

مقایسه شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و شاخص کمبود آب (WDI) در گیاه گندم با استفاده از فناوری سنجش از دور (RS)

حسین جعفری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱

چکیده

قابلیت سنجش از دور (RS) در برنامه‌ریزی آبیاری به دلیل جمع‌آوری داده‌ها در سطح وسیع با سرعت بیشتر و هزینه کمتر، در جهان پذیرفته شده است. شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و شاخص کمبود آب (WDI) جزء شناخته‌ترین شاخص‌های تنش آبی هستند. وابستگی شاخص CWSI به تراکم کامل پوشش گیاهی، باعث عدم استفاده از این شاخص در برنامه‌ریزی آبیاری در مراحل اولیه رشد گیاهان می‌شود. در صورتی که برآورد شاخص کمبود آب با استفاده از فناوری سنجش از دور، این محدودیت را ندارد. به منظور بررسی دقت این شاخص آزمایشی در سال زراعی ۹۸-۹۹ در شهر کرج اجرا شد. در این آزمایش، ابتدا بر اساس داده‌های میدانی و مطابق دستورالعمل حد بالا و پایین تنش آبی و شاخص تنش آبی گیاه گندم (CWSI) تعیین شد سپس با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اختلاف دمای سطح مزرعه و هوا ($T_s - T_a$) و شاخص NDVI برآورد و بر اساس آن‌ها شاخص کمبود آب (WDI) گندم محاسبه شد. در انتهای فصل، مقادیر شاخص‌های WDI و CWSI برآورد شده در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد با استفاده از پارامترهای آماری مقایسه و ارزیابی شدند. نتایج نشان از ضریب تبیین بالا بین این دو شاخص در این سه ماه به ترتیب معادل ۰/۷۷، ۰/۸۵ و ۰/۷۱ داشت.

واژه‌های کلیدی: دمای پوشش گیاهی، شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI)، کمبود فشار بخار اشباع

۱. مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: jafari52_h@yahoo.com

مقدمه

برنامه‌ریزی صحیح آبیاری نقش زیادی در استفاده بهینه از منابع آب موجود در کشاورزی دارد. روش‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده است که اغلب وابسته به خصوصیات فیزیکی و مقدار رطوبت موجود در خاک مزرعه هستند. اما در برخی از آن‌ها دور و عمق آب آبیاری بر اساس شاخص‌های تنش آبی مثل شاخص تنش آبی گیاه (Crop Water Stress Index or CWSI) و شاخص کمبود آب (Water Deficit Index or WDI) انجام می‌شود. اساس کار هر دو شاخص بر اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی و هوا استوار است. جکسون و همکاران (۱۴) در سال ۱۹۸۱ تئوری شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و یک سال بعد، ایدسو (۱۳) جنبه کاربردی آن را توسعه دادند. تئوری شاخص تنش آبی گیاه، از بیان انرژی در حالت غیرتنش، برای آسمان گیاه نتیجه شده است. دامنه تغییرات CWSI بین صفر و یک است که مقدار حداقل آن برای شرایط غیرتنش و مقدار حداکثر آن برای شرایط تنش کامل آب است (۲۶).

پژوهش‌های زیادی نشان داده است که خروجی شاخص تنش آب گیاه در تعیین زمان آبیاری بسیار پایدار است بنابراین پیشنهاد شده از این روش برای مدیریت آبیاری استفاده گردد (۴). CWSI به‌طور موفقیت‌آمیز برای برنامه‌ریزی آبیاری محصولات مختلف نظیر گندم (۲۷)، پنبه (۱۹)، ذرت (۲۲)، سیب‌زمینی (۲۱) و درختان میوه (۲۰) در سراسر جهان به کار برده شده است.

در پژوهشی خط مبنای پایینی برای گیاه آفتابگردان برای ماه‌های فروردین و اردیبهشت به ترتیب به صورت $(Tc-Ta)_{l.l}=1.362-0.188VPD$ و $(Tc-Ta)_{l.l}=1.525-0.204VPD$ برآورد شد. همچنین در این پژوهش خط مبنای بالایی برای ماه‌های فروردین و اردیبهشت به ترتیب $4/6$ و $4/42$ درجه سانتی‌گراد تعیین شد (۱۶). در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت تابستانه تحت دو نوع آبیاری سطحی و بارانی با استفاده از شاخص CWSI در شرایط اقلیمی اهواز، مقدار شاخص تنش آبی گیاه

برای آبیاری بارانی در شهریور و مهرماه به ترتیب $0/14$ و $0/18$ و مقدار این شاخص برای آبیاری سطحی در شهریور $0/14$ و در مهرماه $0/15$ برآورد شد (۱۰).

شاخص CWSI با پتانسیل آب برگ گیاه، مقدار عملکرد، شاخص سطح برگ، و مقدار رطوبت خاک در سطوح مختلف آبیاری رابطه غیرمستقیم دارد همچنین CWSI بهینه برای گیاه کینوا (Quinoa) در آمریکای لاتین $0/35$ معرفی کردند (۵).

مقادیر شاخص CWSI برای زمانبندی آبیاری سویا در طول دوره رشد برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب در مرحله توسعه، میانی و نهایی رشد گیاه به ترتیب $0/42$ ، $0/37$ و $0/29$ برآورد کردند (۲).

کاربرد شاخص CWSI به همراه ماهواره یا سنجنده‌های هوایی در اندازه‌گیری دمای سطحی به شرایطی که سطح پوشیده از گیاه باشد محدود می‌شود و در این حالت دمای اندازه‌گیری شده سطحی برابر با دمای کانوپی خواهد بود. این محدودیت از کارایی این شاخص برای شرایط پوشش گیاهی غیر متراکم در برنامه‌ریزی آبیاری می‌کاهد. برای هماهنگ شدن با شرایط پوشش گیاهی غیر متراکم، موران و همکاران (۱۷) شاخص کمبود آب (WDI) را ارائه کرد که در آن دمای سطح خاک و گیاه توأمان اندازه‌گیری می‌شود. مزیت این شاخص این است که پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) و دمای پوشش گیاهی از تراکم صفر تا تراکم 100 درصد توسط ماهواره قابل دریافت است و نسبت به شاخص CWSI برنامه‌ریزی آبیاری در سطح وسیع و در حداقل زمان و با کمترین هزینه امکان‌پذیر است (۱۲). بر این اساس ایده استفاده از دوزنقه دما-پوشش گیاهی را به منظور توصیف رابطه اختلاف دمای هوا و سطح زمین در برابر میزان تراکم مختلف پوشش گیاهی (NDVI) تشریح کردند و از طریق تعریف شاخص کمبود آب (WDI, Water Deficit Index) وضعیت تبخیر و تعرق را در هر دو پوشش گیاهی متراکم و ضعیف بررسی کردند. در این ایده مانند سایر پژوهش‌ها، NDVI به‌عنوان یک شاخص مؤثر برای نظارت بر پوشش

گیاهی و محیط طبیعی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی، مورد استفاده قرار گرفته است (۶، ۷ و ۹).

در بین تمام روش‌هایی که برای تعیین تنش آبی گیاهان با استفاده از تکنیک سنجش از دور ارائه شده است، روش موران و همکاران (۱۷) (WDI) بر اساس مفهوم نسبت تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق پتانسیل پرکاربردترین و ساده‌ترین روش است (۱۱ و ۲۵). در تجزیه و تحلیل تنش آبی محصول گندم دوروم از طریق محاسبه نسبت تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق پتانسیل (AET / PET) با استفاده از شاخص کمبود آب آبیاری (WDI) و استفاده از الگوریتم (S-SEBI) از طریق تکنیک سنجش از دور، مشخص شد که این تکنیک‌ها برای مدیریت آبیاری دقیق امیدوارکننده هستند. در این پژوهش ضریب همبستگی بین نسبت تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق پتانسیل اندازه‌گیری شده و به دست آمده از شاخص WDI و الگوریتم (S-SEBI) به ترتیب ۰/۸ و ۰/۷۵ بود (۱۵). در مقایسه شاخص تنش آب و شاخص کمبود آب (WDI) با استفاده از سنجش از دور (RS) دقیق‌ترین و ساده‌ترین روش برای به دست آوردن شاخص کمبود آب آبیاری هر مزرعه را تعیین پوشش گیاهی (شاخص NDVI) آن مزرعه معرفی شد و سنجش از دور به عنوان یک روش مناسب برای جمع‌آوری داده‌ها در سطح وسیع و تعیین شاخص‌های تنش آب معرفی شد همچنین شاخص‌های تنش آبی مثل شاخص کمبود آب آبیاری (WDI) به عنوان ابزارهای مفید برای جلوگیری از اثرات خشکی و خشکسالی و تعیین برنامه‌ریزی آبیاری توصیه شدند (۲۳).

در صورت استفاده از شاخص WDI در برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان، می‌توان با آب کم، عملکرد بیشتر برداشت کرد. در استفاده از شاخص CWSI در صورت ظاهر بودن بخشی از خاک مزرعه اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی (T_s) مشکلاتی دارد اما در استفاده از شاخص WDI دمای سطح خاک و سطح گیاه توأمان به عنوان دمای سطح (T_s) پذیرفته می‌شود (۳). با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای میزان شاخص‌های CWSI و

WDI در مزارع نیشکر برآورد شدند. نتایج نشان داد که در این شاخص WDI بهتر از شاخص CWSI تنش را آشکار می‌نماید و حد آستانه‌ای ۰/۹۶ برای تنش نیشکر توصیه شد (۱۸).

برای برآورد تنش آبی اراضی کالیفرنای آمریکا که قسمتی از اراضی آن دارای پوشش گیاهان مرتعی و گندم بوده و بخش دیگر اراضی بدون پوشش گیاهی بود، از شاخص کمبود آب آبیاری (WDI) با تصاویر ماهواره‌ای مودیس استفاده شد. در این آزمایش برای پوشش‌های مختلف گیاهی، ضریب همبستگی بین این شاخص با اختلاف دمای پوشش گیاهی و دمای هوا، ۰/۷۲ اعلام شد (۸). عکس‌العمل درخت سیب هیبریدی در شرایط محدودیت آب خاک، با کمک سنجش از راه دور در کشور فرانسه مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، یک رویکرد سنجش از دور که به طور معمول برای مدیریت آبیاری محصول استفاده می‌شود، با هدف فنوتیپ‌کردن یک جمعیت گیاهی در مزرعه توسعه داده شد. آزمایش بر روی ۱۲۲ هیبرید و ۴ تکرار در مرحله بلوغ انجام شد. با دریافت تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از باند حرارتی دمای سطح پوشش گیاهی و دمای هوا و از طریق باندهای RGB و NIR شاخص (NDVI) محاسبه شد. برای در نظر گرفتن پوشش گیاهی نامترکم، شاخص کمبود آب آبیاری، بر اساس شاخص (NDVI) محاسبه شد. نتایج نشان داد که ژنوتیپ و خشکسالی اثرات معنی‌دار بر روی شاخص‌های کمبود آب آبیاری در طول تابستان که درخت با کمبود آب مواجه بود داشته است اما اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌دار بر شاخص WDI نداشت. در این آزمایش اعتبارسنجی مقدار شاخص کمبود آب آبیاری (WDI) به وسیله روش ارائه شده توسط ایدسو (۲۴) به صورت میدانی انجام گرفت. در بررسی شاخص‌های تنش بر اساس تصاویر ماهواره‌ای حرارتی در پاسخ به محدودیت‌های آب، برای باغی با درختان سیب غیرهمگن، رویکرد آماری WDI را مناسب‌ترین شاخص با کارایی بالا معرفی کردند.

شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)، شاخص کمبود آب (WDI) هم برای هر گیاه در هر منطقه متفاوت است که مقدار

مبنای پایین) و دیگری حداکثر تنش (خط مبنای بالا) که در شرایط پوشش کامل گیاهی ترسیم می‌گردد. خط مبنای پایینی تنش، از خصوصیات ویژه هر گیاه است و معرف شرایطی است که در آن گیاه از نظر تأمین آب از ناحیه ریشه با هیچ محدودیتی روبرو نبوده بنابراین، میزان تعرق گیاه، در حداکثر مقدار خود قرار دارد. به عبارت دیگر شدت تعرق در این شرایط برابر شدت تعرق در شرایط استاندارد (پتانسیل) است که برای هر گیاه یک مقدار معین است و مقدار آن در گیاهان مختلف متفاوت است. مطابق پیشنهاد ایدسو (۱۴) خط مبنای پایینی تنش بر اساس دو پارامتر اختلاف دمای پوشش سبز و هوا بعد از هر آبیاری (i.u. (Tc-Ta) و کمبود فشار بخار هوا (AVPD) از رابطه (۱) محاسبه شد؛

$$(T_c - T_a)_{i.u.} = a - b(AVPD) \quad (1)$$

کمبود فشار بخار هوا (میلی بار) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$AVPD = 10 \times \exp \left[\frac{1678T_a - 116.9}{T_a + 237.3} \right] \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \quad (2)$$

در این رابطه T_a : دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و RH: رطوبت نسبی، a و b ضرایب ثابتی هستند که برای گیاهان و مناطق مختلف متفاوت است. خط مبنای بالا یا خط تنش کامل معرف حداکثر مقدار اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا که در آن تعرق به‌طور کامل متوقف شده و مستقل از کمبود فشار بخار هواست. موقعیت خط مبنای بالا با استفاده از روابط زیر تعیین شدند (۱۲):

$$(T_c - T_a)_{u.l.} = a + b|AVPG| \quad (3)$$

$$AVPG = e_s(T_a + a) - e_s(T_a) \quad (4)$$

$$e_s(T_a) = 10 \times \exp \left[\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3} \right] \left(\frac{1000}{101} \right) \quad (5)$$

که در آن؛ $(T_c - T_a)_{u.l.}$: اختلاف دمای پوشش گیاه و هوا در نقطه‌ای از مزرعه که تحت تنش بسیار شدید آبی قرار دارد و شیب فشار بخار هوا (Air vapor pressure gradient or AVPG) بر حسب میلی‌بار است.

وقتی هوا از بخار آب اشباع است یعنی فشار بخار واقعی هوا (e_a) برابر فشار بخار اشباع (e_s) می‌شود تعرق کم می‌شود اما مطابق رابطه ۱ متوقف نمی‌شود بلکه به دلیل اختلاف دمای بین

آن برای گیاهان مختلف در یک منطقه و هر گیاه در مناطق مختلف باید تعیین شود. بنابراین، تعیین شاخص CWSI و WDI برای گیاه گندم در منطقه کرج و صحت و اعتبارسنجی شاخص WDI در مقایسه با شاخص CWSI در برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان دو هدف پژوهش حاضر هستند.

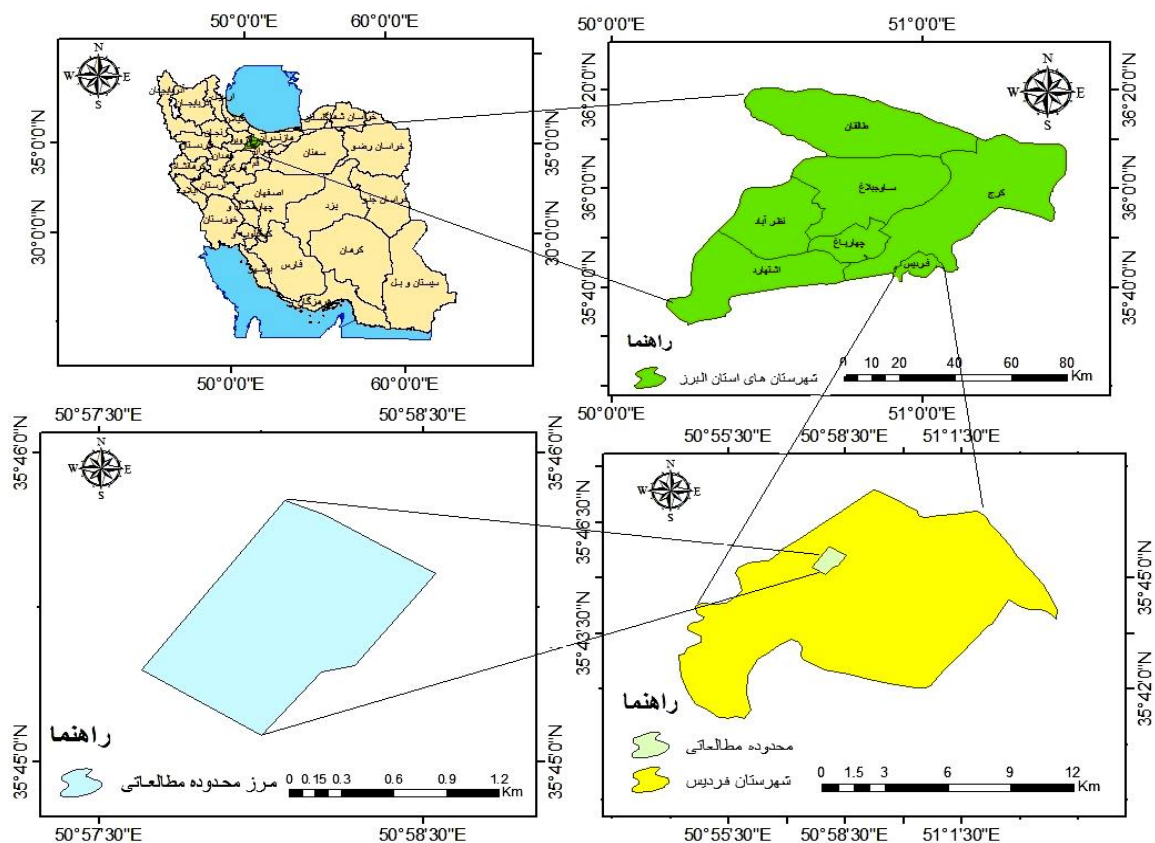
مواد و روش‌ها

مقایسه شاخص WDI و CWSI، در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ پس از استخراج برنامه آبیاری بهینه گندم در منطقه کرج یعنی ۴۵ درصد تخلیه مجاز رطوبتی انجام شد (۱). مزرعه‌ای به وسعت ۲۰ هکتار متعلق به موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر واقع در جنوب کرج برای این منظور انتخاب شدند (شکل ۱). گندم در نیمه دوم آبان کشت شد. به دلیل عدم پوشش کامل مزرعه و جلوگیری از تأثیر دمای سطح خاک در اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه، اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد انجام شد. پارامترهای اثرگذار بر تبخیر و تعرق یعنی درجه حرارت هوا، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در این سه ماه مطابق جدول ۱ بود.

اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی در روزهای صاف و آفتابی، قبل و بعد از هر آبیاری و از چهار جهت جغرافیایی در هر اندازه‌گیری صورت گرفت. هر ۸ روز یک تصویر و در مجموع ۱۳ تصویر در این سه ماه دریافت شد. آبیاری مزرعه بر اساس تخلیه رطوبتی ۴۵ درصد انجام شد که برای این منظور هر روز حدود ۲/۵ هکتار به صورت چرخشی آبیاری می‌شد. برای برآورد شاخص CWSI از داده‌های میدانی و شاخص WDI از داده‌های دریافت شده از ماهواره لندست ۸ استفاده شد و با استفاده از پارامترهای آماری مورد مقایسه قرار گرفتند. فلوجارت مراحل پژوهش در شکل ۲ و مراحل گام‌به‌گام آزمایش به شرح ذیل انجام شد:

برآورد شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)

نمودار ایدسو (۱۴) متشکل از دو خط مبنای یکی بدون تنش (خط



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محل آزمایش (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. میانگین برخی پارامترهای هواشناسی در کرج سال ۱۳۹۹

ماه	کمینه دما	بیشینه دما	میانگین دما	میزان بارش	کمینه رطوبت نسبی	بیشینه رطوبت نسبی	میانگین سرعت باد	ساعات آفتابی
فروردین	۵/۸	۱۶/۹۳	۱۰/۳۷	۲/۵۱	۴۰/۷۴	۸۳/۱۹	۲/۵۵	۶/۶۹
اردیبهشت	۹/۷۲	۲۲/۵۶	۱۵/۹۷	۰/۳۲	۲۷/۵	۶۹/۰۳	۲/۸۷	۹/۰۲
خرداد	۱۶/۲۷	۳۰/۸۳	۲۳/۱۶	۰/۰۳	۱۸/۸	۶۰/۰۴	۲/۸۴	۱۰/۷۸

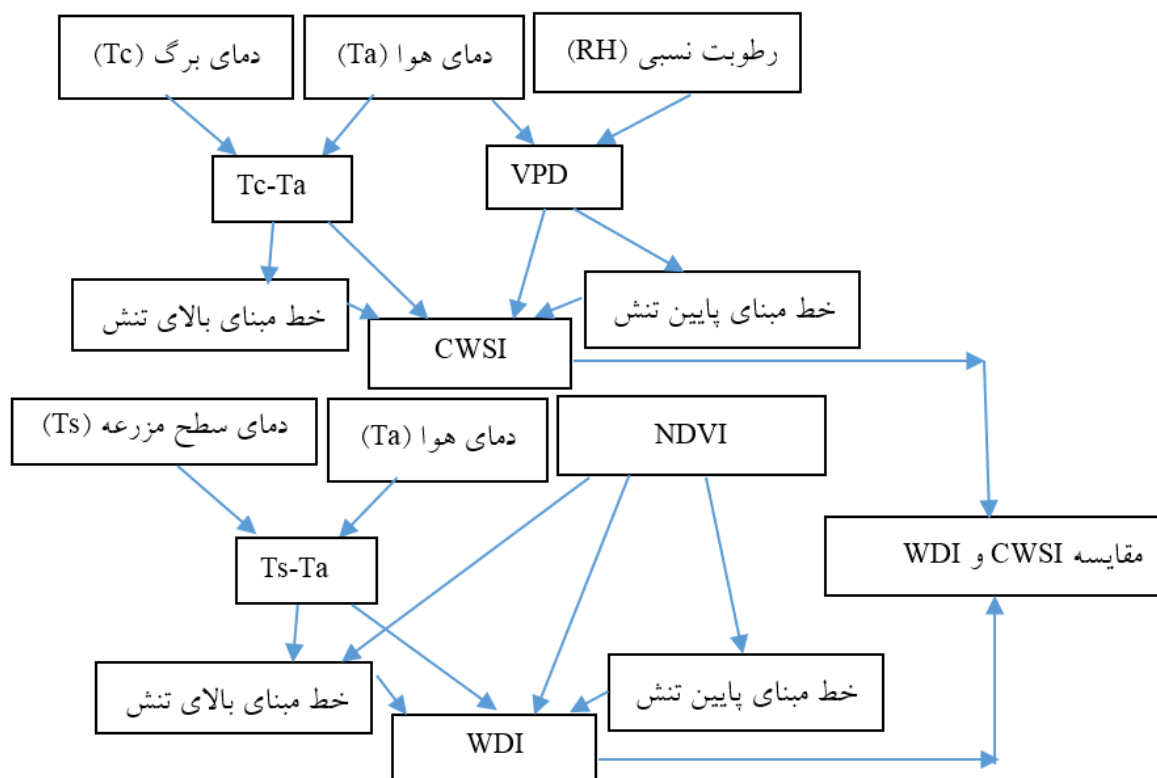
با اندازه‌گیری و محاسبه اختلاف دمای پوشش گیاه و هوا قبل از آبیاری $(T_c - T_a)_y$ ، شاخص تنش آبی گیاه در مقدار معینی از کمبود فشار بخار آب از رابطه برآورد شد (۱۲)؛

$$CWSI_i = \frac{(T_c - T_a)_y - (T_c - T_a)_{u.l.}}{(T_c - T_a)_{u.l.} - (T_c - T_a)_{l.l.}} \quad (7)$$

مقدار CWSI برای گیاه فاقد تنش برابر با صفر و برای گیاه تحت تنش شدید آبی برابر با یک است. مقدار شاخص CWSI

پوشش گیاهی و هوا به مقدار a ، عمل تعرق ادامه خواهد داشت بنابراین، زمانی تعرق به طور کامل متوقف می‌شود که مقدار $(T_c - T_a)$ بیشتر از مقدار عرض از مبدأ (a) خط مبنای پایین (معادله ۱) باشد (۱۴). با مشخص بودن ضرایب a و b مقدار AVPG در سمت راست معادله ۳، می‌توان خط مبنای بالا را به صورت معادله ساده زیر نوشت (۱۲):

$$(T_c - T_a)_{u.l.} = h \quad (6)$$



شکل ۲. شماتیک مراحل اجرای پژوهش

(YZ)، به فاصله اختلاف دمای سطح مزرعه و هوا در حد بالا و پایین تنش (XZ) و از لحاظ ریاضی به صورت $WDI = YZ / XZ$ ، مشابه CWSI نشان داده می شود (شکل ۴). چهار گوشه دوزنقه نشان دهنده (۱) پوشش گیاهی بدون تنش، (۲) پوشش گیاهی با تنش شدید. (۳) خاک لخت مرطوب و (۴) خاک لخت خشک. از این رو خطوط افقی بالا و پایین دوزنقه به ترتیب پوشش گیاهی کامل و خاک برهنه را نشان می دهد. دمای پوشش گیاهی (T_s) و شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (Normalized difference vegetation Index or NDVI) پس از دریافت و پردازش تصاویر ماهواره در قالب نقشه تهیه و برآورد شد.

NDVI به صورت تفاوت بین نوارهای نزدیک مادون قرمز (NIR) و قرمز (RED) بر مجموع آنها تعریف می شود.

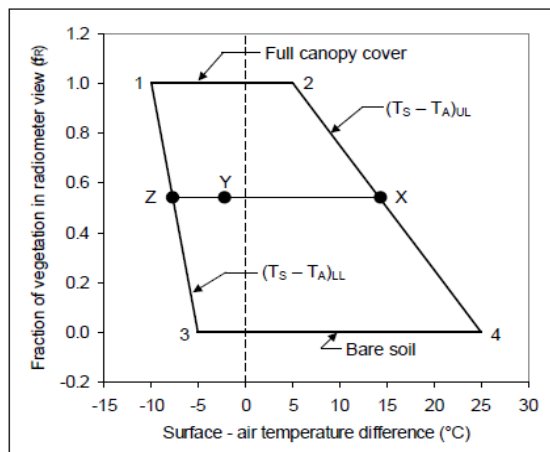
$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (8)$$

پس از استخراج اختلاف دمای پوشش سطح-هوا در شرایط

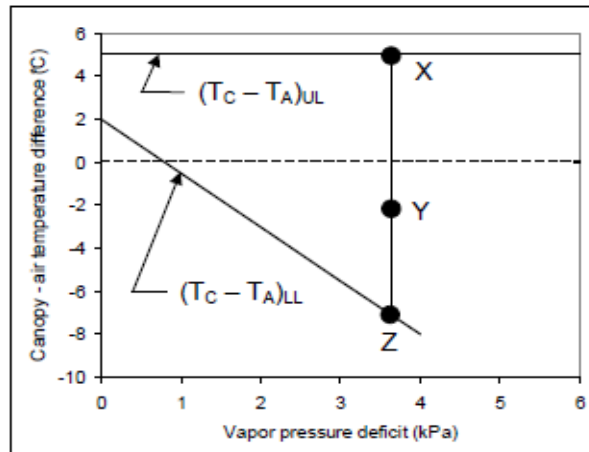
به صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است در استخراج روابط فرض بر این بود که غیر از تنش آبی، گیاه متحمل تنش محیطی دیگری نشده است. در این پژوهش از دستگاه مادون قرمز دستی برای اندازه گیری دمای پوشش سبز گیاه و از دماسنج معمولی برای ثبت دمای هوا استفاده شد. با توجه به اینکه حداکثر تنش در یکی دو ساعت بعد از ظهر شرعی اتفاق می افتد برای برآورد خط مبنای بالا اندازه گیری ها در ساعت ۱۴ الی ۱۶ انجام گرفت.

شاخص کمبود آب (WDI)

شاخص کمبود آب (WDI) بسط شاخص (CWSI) است که دمای پوشش مختلف گیاهی و دمای خاک را در بر می گیرد و به روشی مشابه تعریف می شود. WDI از لحاظ گرافیکی به صورت دوزنقه و در هر شاخص پوشش گیاهی، نسبت فاصله بین اختلاف دمای سطح مزرعه و هوا (Tc-Ta) در زمان آبیاری و حد پایین تنش



شکل ۴. نمودار دوزنقه‌ای و WDI در روش پیشنهادی موران



شکل ۳. حد بالا و پایین تنش و CWSI در نمودار ایدسو

میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error, RMSE)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) و ضریب تبیین (Coefficient of Determination, R²) برای ارزیابی استفاده شدند (روابط ۱۰ تا ۱۴).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n [W - C]}{n} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (W - C)}{n} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W - C)^2}{n}} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W - C)^2}{n}}}{\bar{W}} \quad (13)$$

$$R = \frac{\sum_i (W - \bar{W})(C - \bar{C})}{\sqrt{\sum_i (W - \bar{W})^2 (C - \bar{C})^2}} \quad (14)$$

در این روابط W و C مخفف به ترتیب WDI و CWSI است.

نتایج و بحث

خط مبنای بالا و پایین تنش و همچنین شاخص تنش آبی گیاه گندم در منطقه مورد مطالعه، برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت

تنش $(T_s - T_a)_f$ در دو قسمت از مزرعه بدون پوشش و پوشش کامل (دو رأس سمت راست دوزنقه) و اختلاف دمای پوشش سطح- هوا در شرایط بدون تنش در دو قسمت از مزرعه بدون پوشش و پوشش کامل بعد از آبیاری $(T_s - T_a)_x$ (دو رأس سمت چپ دوزنقه) و اختلاف دمای پوشش سطح- هوا قبل از آبیاری $(T_s - T_a)_m$ با استفاده از نقشه دمای پوشش گیاهی و NDVI اندازه‌گیری دمای هوا، مقدار WDI با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد (۱۵):

$$WDI = \frac{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_f]}{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_x]} \quad (9)$$

در رابطه فوق T_s دمای سطح زمین است. شاخص کمبود آب عملاً در سطح پوشیده از گیاه برابر با شاخص تنش آبی گیاه است و در این حالت دمای سطحی با دمای کانوپی برابر خواهد بود. برای شرایط سطح کاملاً پوشیده از گیاه، شاخص کمبود آب برابر با صفر و برای شرایط بیشینه تنش آبی، این شاخص برابر با یک خواهد بود. در این روش $(T_s - T_a)$ به دمای یک سطح ترکیبی اشاره دارد که ممکن است شامل درجه حرارت پوشش گیاهی و خاک باشد.

مقایسه دو شاخص

از معیارهای خطای مطلق میانگین (Mean Absolute Error, MAE)، میانگین انحراف خطا (Mean Bias Error, MBE)، جذر

پارامترهای MAE، MBE، RSME و NRMSE (جدول ۲) مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج نشان داد:

۱. همبستگی بالایی بین WDI و CWSI وجود دارد ضریب تبیین در شکل‌های ۹، ۱۱ و ۱۳ به ترتیب برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد

۲. خط مبنای بالایی در نمودار دوزنقه موران به‌ویژه در جاهایی که پوشش گیاهی کم و یا صفر است بسیار بالاتر از خط مبنای بالایی در نمودار ایدسو است که این به دلیل استخراج دمای پوشش گیاهی و خاک مزرعه توسط تصاویر ماهواره‌ای است در صورتی که در روش ایدسو فقط دمای پوشش گیاهی اندازه‌گیری می‌شد. دمای خاک خشک و آفتاب گیر می‌تواند ۳۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از پوشش گیاهی سبز و شفاف باشد. بنابراین، اگر خاک در نمای رادیومتر ظاهر شود، اندازه‌گیری‌های Tc و نتیجه CWSI بیش برآورد خواهند شد.

۳. مقادیر WDI در تمام ماه‌ها بیشتر از مقادیر CWSI بود مقدار پارامتر MAE و MBE در این ماه‌ها مؤید این موضوع است.

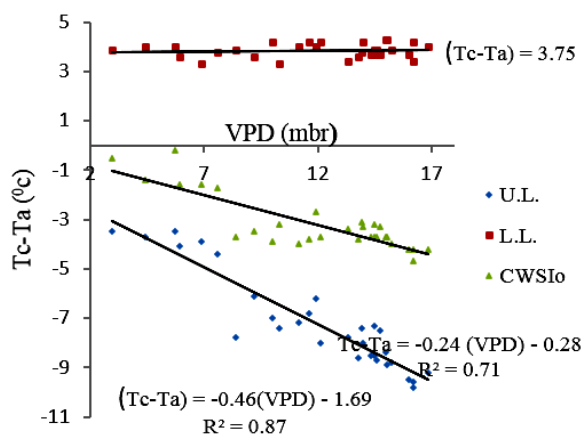
دامنه تغییرات داده‌ها در خردادماه بیشتر از سایر ماه‌ها بود که این می‌تواند به دلیل ظاهر شدن خاک مزرعه در اثر رسیدن یا نزدیک شدن گندم به مرحله رسیدن باشد که به واسطه آن برخی از برگ‌های گندم زرد و شروع به ریزش می‌کنند. مقدار پارامتر RMSE و NRMSE در جدول ۲ نشان‌دهنده این موضوع است.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

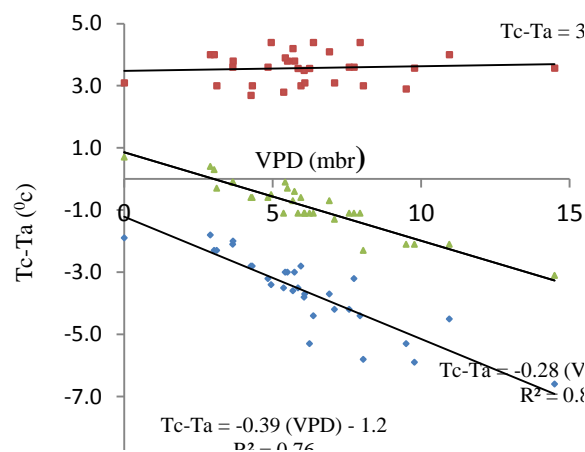
دقت شاخص CWSI در پژوهش‌های فراوانی به اثبات رسیده است اما پوشش گیاهی کامل یکی از شروط استفاده از این شاخص در برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی است (۱۵ و ۱۶). بنابراین، از این شاخص به دلیل کامل نشدن پوشش گیاهی در مراحل ابتدایی رشد نمی‌توان استفاده کرد. بر خلاف شاخص CWSI، شاخص WDI بر اساس شاخص NDVI و

و خرداد به ترتیب مطابق شکل‌های ۵، ۶ و ۷ حاصل شد. با عنایت به ضریب تبیین خط مبنای بالا در این سه ماه، مشخص شد که در شرایطی که گندم هیچ تعرقی ندارد اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا (Tc-Ta) هیچ ارتباطی با کمبود فشار بخار اشباع هوا (AVPD) ندارد. در مقابل ضریب تبیین خط مبنای پایین نشان داد که وقتی گیاه گندم هیچ محدودیت آبی ندارد، (Tc-Ta) به شدت به (AVPD) وابسته است (شکل‌های ۵، ۶ و ۷). شیب و عرض از مبدأ خطوط مبنای پایین نشان داد که با گرم‌تر شدن هوا و کاهش رطوبت نسبی، اختلاف دمای بین پوشش گیاهی و هوا بیشتر شد بنابراین، به سمت پایین شیب پیدا کرد (معادلات خط مبنای پایین در شکل‌های ۵، ۶ و ۷). از لحاظ تئوری هر چه عرض از مبدأ خطوط مبنای پایینی بیشتر و شیب آن کمتر باشد مقدار شیب فشار بخار اشباع افزایش پیدا می‌کند (رابطه ۴). بنابراین، خط مبنای بالا در فاصله دورتری از خط مبنای پایین قرار می‌گیرد. فاصله زیاد بین خطوط مبنای پایین و بالا در ماه‌های گرم سبب می‌شود که مطابق رابطه ۷ مقدار شاخص تنش آبی گندم کاهش یابد. به طوری که مقدار این شاخص در فروردین‌ماه از ۰/۳۸ به ۰/۲۹ کاهش یابد. کلیه این مطالب به وضوح در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ دیده شد.

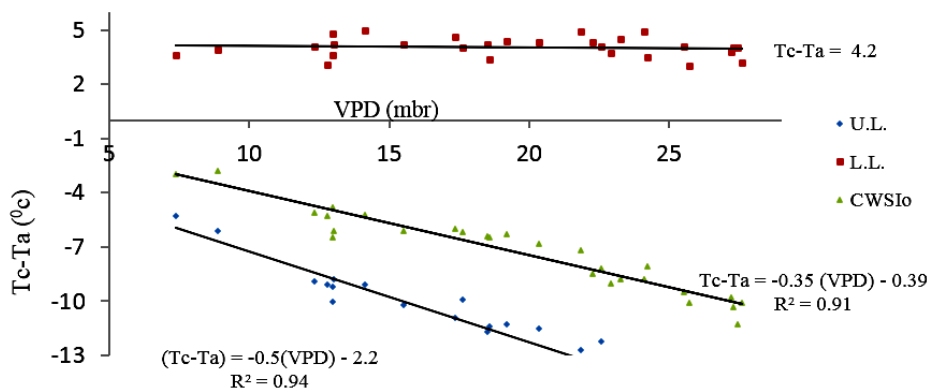
با دریافت تصاویر ماهواره‌ای و استخراج نقشه دمای پوشش گیاهی و شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال‌شده (NDVI) مزرعه، برای هر کدام از شرایط ذکر شده در چهار رأس دوزنقه پیشنهادی موران، اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا و NDVI تعیین و با برازش خط از بین این داده‌ها اضلاع بالا و پایین دوزنقه رسم و با استفاده از رابطه ۹ شاخص کمبود آب (WDI) برای گندم در مکان و زمانی مشابه برآورد CWSI، تعیین و برای هر ماه خطی از بین نقاط به دست آمده برازش داده شد که ضریب تبیین و معادله هر کدام از خطوط در شکل‌های ۸، ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده است. مقادیر WDI برآورد شده با مقادیر CWSI هم از طریق روابط رگرسیونی (شکل‌های ۹، ۱۱ و ۱۳ به ترتیب برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد) و هم توسط



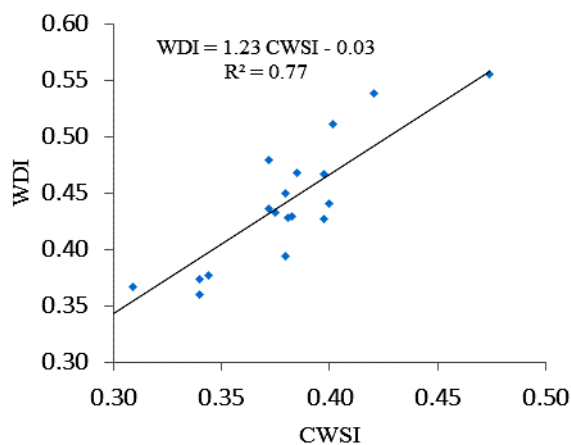
شکل ۶. حد بالا، پایین و شاخص تنش آبی گندم در اردیبهشت (رنگی در نسخه الکترونیکی)



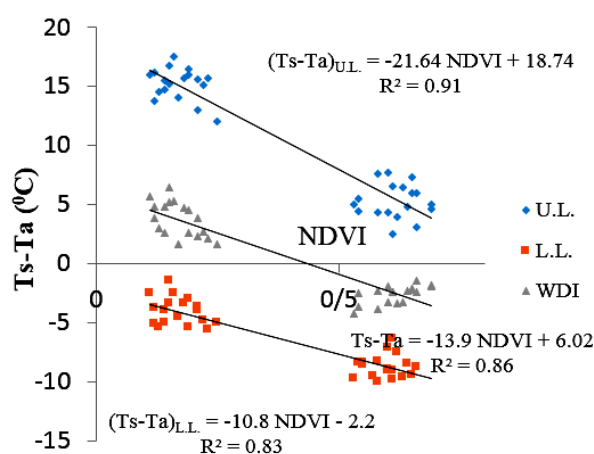
شکل ۵. حد بالا، پایین و شاخص تنش آبی گندم در ماه فروردین (رنگی در نسخه الکترونیکی)



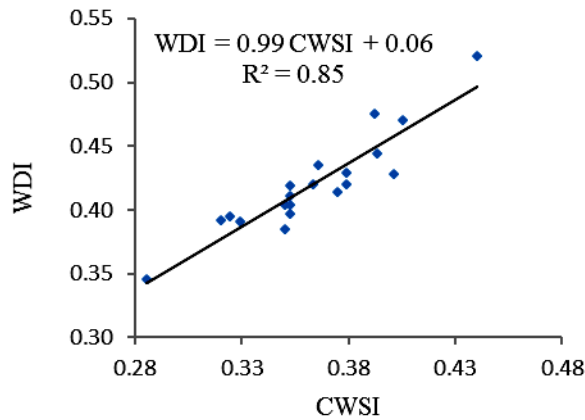
شکل ۷. حد بالا، پایین و شاخص تنش آبی گندم در ماه خرداد (رنگی در نسخه الکترونیکی)



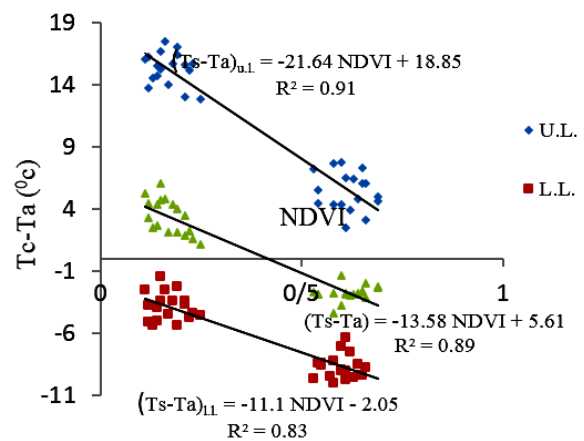
شکل ۹. رابطه رگرسیونی بین WDI و CWSI در فروردین ماه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



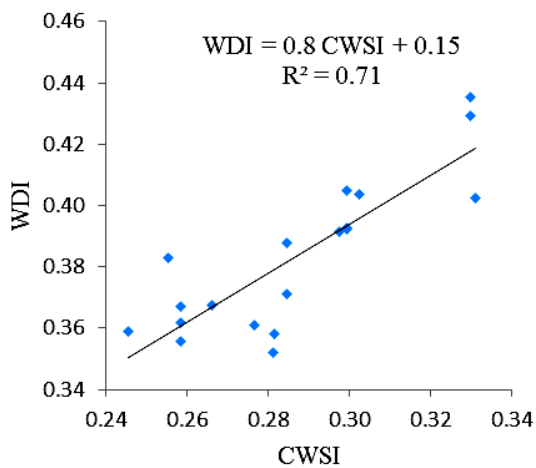
شکل ۸. حد بالا و پایین تنش WDI گندم در فروردین ماه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



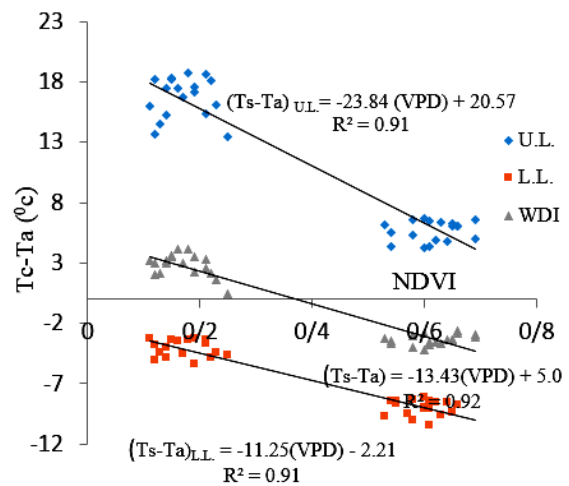
شکل ۱۱. رابطه رگرسیونی بین WDI و CWSI در اردیبهشت‌ماه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۰. حد بالا و پایین تنش و WDI گندم در اردیبهشت‌ماه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۳. رابطه رگرسیونی بین WDI و CWSI در خردادماه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۲. حد بالا و پایین تنش و WDI گندم در خردادماه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. مقادیر پارامترهای آماری در مقایسه دو شاخص WDI و CWSI

خرداد		اردیبهشت		فروردین		پارامتر آماری
WDI	CWSI	WDI	CWSI	WDI	CWSI	شاخص
0.36	0.29	0.40	0.36	0.42	0.38	میانگین شاخص
0.71		0.85		0.77		R ²
0.1		0.06		0.061		MAE
0.097		0.06		-0.06		MBE
0.10		0.06		0.07		RMSE
0.25		0.14		0.15		NRMSE

بالایی هستند، طولانی است. به عنوان مثال در این پژوهش ماهواره لندست ۸، به دلیل موقعیت خاص مزرعه و همپوشانی تصاویر، هر ۸ روز یک تصویر از مزرعه مورد نظر در اختیار قرار می‌داد (در شرایطی که این همپوشانی وجود نداشته باشد مدار چرخش این ماهواره ۱۶ روز است) و احتمال خطا هم به لحاظ فاصله زمانی بین دو تصویر متوالی و هم دقت آن وجود دارد بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای کاهش فاصله زمانی و افزایش دقت از پهپاد به جای ماهواره استفاده شود.

اختلاف دمای سطح مزرعه (نه دمای پوشش گیاهی) و دمای هوا محاسبه می‌شود، بنابراین در دامنه مختلف پوشش گیاهی (از ابتدای مرحله رشد تا انتهای مرحله رشد گیاه) قابل استفاده است و با توجه به ضریب همبستگی بالایی که بین این شاخص و شاخص CWSI وجود دارد پیشنهاد می‌شود که با توجه به مزایایی که استفاده از ماهواره در به دست آوردن این شاخص نظیر پوشش سطح وسیعی از مزرعه، از شاخص WDI برای برنامه‌ریزی آبیاری گیاه گندم استفاده شود. معمولاً مدار چرخش ماهواره‌هایی که دارای دقت مکانی

منابع مورد استفاده

1. Abdi, M., H. Sharifan, H. Jafari and Kh. Ghorbani. 2021. Determining the water stress index of wheat in Karaj for use in irrigation planning. *Water and Soil Sciences* 26(2): 223-233 (In Farsi).
2. Ahmadi, H., A. Nasralahi, M. Sharifipour and H. Isvand. 2018. Determining the soybean water stress index (CWSI) for irrigation management for maximum yield and water efficiency. *Irrigation and Water Engineering* 8(32): 43-56. (In Farsi).
3. Al-Solaimani, S.G., F. Alghabari, M. Z. Ihsan and S. Fahad. 2017. Water deficit irrigation and nitrogen response of Sudan grass under arid land drip irrigation conditions. *Irrigation and Drainage* 66(3): 365-376.
4. 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.
5. Bozkurt Çolak, Y., A. Yazar, A. Alghory and S. Tekin 2021. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science* 39: 81-100.
6. Fensholt, R. and S. R. Proud. 2012. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment* 119: 131-147.
7. Fensholt, R., I. Sandholt, S. R. Proud, S. Stisen and M. O. Rasmussen. 2010. Assessment of MODIS sun-sensor geometry variations effect on observed NDVI using MSG SEVIRI geostationary data. *International Journal of Remote Sensing* 31(23): 6163-6187.
8. Galleguillos, M., F. Jacob, L. Prévot, A. French and P. Lagacherie. 2011. comparison of two temperature differencing methods to estimate daily evapotranspiration over a Mediterranean Vineyard watershed from ASTER Data. *Remote Sensing Environment* 115: 1326-1340.
9. Gao, Y., J. P. Walker, M. Allahmoradi, A. Monerris, D. Ryu and T.J. Jackson. 2015. Optical Sensing of Vegetation Water Content: A Synthesis Study. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8: 1456-1464.
10. Ghorbani, M., S. Broumandnesb, A. Soltani Mohammadi and S. Minai. 2015. Irrigation planning of summer corn under two types of surface and rain irrigation using CWSI index in the climatic conditions of Ahvaz. *Irrigation Science and Engineering* 4(38). 1-9 (In Farsi).
11. Girolimetto, D. and V. Venturini. 2013. Water Stress Estimation from NDVI-Ts Plot and the Wet Environment Evapotranspiration. *Advances in Remote Sensing* 2: 283-291.
12. Hoffmann, H., H. Nieto, R. Jensen, R. Guzinski, P. Zarco-Tejada and T. Friborg. 2016. Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models. *Hydrology and Earth System Sciences* 20: 697-713.
13. 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.
14. Jackson, R.D., S.B. Idso, R. J Reginato and J. R. Pinter. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17(4): 1133-1138.
15. Jolivot A., S. Labbé and V. Lebou rgeois 2012. Contribution of remote sensing in analysis of crop water stress. Case study on durum wheat. *Options Méditerranéenne* 67: 209- 216.

16. Judy, F. 2009. The use of underarm thermometers in sunflower irrigation planning in Khuzestan. Master's thesis. Irrigation and drainage field. Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran (In Farsi).
17. Moran M. S., T. R. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49: 246-263.
18. Mubasheri, M., J. Jokar and P. Ziaian. 2007. Detection of sugarcane plant water stress with Terra satellite images. *In: Geomatics conference*. 11 p. (In Farsi).
19. O'Shaughnessy, S. A., S. R., Evett, P. D. Colaizzi and T. A. Howell. 2010. Automatic irrigation scheduling of grain sorghum using a CWSI and time threshold. *In: Decennial Irrigation Association Conference*, Michigan, USA.
20. Paltineanu, C., E. Chitu and N. Tanasescu. 2009. Correlation between the crop water stress index and soil moisture content for apple in a loamy soil: A case study in southern Romania. *In: VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops*, Santiago, Chile 889: 257-264.
21. 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.
22. 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.
23. Tanriverdi, C., A. Atilgan, H. Degirmenci and A. Akyuz. 2017. Comparison of crop water stress index (CWSI) and water deficit index (WDI) by using remote sensing (RS). *Infrastructure and Ecology of Rural Areas* 879-894.
24. Virlet, N., S. Martnez, V. Lebourgeois, E. Costes, S. Labbe and J.L. Regnard 2012. Contribution of airborne remote sensing to high-throughput phenotyping of a hybrid apple population in response to soil water constraints. *In: 2nd International Plant Phenotyping Symposium*, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany.
25. Wang, W., D. Huang, X. G. Wang, Y. R. Liu and F. Zhou. 2011. estimation of soil moisture using trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index. *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 1699-1712.
26. Wanjura, D. F., D. R. Upchurch, and J. R. Mahan. 1992. Automated irrigation based on threshold canopy temperature. *Transactions of ASAE* 35.5:1411-1417.
27. 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.

Comparison of Plant Water Stress Index (CWSI) and Water Deficit Index (WDI) in Wheat Using Remote Sensing (RS)

H. Jafari^{1*}

(Received: July 15-2022 ; Accepted: January 11-2023)

Abstract

The ability of remote sensing (RS) in irrigation scheduling has been accepted in the world due to the collection of data on a large scale and the determination of water stress indicators with greater speed and less cost. Crop Water Stress Index (CWSI) and Water Deficit Index (WDI) are components of the most recognized water stress indices. Despite the accuracy and precision of the CWSI index that has been proven in plant irrigation scheduling, the lack of complete density of vegetation, especially in the early stages of growth, is one of the most important defects of using this method in crop irrigation scheduling. While estimating the water deficit index using remote sensing technology does not have these limitations. An experiment was performed in the crop year 98-99 in the city of Karaj to check the accuracy of this index. The amount of WDI and CWSI in a wheat field with optimized irrigation management was determined and compared and evaluated using statistical parameters. The results showed that the coefficient of explanation between these two indicators in the months of April, May, and June is 0.77, 0.85, and 0.71, respectively.

Keywords: Vegetation temperature, Normalized difference vegetation index (NDVI), Saturation vapor pressure deficit

1. Soil and Water Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Karaj, Iran.

*: Corresponding author, Email: jafari52_h@yahoo.com