نشریه علوم آب و خاک
سال بیست و ششم / شماره دوم / تابستان ۱۴۰۱/ مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۲۲۳ تا ۲۳۳

تعیین شاخص تنش آبی گندم CWSI در کرج برای استفاده در برنامه‌ریزی آبیاری

محسن عبدی[۱*] ، حسین شریفان[۱]، حسین جعفری[۲] و خلیل قربانی[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۷/۱۸)

چکیده

برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی مؤثرترین راه برای افزایش بهره‌وری مصرف آب کشاورزی است. در برنامه‌ریزی آبیاری تعیین زمان آبیاری به مراتب مهمتر و مشکل‌تر از تعیین عمق آب آبیاری است و در بین روش‌های تعیین زمان آبیاری گیاهان زراعی، روش‌هایی که از خود گیاه برای این منظور استفاده می‌شود دقیق‌تر از سایر روش‌هاست. بر این اساس در این مقاله از شاخص تنش خشکی گیاه گندم که مبتنی بر کمبود فشار بخار هوا و اختلاف دمای پوشش گیاهی و هواست (T_c-T_a) استفاده شد. برای این منظور ابتدا نمودار و رابطه خط مبنای بالا و پایین استخراج سپس شاخص تنش آبی گندم در منطقه کرج ترسیم شد. سپس برای تعیین شاخص تنش خشکی بهینه گندم، چهار تیمار شامل I_1: ۳۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی، I_2: ۴۵ درصد تخلیه مجاز رطوبتی، I_3: ۶۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی و I_4: ۷۵ درصد تخلیه مجاز رطوبتی در چهار تکرار اجرا شد و در طول فصل مقدار شاخص تنش خشکی هر تیمار جداگانه محاسبه شد و تیماری که بالاترین کارایی مصرف آب را داشت CWSI آن برای تعیین زمان آبیاری گندم استفاده شد. نتایج نشان داد که ابتدا رابطه خط مبنای بالا و پایین برای گیاه گندم در منطقه کرج به‌ترتیب به صورت T_c-T_a=3.6 ^{0}c و T_c-T_a=-0.27VPD - 2.64 است، به‌علاوه تیمار ۴۵ درصد تخلیه مجاز رطوبتی بالاترین کارایی مصرف آب را داشت و بر اساس آن شاخص تنش خشکی بهینه برای گیاه گندم در منطقه کرج ۰/۳۶ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، بهره‌وری مصرف آب، اختلاف دمای پوشش گیاهی، نمودار ایدسو

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی ومنابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۲. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: abdimohsen12@yahoo.com

مقدمه

در استان البرز مانند سایر استان‌ها، کشت گیاه گندم بیشترین سطح از مزارع استان را به خود اختصاص داده است. بنابراین، برنامه‌ریزی آبیاری این گیاه برای استفاده بهینه از منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برنامه‌ریزی آبیاری یا تعیین دور و عمق آب آبیاری علاوه بر این‌که گیاه را از تنش آبی محافظت می‌کند، از بیش آبیاری، ماندابی شدن و کاهش تنفس گیاه و در نتیجه کاهش عملکرد محصول هم جلوگیری به عمل می‌آورد. به طور معمول تعیین عمق آب آبیاری با شناخت خاک مزرعه و عمق توسعه ریشه گیاه به آسانی قابل محاسبه است اما تعیین زمان دقیق آبیاری به این راحتی نیست. تعیین زمان آبیاری، پارامتری است که آمیخته‌ای از تأییدات کمبود رطوبت خاک، تبخیرپذیری هوا، تراکم گیاهی و استعداد ذاتی گیاه است که می‌تواند بجای رطوبت خاک اساس برنامه‌ریزی آبیاری قرار گیرد (۹) روش‌های مختلفی برای تعیین زمان آبیاری ارائه شده است از جمله استفاده از نمایه خاکی (اندازه‌گیری رطوبت خاک)، نمایه گیاهی (اندازه‌گیری پتانسیل آب برگ) و بودجه آبی که همه این روش‌ها وقت‌گیر، پرهزینه و احتمال ورود خطا در آنها بسیار زیاد است (۲). از طرف دیگر در روش استفاده از نمایه گیاهی، چون خود گیاه مورد پرسش قرار می‌گیرد و از وضعیت آبی آن برای پی‌بردن به زمان آبیاری استفاده می‌شود مؤثرتر و دقیق‌تر از نمایه خاکی است. زیرا وضعیت آب درون گیاه تحت تأثیر توأم رطوبت خاک و شرایط جوی است (۹). شاخص تنش خشکی گیاه (CWSI) یکی از روش‌های نمایه گیاهی است که مبتنی بر دمای پوشش گیاهی و دمای هوا است. استفاده از دمای سطح پوشش گیاهی کاراترین روش برای آگاهی از تنش آبی محصول است. وقتی که گیاه تحت تنش کمبود آب قرار می‌گیرد، هدایت روزنه‌ای و تبادل گرمای نهان کاهش یافته و اثر خنک‌کنندگی تبخیر کاهش می‌یابد و در نتیجه برگ‌های گیاه نسبت به شرایطی که گیاه تحت تنش نیست گرم‌تر می‌شود از این خاصیت و با اندازه‌گیری دمای آسمانه گیاه برای ارزیابی وضعیت آب گیاه می‌توان استفاده کرد و زمان آبیاری را تعیین کرد (۱۲). یکی از معتبرترین شاخص‌ها که در آن با استفاده از دمای آسمانه گیاهی می‌توان تنش در یک گیاه را بررسی و در برنامه ریزی آبیاری مورد استفاده قرار داد شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) پیشنهادی ایدسو است. شاخص CWSI از تنش آبی گرفته شده است و برای مجموعه‌ای خاص از شرایط هواشناسی و طیف وسیعی از اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا که بین دو حد بدون تنش و تنش کامل آب محدود می‌شود اتفاق می‌افتد (۶).

حد بدون تنش (خط مبنای پایین) از خصوصیات ویژه هر گیاه بوده و بیانگر شرایطی است که درآن، گیاه از نظر تأمین و جذب آب در محدوده توسعه ریشه با هیچ محدودیتی روبرو نبوده و میزان تبخیرپذیری هوا نیز در محدوده حداکثر مقدار خود است. بنابراین، شدت تعرق گیاه در این حالت برابر با شدت تعرق در شرایط استاندارد است و چون هر گیاه زراعی در شرایط استاندارد بسته به فیزیولوژی خود مقدار مشخص و معینی تعرق دارد بنابراین، این خط مبنا بیانگر این واقعیت است که هر یک از گیاهان به اندازه مشخص و معینی در مقابل تغییرات محیطی از خود عکس‌العمل نشان می‌دهند. عوامل محیطی مؤثر بر تبخیر و تعرق گیاه زراعی در این شرایط دمای هوا، رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار اشباع (VPD) هستند. رابطه خط مبنای پایین توسط ایدسو به صورت معادله زیر ارائه شده است (۶)؛

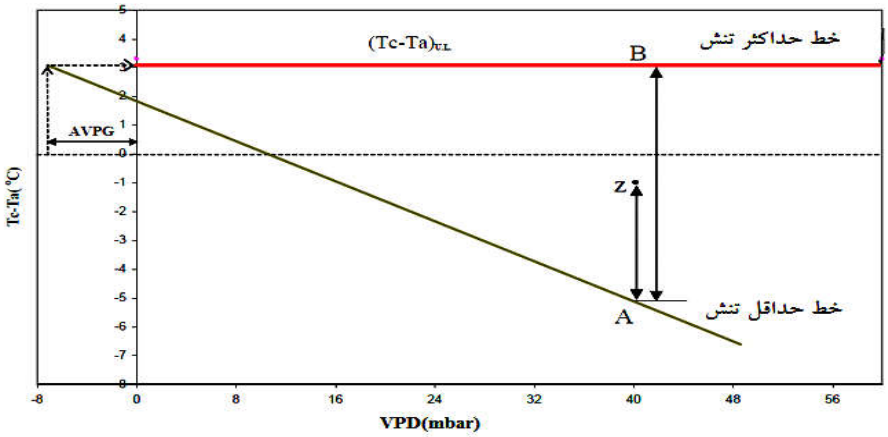
$$(T_c - T_a)_{l.l.} = a - b(VPD) \qquad (۱)$$

در این رابطه $(T_c-T_a)_{l.l.}$: اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا در شرایط خط مبنای پایینی (درجه سانتی‌گراد)، a و b: ضرایب رابطه خطی و VPD: کمبود فشار بخار هوا (میلی‌بار) که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$VPD = 10 \times \exp\left[\frac{1678T_a - 116.9}{T + 237.3}\right]\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه T_a: دمای هوا (درجه سانتیگراد) و RH: رطوبت نسبی (درصد) می‌باشند. موقعیت خط مبنای پایینی تنش در شکل ۱ نشان داده شده است.

خط مبنای بالایی و یا خط تنش کامل معرف حداکثر اختلاف



شکل ۱. موقعیت خط مبنای بالایی و پایینی تنش به روش ایدسو

دمای بین گیاه و هوا است که می‌توان برای درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوای مجاور انتظار داشت، به‌طوری که وقتی اختلاف دمای گیاه و هوا به این حد افزایش یابد عمل تعرق به‌طور کامل متوقف می‌شود. خط مبنای بالا از رابطه زیر برآورد می‌شود (۶):

$$(T_c - T_a)_{u.l.} = a + b|AVPG| \qquad (۳)$$

در این رابطه $(Tc - Ta)_{u.l}$: اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوا در شرایط خط مبنای بالایی (درجه سانتیگراد) و AVPG: شیب فشار بخار اشباع (میلی بار) است.

برای توقف کامل تعرق، لازم است فشار بخار محیط به اندازه شیب فشار بخار افزایش یافته تا بتواند با گرادیان فشار بخار مقابله نماید (شکل ۱) از لحاظ تئوری شیب فشار بخار اشباع (AVPG) از رابطه زیر برآورد می‌شود (۶).

$$AVPG = e_s(T_a + a) - e_s(T_a) \qquad (۴)$$

با توجه به اینکه هر سه پارامتر طرف راست معادله ۳ قابل محاسبه هستند بنابراین، خط مبنای بالایی تنش را به صورت رابطه ۴ نیز می‌توان در نظر گرفت که در آن h مقدار ثابتی بر حسب درجه سانتی‌گراد و مستقل از کمبود فشار بخار است (۶).

$$(T_c - T_a)_{u.l.} = h \qquad (۵)$$

هدف اصلی از رسم حد بالا و پایین تنش برای هر گیاه تعیین شاخص تنش آبی آن گیاه است که بین این دو حد قرار می‌گیرد و هدف اصلی از تعیین این شاخص برنامه‌ریزی آبیاری گیاه است. مقدار شاخص تنش آبی گیاه بر این اساس تعیین می‌شود که با خروج آب از برگ در اثر تعرق، دمای برگ نسبت به دمای محیط اطراف افزایش پیدا می‌کند و با جایگزین شدن آب در برگ‌ها پس از آبیاری، دوباره دمای پوشش سبز گیاه کاهش می‌یابد. در بالا و پایین رفتن دمای گیاه نسبت به دمای محیط اطراف، برای هر گیاه یک حد مشخصی از این اختلاف دما وجود دارد که وقتی دمای برگ گیاه نسبت به محیط به آن حد برسد تنش رطوبتی در آن آغاز می‌شود. حد مجاز تنش رطوبتی برای هر گیاه با شاخصی بنام شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) نشان داده می‌شود.

به ازای مقدار معینی از کمبود فشار بخار آب، شاخص تنش آبی گیاه عبارتست از نسبت بین فاصله تفاوت دمای پوشش سبز گیاه و هوای اندازه گیری شده در نقطه تنش مجاز (نقطه Z) از خط مبنای پایینی (AZ)، به فاصله دو خط مبنا در همان مقدار کمبود فشار بخار هوا (AB). بنابراین، مطابق شکل (۱) این مقدار برابر است با نسبت AZ به AB و می‌توان گفت تغییرات شاخص تنش آبی گیاه بین صفر الی یک متغیر است (۶).

$$CWSI_i = \frac{AZ}{AB} = \frac{(T_c - T_a)_z - (T_c - T_a)_{l.l.}}{(T_c - T_a)_{u.l.} - (T_c - T_a)_{l.l.}} \qquad (۶)$$

در بررسی شاخص CWSI در مقادیر مختلف آب آبیاری بر روی گندم در سامانه آبیاری بارانی در ترکیه نشان داده شد که

از CWSI می‌توان در پیش بینی عملکرد استفاده کرد و در CWSI کمتر از ۰/۲۶ بیشترین عملکرد دانه گندم بدست آمد (۱). در منطقه هنام حد بالای تنش و شاخص CWSI برای گندم به‌ترتیب ۲/۶ درجه سانتی‌گراد و ۰/۳۶ محاسبه شد (۲).

در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت تابستانه تحت دونوع آبیاری سطحی و بارانی با استفاده از شاخص CWSI درشرایط اقلیمی اهواز، مقدار شاخص تنش آبی گیاه برای آبیاری بارانی در شهریور و مهرماه به‌ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۸ و مقدار این شاخص برای آبیاری سطحی در شهریور ۰/۱۴ و در مهرماه ۰/۱۵ برآورد شد .در این آزمایش معادله خط مبنای پایینی تنش محاسبه شده در آبیاری بارانی و سطحی گویای تنش آبی بیشتر در آبیاری سطحی به علت پایین‌بودن خط مبنای پایینی آن نسبت به آبیاری بارانی بود. خط مبنای پایینی تنش در ماه‌های شهریور و مهر در آبیاری بارانی به‌ترتیب $(T_a)_{1.1}$=2.76-0.25VPD و $(T_c-T_a)_{1.1}$=2.7-0.24VPD و برای آبیاری سطحی به‌ترتیب $(T_c-T_a)_{1.1}$=2.62-0.21VPD و $(T_c-T_a)_{1.1}$=2.77-0.23VPD محاسبه کردند. همچنین، موقعیت خط مبنای بالایی تنش برای ماه‌های شهریور و مهر در آبیاری بارانی به‌ترتیب $(T_c-T_a)_{u.t}$= 5.76 و $(T_c-T_a)_{u.t}$= 4.7 و برای آبیاری سطحی به‌ترتیب $(T_c-T_a)_{u.t}$= 5.1 و $(T_c-T_a)_{u.t}$= 4.7 محاسبه کردند (۵).

خروجی شاخص تنش آب گیاه (CWSI) در تعیین زمان آبیاری بسیار پایدار است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود از این روش برای مدیریت آبیاری استفاده شود (۳). CWSI به‌طور موفقیت آمیز برای برنامه‌ریزی آبیاری محصولات مختلف نظیر گندم (۱۳)، پنبه (۷)، ذرت (۱۰)، سیب‌زمینی (۸) و برخی سبزیجات (۱۱) در سراسر جهان بکار برده شده است.

در این مقاله حد بالا و پایین تنش با هدف تعیین حد آستانه تنش آبی گیاه گندم در منطقه کرج استخراج تا در برنامه‌ریزی آبیاری این گیاه مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش

در نمودار ایدسو (شکل ۱) در هر VPD مشخص، بی‌نهایت شاخص تنش آبی برای یک گیاه در یک منطقه برای برنامه‌ریزی آبیاری وجود دارد که می‌توان آن را برآورد کرد. اما در بین این شاخص‌ها فقط یک شاخص وجود دارد که اگر برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس آن انجام شود کارایی مصرف آب به حداکثر ممکن خواهد رسید. لازمه دستیابی به این شاخص، ابتدا رسم نمودار ایدسو برای گندم در کرج سپس تعیین این شاخص است. به‌منظور رسم نمودار و برآورد شاخص تنش آبی بهینه گیاه گندم ($CWSI_o$) آزمایشی با چهار تیمار شامل آبیاری به میزان I_1: ۳۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی (30%MAD)، I_2: ۴۵ درصد تخلیه مجاز رطوبتی (45%MAD)، I_3: ۶۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی (60%MAD) و I_4: ۷۵ درصد تخلیه مجاز رطوبتی (75%MAD) در ۴ تکرار در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۹ در مزرعه مؤسسه تحقیقات خاک و آب اجرا شد.

کاشت گندم در نیمه دوم آبان بعد از آماده‌سازی بستر کشت و عملیات کرت‌بندی انجام شد. ابعاد کرت‌ها ۵×۴ (متر در متر) و فاصله کرتها از همدیگر دو متر در نظر گرفته شد. سامانه آبیاری مورد استفاده سامانه ثقلی بود و حجم آب آبیاری هر کرت با کنتور نصب شده روی لوله انتقال آب اندازه‌گیری شد. قبل از کاشت از عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه نمونه‌ای برای تعیین خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک برداشت و مطابق جدول ۱ ویژگی شیمیایی و فیزیکی خاک تعیین شد.

با توجه به اینکه یکی از فرضیات استفاده از نمودار ایدسو در تعیین شاخص تنش آبی گیاهان تراکم کامل گیاه زراعی است. بنابراین، کلیه یادداشت‌برداری‌های آزمایش در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد صورت گرفت و نتایج ارائه شده هم برای این دوره از رشد گندم است. منبع آب آبیاری چاه و خصوصیات کیفی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

در این پژوهش دور آبیاری متغیر و عمق آب آبیاری با توجه به کمبود رطوبت خاک در روز قبل از آبیاری تعیین

جدول ۱. تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق خاک (Cm)	EC dS/m	PH	N %	p.(Av.)	OC %	رس ٪	سیلت ٪	شن ٪	بافت
۰-۳۰	۲/۴۷	۷/۵۲	۴۱	۱۰	۰/۴۱	۶	۳۴	۶۰	S-L

جدول ۲. تجزیه شیمیایی آب محل آزمایش

Ec	pH	Ca+mg	Na	Co_2H^-	So_4^{2-}
dS/m		Meq/L			
۲/۵	۷/۴۴	۱۰/۴	۱۴/۷	۴/۹	۲/۹۶

شد. برای محاسبه عمق خالص آب آبیاری (d_n) هر کرت از رابطه (۷) استفاده شد:

$$d_n = (F_c - CEW) \times Z \times MAD \qquad (۷)$$

که در آن Fc: درصد رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی، CEW: حد آب قابل جذب (درصد حجمی) مقدار آن بر اساس بافت خاک از منبع فائو ۵۶ استخراج شد، Z: عمق توسعه ریشه (متر)، MAD: تخلیه مجاز رطوبتی که برای هر تیمار درصد آن متفاوت است.

حجم آب آبیاری هر کرت از رابطه زیر محاسبه شد:

$$V_{gi} = \frac{d_n \times A}{E_a} \qquad (۸)$$

که در آن؛ A سطح هر کرت (مترمربع)، V_{gi}: حجم ناخالص آب آبیاری برای هر کرت (لیتر) و E_a: راندمان کاربرد آب در هر کرت آزمایشی است.

برای محاسبه خط مبنای پایینی تنش، درجه حرارت برگ گیاه گندم در روزهای بعد از آبیاری در هر یک از تیمارها به صورت جداگانه در ساعات قبل از ظهر که رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی است و گیاه هیچ محدودیتی از نظر جذب آب ندارد توسط دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری شد. اندازه گیری دمای پوشش گیاهی از چهار جهت بالا و پایین (برگ پیر و جوان)، چپ و راست گیاه اندازه‌گیری شد. همزمان و به تعداد اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی، با استفاده از یک دماسنج معمولی کوچک دمای هوای محیط اطراف نیز ثبت شد. با داشتن دمای پوشش گیاهی و دمای هوا، اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا (T_c-T_a) محاسبه شد. از طرف دیگر، با داشتن دما و رطوبت نسبی هوای اطراف (رطوبت نسبی مستقیماً از نزدیکترین ایستگاه هواشناسی دریافت شد) کمبود فشار بخار هوای متناظر با هر یک از (T_c-T_a)ها (رابطه ۲) محاسبه شد. بر اساس مختصات هر یک از این زوج اعداد (VPD و (Tc-Ta))، محل آنها بر روی محور مختصات پیشنهادی ایدسو که در آن محور عمودی اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا (T_c-T_a) و محور افقی کمبود فشار بخار هوا (مانند شکل ۱) را نشان می‌دهند مشخص شدند. سپس از بین این نقاط یک خط رگرسیون برازش داده شد که به‌عنوان خط مبنای پایین یا حد بدون تنش گیاه گندم در منطقه کرج معرفی شد.

برای تعیین خط مبنای بالا علاوه بر روش تئوریک (رابطه ۴) از روش اندازه‌گیری میدانی هم استفاده شد. برای این منظور دمای پوشش گندم و هوا در تیمار خشک و در مواقع لزوم در مزارع اطراف که تحت تنش شدید قرار داشتند در ساعات بعدازظهر اندازه‌گیری و (T_c-T_a) محاسبه و بر روی نمودار منتقل شدند سپس از بین این نقاط یک خط برازش داده شد که همان خط حداکثر تنش گندم یا خط مبنای بالایی گندم است.

برای برآورد شاخص تنش آبی بهینه گندم ($CWSI_o$)، مطابق با دستورالعمل ذکر شده قبل از هر آبیاری، برای هر یک از تیمارها بصورت جداگانه، با اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی و هوا و محاسبه اختلاف آنها (T_c-T_a) و همچنین محاسبه کمبود

فشار بخار در همان روز، زوج نقاط (VPD , Tc-Ta) مشخص شد، این زوج نقاط بر روی نمودار ترسیم شده، پیاده‌سازی شد. در هر تیمار از بین نقاط به‌دست آمده به این روش در طول فصل رشد، خطی برازش داده شد که مطابق تعریف شاخص تنش آبی گیاه گندم بر اساس برنامه‌ریزی آبیاری تعریف شده در آن تیمار است. از بین این چهار تیمار شاخص تنش آبی گیاه گندم در تیماری که بالاترین کارایی مصرف آب را داشت به‌عنوان شاخص تنش آبی بهینه گندم معرفی شد. برای این منظور پس از برداشت گندم مقدار عملکرد و آب مصرفی هر تیمار در واحد سطح محاسبه و با استفاده از رابطه زیر کارایی مصرف آب گیاه گندم برای هر تیمار محاسبه شد:

$$\text{کارایی مصرف آب} = \frac{\text{مقدار عملکرد در واحد سطح}}{\text{مقدار آب مصرفی در واحد سطح}} \quad (۹)$$

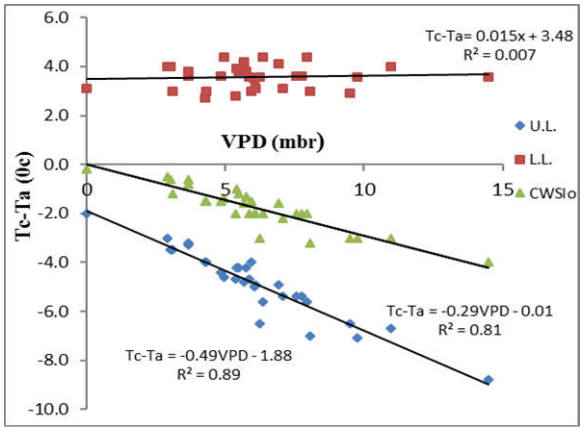
نتایج و بحث

استخراج معادله خط مبنای پایین یا حد بدون تنش

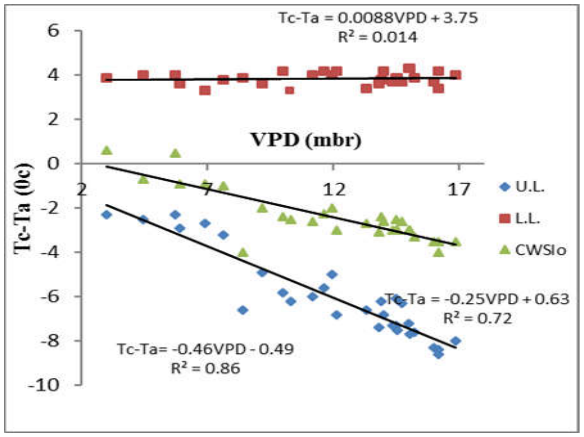
خط مبنای پایین تنش برای گیاه گندم در منطقه کرج همراه معادلات و ضریب تبیین در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد، در شکل‌های ۲ تا ۴ و برای مجموع سه ماه در شکل ۵ ارائه شده است. ضریب همبستگی بین VPD و Tc-Ta برای ماه های فروردین، اردیبهشت و خرداد به‌ترتیب ۰/۸۹، ۸۶ و ۰/۸۲ و برای مجموع سه ماه ۰/۷۲ بود و نشان داد که در شرایطی که گندم هیچ محدودیتی در جذب آب ندارد اختلاف دمای پوشش گندم و هوا به شدت به کمبود فشار بخار اشباع هوا وابسته است و از این نمودار برای اهداف آبیاری می‌توان استفاده کرد. همچنین، با عنایت به نمودار اشکال ۲ تا ۵، با کاهش کمبود فشار بخار اشباع هوا (افزایش رطوبت نسبی هوا و کاهش دما)، اختلاف دمای پوشش گیاهی گندم و هوا کاهش می‌یابد (برای نمونه در خرداد ماه $Tc\text{-}Ta= -3\ ^0c$) و این نشان می‌دهد که در روزهای مرطوب و خنک دمای پوشش سبز گیاه گندم نسبت به روزهای گرم و خشک به دمای هوا نزدیکتر است و در طول یک ماه این اختلاف به چندین برابر می‌رسد (در خرداد ماه در روزهایی که VPD بیشتر است اختلاف دمای هوا و گندم ۱۲- درجه سانتی‌گراد و در روزهای که VPD کم است این اختلاف ۳- درجه سانتی‌گراد است). این موضوع در مقایسه بین ماه‌های فصل رشد هم صادق است. هر چه به سمت برداشت گندم (خردادماه) پیش می‌رود دمای هوا افزایش و مقدار رطوبت نسبی هوا کاهش می‌یابد. افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی مقدار کمبود فشار بخار اشباع را افزایش می‌دهد. بنابراین، در خردادماه اختلاف دمای پوشش سبز و هوا بیشتر از ماه‌های اردیبهشت و فروردین است به عبارت دیگر خط مبنای پایینی در این ماه پایینتر از دو ماه دیگر است. از نتایج قابل توجه دیگر شیب خط مبنای پایینی است. شیب خط مبنای پایینی بستگی به تغییرات دما و رطوبت نسبی هوا در طول هر ماه دارد و چون تغییرات دما در فروردین ماه بیشتر از دو ماه دیگر بود بنابراین، شیب خط در این ماه بیشتر بود (شکل‌های ۲ تا ۴). قربانی و همکاران (۵)، برای ماه‌های شهریور و مهر معادلات مشابهی را برای گیاه ذرت در منطقه خوزستان ارائه دادند. این پژوهشگران نیز برای ماه شهریور که گرم‌تر از مهرماه بود نتایج مشابهی را ارائه دادند و شیب خط مبنای پایین در مهرماه را کمتر از شهریور بدست آوردند.

خط مبنای بالا یا حد تنش حداکثر

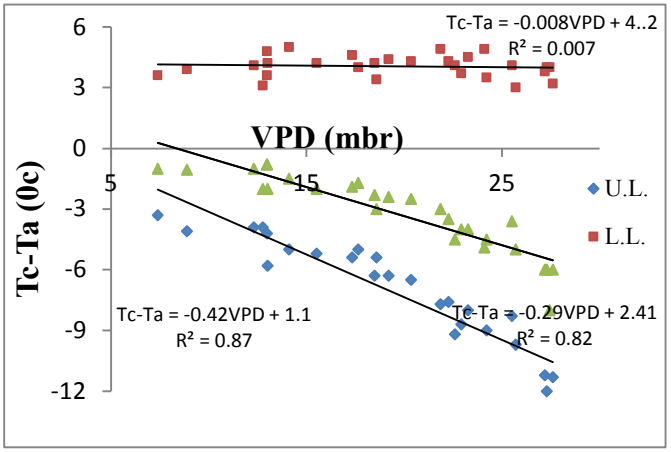
خط مبنای حداکثر تنش به دو روش تئوری و عملی استخراج شد. در روش تئوری پس از محاسبه AVPG از رابطه ۴، معادله حد بالای تنش استخراج شد و در روش عملی پس از اندازه گیری دمای پوشش گیاهی و هوا در مزرعه‌ای که تحت تنش شدید بودند، (T_c-T_a) محاسبه و محل آنها بر روی نمودار مشخص سپس خطی از بین آنها برداشت داده شد. که معادله خطوط همراه با ضریب همبستگی در شکل‌های ۲ تا ۴ برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد و در شکل ۵ برای مجموع سه ماه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی همه معادلات پایین است و در



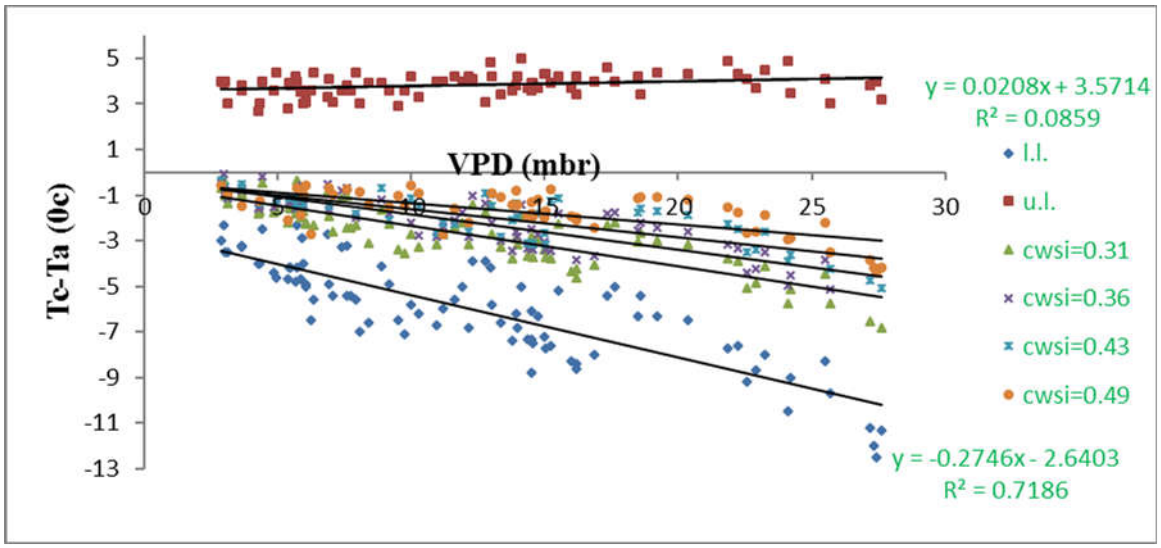
شکل ۲. نمودار خط حداقل، حداکثر تنش و CWSI در فروردین (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۳. نمودار خط حداقل، حداکثر تنش و CWSI در اردیبهشت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. نمودار خط حداقل، حداکثر تنش و CWSI بهینه در ماه خرداد (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. منحنی CWSI در تیمارهای مختلف در سه ماه فروردین، اردیبهشت و خرداد (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۳. معادلات خط مبنای بالا و پایین و CWSI در چهار تیمار در هر سه ماه فروردین، اردیبهشت و خرداد

دوره رشد	تیمار	خط مبنا	رابطه	ضریب تبیین
سه ماه	–	بالا	$(Tc-Ta)_{u.l} = 0.0208\ (VPD) + 3.57 \approx 3.6$	0.008
	–	پایین	$(Tc-Ta)_{u.l} = -0.274\ (VPD) - 2.6403$	0.72
	1	$CWSI_{0.31}$	$(Tc-Ta)_{u.l} = -0.1782\ (VPD)\ -0.563$	0.73
	2	$CWSI_{0.36}$	$(Tc-Ta)_{l.l} = -0.153\ (VPD)- 0.3272$	0.69
	3	$CWSI_{0.43}$	$(Tc-Ta)_{u.l} = -0.1228\ (VPD)\ -\ 0.4162$	0.63
	4	$CWSI_{49}$	$(Tc-Ta)_{l.l} = -0.0925\ (VPD)\ -\ 0.4181$	0.58

جدول ۴. تجزیه واریانس شوری آب آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب

صفات / منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	کارایی مصرف آب
تکرار	۳	۹۰۹۷^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}
تیمار	۳	۱۵۱۵۲۰۸**	۰/۳۷**
خطا	۶	۶۰۷۶۳	۰/۰۰۱
CV	–	۵/۶	۴/۴

ns: غیر معنی‌دار، * معنی‌دار در سطح ۵٪ و ** معنی‌دار در سطح ۱٪

شرایط تنش حداکثر و توقف تعرق، اختلاف دمای گیاه گندم با هوا (T_c-T_a) مستقل از کمبود فشار بخار اشباع هواست. به‌علاوه، حد بالای تنش در ماه گرم‌تر مثل خرداد بالاتر از دو ماه دیگر بود (۳/۴۸، ۳/۷۵ و ۴/۲ به‌ترتیب برای ماه‌های فروردین اردیبهشت و خرداد) و نشان داد که در ماه‌های گرم سال اختلاف دمای گندم و هوا بیشتر از ماه‌های خنک است. از نظر تئوری هم این موضوع قابل اثبات است چون بالابودن رطوبت نسبی و پایین بودن دمای هوا در فروردین ماه نسبت به دو ماه اردیبهشت و خرداد، سبب افزایش فشار بخار واقعی و کاهش فشار بخار اشباع و در نتیجه مطابق رابطه ۴، کاهش شیب فشار بخار (AVPG) و کاهش شیب فشار بخار مطابق رابطه ۳ باعث کاهش (T_c-T_a) بنابراین، خط مبنای بالایی یا خط حداکثر تنش در این ماه پایین‌تر از دو ماه دیگر قرار می‌گیرد (شکل‌های ۲ تا ۴). یوآن و همکاران (۱۳)، ایدسو و همکاران (۶) و قربانی (۵) نیز نتایج مشابهی دریافت کردند. قربانی (۵) برای گیاه ذرت در شهریور ۵/۱ و برای مهرماه که خنک‌تر است ۴/۷ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. در هنام لرستان هم حد بالای تنش برای گندم ۲/۶ درجه اعلام شده است (۲).

تعیین شاخص CWSI

هدف از تعیین خط مبنای بالا و پایین تنش برای هر گیاه، برآورد شاخص تنش آبی آن گیاه برای برنامه‌ریزی آبیاری (تعیین دور و عمق آب آبیاری) است. بر این اساس پس از تعیین حد بالا و پایین تنش در گیاه گندم، شاخص تنش آبی برای هر تیمار مطابق دستورالعمل و با استفاده از رابطه ۶ برآورد و بر اساس آن خطی از بین آنها برازش داده شد که ضریب تبیین و معادله خط مبنای بالا و پایین نمودار ایدسو برای هر سه ماه و شاخص تنش آبی گندم در هر یک از تیمارها در جدول ۳ ارائه شده است. از طرف دیگر در انتهای فصل رشد پس از برداشت گندم و محاسبه عملکرد و آب مصرفی در واحد سطح برای هر یک از تیمارها، کارایی مصرف آب آنها هم با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد. تجزیه آماری عملکرد و کارایی مصرف

جدول ۵. میانگین عملکرد، آب مصرفی، کارایی مصرف آب و شاخص تنش آبی تیمارها

تیمار	عملکرد (Kg)	آب مصرفی (m^3)	WUE	دور آبیاری (روز)	CWSI
۱	۴۴۰۰	۸۱۰۰	۰/۵۴	۳	۰/۳۱
۲	۴۵۷۵	۶۸۰۰	۰/۶۷	۵	۰/۳۶
۳	۳۲۸۰	۶۴۸۰	۰/۵۱	۷	۰/۴۳
۴	۲۱۷۰	۵۵۴۰	۰/۳۹	۱۰	۰/۴۹

آب (جدول ۴) نشان داد که تیمار آبیاری بر اساس تخلیه ۰/۴۵ آب در دسترس خاک، بالاترین کارایی مصرف آب معادل ۰/۶۷ را داشت (جدول ۵). بر این اساس شاخص تنش آبی این تیمار به‌عنوان شاخص تنش آبی بهینه برای استفاده در تعیین زمان آبیاری گندم معرفی شد. مقدار میانگین این شاخص برای مجموع سه ماه ۰/۳۶ بدست آمد (جدول ۵). اما مقدار بهینه این شاخص برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد به‌طور جداگانه به‌ترتیب ۰/۳۷، ۰/۳۶ و ۰/۲۸ محاسبه شد. این به این معناست که اگر زمان آبیاری گندم برای هر ماه به صورت جداگانه مد نظر باشد باید از شاخص تنش آبی همان ماه استفاده شود اما اگر زمان آبیاری گندم در مجموع سه ماه مد نظر باشد باید از شاخص تنش آب معادل ۰/۳۶ استفاده شود. در ترکیه و هنام لرستان شاخص CWSI برای گندم به‌ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۳۶ تعیین شد که با نتایج تحقیقات حاضر مطابقت دارد (۱ و ۴).

نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس شاخص تنش خشکی جامع‌تر و دقیق‌تر از روش‌های مبتنی بر نمایه‌های خاکی است. در برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس رطوبت خاک، با تغییر بافت و ظرفیت گنجایش رطوبتی خاک، برنامه‌ریزی آبیاری گندم باید دوباره تعیین شود اما با بدست آوردن شاخص تنش آبی گیاه گندم در یک منطقه، بدون توجه به بافت خاک می‌توان با استفاده از نمودار ترسیم شده برنامه‌ریزی آبیاری گندم را در بافت‌های مختلف خاک انجام داد. نکته بعدی در استفاده از شاخص تنش آبی گندم اینست که هر چه میزان دما هوا افزایش و رطوبت نسبی کاهش یابد شاخص تنش خشکی گندم کمتر می‌شود این به این معناست که دور آبیاری گیاه گندم در این شرایط کوتاه‌تر می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Alghory, A. and A. Yazar. 2019. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. *Irrigation Science* 37: 61-77.
2. Alizadeh, A. 1999. Evapotranspiration and irrigation need. PP. 215-260. *In:* A. Alizadeh, (Ed.), Soil Water Plant relationship. Imam Reza University, Mashhad (In Persian).
3. Bai, J. J., Y. Yu and L. P. Di. 2017. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 16: 389-397.
4. Dehghanisanij, H., M. Nakhjavani Moghaddam and B. Ghahraman. 2017. Scheduling single irrigation for rainfed wheat using crop water stress index (Case study: the upper part of the Karkheh basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 11(4): 552-560 (In Farsi).
5. Ghorbani, M., S. Broumandnassab, A. Soltani Mohammadi and S. Minae. 2015. Summer maize irrigation scheduling under surface and sprinkler irrigation using CWSI in Ahvaz climatic condition. *Irrigation science and Engineering* 38(4): 63-73 (In Farsi).
6. Idso, S. B., R. J. Reginato and J. W. Radin. 1982. Leaf diffusion resistance and photosynthesis in cotton related to a foliage temperature based plant water stress index. *Agricultural Meteorology* 27:27-34.

7. O'Shaughnessy, S. A., S. R. Evett, P. D. Colaizzi and T. A. Howell. 2011. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management* 98: 1523-1535.
8. Ramirez, D. A., W. Yactayo, L. R. Rens, J. L. Rolando, S. Palacios, F. De Mendiburu and V. Mares. 2016. Defining biological thresholds associated to plant water status for monitoring water restriction effects: Stomatal conductance and photosynthesis recovery as key indicators in potato. *Agricultural Water Management* 177:369-378.
9. Robert, J., R. J. Reginato and J. Howe. 1985. Irrigation scheduling using indicators. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 111: 125-133.
10. Romano, G., S. Zia, W. Spreer, C. Sanchez, J. Cairns, J. L. Araus and J. Müller. 2011. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Computers and Electronics in Agriculture* 79: 67-74.
11. Rud, R., Y. Cohen, V. Alchanatis, A. Levi, R. Brikman, C. Shenderey, B. Heuer, T. Markovitch, Z. Dar, C. Rosen, D. Mulla and T. Nigon. 2014. Crop water stress index derived from multiyear ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agriculture* 15: 273-289.
12. Stockle, C. O. and W. A. Dugas. 1992. Evaluating canopy temperature- based indices for irrigation scheduling. *Irrigation Science* 13: 31-37.
13. Yuan, G., Y. Luo, X. Sun and D. Tang. 2004. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 64: 29-40.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 26, No. 2, Summer 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Determination of Wheat Stress Index(CWSI) in Karaj for Use in Irrigation Scheduling

M. Abdi[1*], H. Sharifan[1], H. Jafari[2] and K. Ghorbani[1]

(Received: September 1-2021; Accepted: October 10-2021)

Abstract

The irrigation schedule of crops is the most effective way to increase agricultural water use efficiency. In irrigation planning, determining the irrigation time is more important and difficult than determining the depth of irrigation water. Among all methods of determining the irrigation time of crops, the methods which used plants are more accurate than other methods. In this study, the wheat water stress index has been used which is based on the air vapor pressure deficit and the difference between vegetation and air temperature (Tc-Ta). First of all, the diagram and the relationship between the top and bottom baselines were extracted, then the water stress index of wheat was drawn in the Karaj region. Secondly, to determine the optimal water stress index of wheat, four treatments including I_1: 30% of maximum allowable depletion of moisture, I_2: 45% of maximum allowable depletion of moisture, I_3: 60% of maximum allowable depletion of moisture, I_4: 75% of maximum allowable depletion of moisture were performed in four replications. The amount of water stress index of each treatment was calculated during the season separately, and the CWSI of the treatment with the highest water use efficiency was used to determine the irrigation time of wheat. The results showed that the relationship between the upper and lower baseline for wheat in the Karaj region is Tc-Ta = 3.6 0c and Tc-Ta = -0.27VPD - 2.64, respectively. The treatment of 45% of maximum allowable depletion of moisture had the highest water use efficiency and the optimal water stress index for wheat was obtained at 0.36 in the Karaj region.

Keywords: Irrigation planning, Water use efficiency, Vegetation temperature difference, Idso diagram

1. Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
*: Corresponding author, Email: abdimohsen12@yahoo.com