectively. The results showed that the critical values of CWSI index (at the time of increasing leaf surface temperature compared to air temperature), determined the irrigation time. Also, by indirectly estimating the amount of soil moisture, was calculated the soil moisture deficiency and water requirements for irrigation.

## 1. Introduction

Due to delay in crop irrigation, water stress is applied on the crop and crop yield is reduced. Irrigation time can be determined, based on the crop reactions to soil moisture deficiency. Lack of soil water causes the crop water absorption is decreased, the crop transpiration is reduced and the crop stomatal begin to close. In these conditions, the leaf surface temperature is more than the air temperature, and water stress is applied on the crop. Crop water stress index (CWSI) is a suitable criterion for understanding the water stress situation in crops. Therefore, a regression relationship can be fixed between the soil moisture content and CWSI index. The objective of this study was to estimate the amount of soil moisture based on the CWSI index value (at different growth stages).

## 2. Materials and Methods

The research site was located in the farm of Imam Khomeini International University in Qazvin, Iran. The studied crop was maize with cultivar of S. C 704, and was planted in plots with dimensions of  $3 \times 3$  m. In the control treatment (DC), full irrigation was performed before the end of soil readily available water. In other treatments, water stress was applied up to the threshold of crop temporary wilting (partial closure of leaf stomata), in four growth stages of 6-leaf (D1), 12-leaf (D2), flowering (D3) and seeds milking (D4). The experiment was performed factorial in a randomized complete block design, and with three replications. The values of stomatal resistance and leaf surface temperature were measured by AP4 porometer (Delta-T Devices Ltd, UK), and infrared thermometer, respectively. The amount of stomatal resistance was measured at 7 am and the leaves temperature were measured from 7 am to 2 pm. Soil moisture amount was measured by time domain reflectometer device (TDR). Crop water stress index (CWSI) was calculated based on the amounts of air temperature, relative humidity, stomatal resistance and leaf surface temperature. By using of regression models (functions of linear, exponential, logarithmic, polynomial and power), the amount of soil moisture (dependent variable) was modelled based on the CWSI value (independent variable).

## 3. Results

The crop's response to water stress was varied at different growth stages of maize. In sensitive growth stages, the stress low line had a greater slope. Therefore, the maize flowering stage was the most sensitive stage of crop growth. For the stress low line, the values of "a" (width of origin) and "b" (line slope) parameters were estimated to be between 2.64 to 3.75 and 0.09 to 0.14, respectively. In the growth stages of 6-leaf, 12-leaf, flowering and seed milking, the CWSI index values were estimated in the range of 0.16-0.6, 0.21-0.6, 0.4-0.7 and 0.24-0.55, respectively. The point of  $(T_c - T_a) \geq 0$  in the stress low line, was the threshold for applying the water stress on the crop. These conditions showed the depletion of readily available water in soil, and the need to irrigation. The critical values of CWSI index in the mentioned growth stages were equal to 0.37, 0.54, 0.63 and 0.47, respectively. The different values of CWSI index showed the different effect of water stress, on the maize transpiration amounts at growth stages. The increasing of CWSI value was associated with the soil moisture amount decreasing. In this study, the maximum allowable depletion of soil moisture at the growth stages of 6-leaf, 12-leaf, flowering and seeds milking, were estimated equal to 45%, 66%, 61% and 70%, respectively. The modeling results showed that the polynomial model was the optimal model for estimating the soil moisture amount, based on the CWSI index value. Therefore, the soil moisture amount was estimated indirectly.

#### 4. Discussion and Conclusion

Reaching to the critical threshold value of the CWSI index was indicated the end of readily available water in the soil, and the need to irrigation. The results showed that the soil moisture amount could be estimated by the regression models, and the CWSI index value. Therefore, irrigation scheduling was done based on the CWSI critical values. At this time, due to the lack of soil moisture (up to FC), the volume of irrigation water was calculated.

#### 5. Six important references

1. Bijanzadeh, E. and Emam, Y. 2012. Evaluation of Crop Water Stress Index, Canopy Temperature and Grain Yield of Five Iranian Wheat Cultivars under Late Season Drought Stress. *Plant Physiology and Breeding*, 2 (1): 23-33.
2. Blonquist, J. M., Norman, J. M. and Bugbee, B. 2009. Automated measurement of canopy stomata conductance based on infrared temperature. *Agricultural and forest Meteorology*, 149: 2183-2197.
3. Çolak, Y. B. and Yazar, A. 2017. Evaluation of crop water stress index on Royal table grape variety under partial root drying and conventional deficit irrigation regimes in the Mediterranean Region. *Scientia horticulture*, 224: 384-394.
4. Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27(1-2): 59-70.
5. Saeidi, R., Sotoodehnia, A., Ramezani Etedali, H., Nazari, B. and Kaviani, A. (2018). Effect of water salinity and soil nitrogen deficiency on  $K_s$ -coefficient and readily available water of maize. *Water and soil*. 32 (5): 865-878.
6. Taghvaeian, S., Chávez, J. L., Bausch, W. C., DeJonge, K. C. and Trout, T. J. 2014. Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Irrigation Science*, 32 (1): 53-65

#### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.