

سنجش‌ازدور، اندازه‌گیری دمای پوشش گیاه از این طریق برای تشخیص مقدار کمبود نیاز آبی محصول، کاربردهای امیدوارکننده‌تری نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر دارد (Bellvert et al., 2015, Osroosh et al., 2016). بر اساس این تکنیک پارامتری با عنوان شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای اولین بار و به‌طور هم‌زمان توسط ایدسو و همکاران (Idso et al., 1981) و جکسون و همکاران (Jackson et al., 1981) معرفی شد. این شاخص که مبتنی بر دمای پوشش گیاهی است، روشی کاربردی برای کمی‌کردن وضعیت آب در جهت اطلاع از برنامه‌ریزی آبیاری است (King et al., 2021) که از ترسیم اختلاف دمای پوشش گیاهی و دمای هوای مجاور در مقابل کمبود فشار بخار اشباع هوا به‌دست می‌آید. شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای پایش وضعیت رطوبتی گیاه، تشخیص زمان شروع تنش آبی، پیش‌بینی عملکرد محصول و برنامه‌ریزی آبیاری برای محصولات مختلف استفاده شده است (Akkuzu et al., 2015; Bellvert et al., 2015, Kumar et al., 2019, Yildirim et al., 2013). این شاخص بیشتر برای استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسعه یافت و در مناطق مرطوب به دلیل بالا بودن دمای پوشش سبز از دمای هوا، کارایی کمتری دارد (Keener and Kircher, 1983). دامنه تغییرات CWSI بین صفر و یک است. صفر بدین معنی است که گیاه با تنش آبی مواجه نبوده و ایده‌آل‌ترین شرایط را از لحاظ انجام فرآیند تعرق دارد، ولی عدد یک گویای حداکثر تنش آبی واردشده بر گیاه و توقف کامل تعرق است. در این راستا دو مدل شناخته‌شده برای محاسبه شاخص تنش آبی گیاه وجود دارد؛ مدل تجربی ایدسو و مدل نظری جکسون (Idso et al., 1981, Jackson et al., 1981).

محاسبه شاخص تنش آبی گیاه CWSI بر اساس مدل جکسون به متغیرهای محیطی بیشتری نسبت به مدل تجربی ایدسو نیاز دارد. در مقایسه با روش نظری، روش تجربی آسان‌تر است، زیرا به دمای تاج پوشش (Tc)، دمای هوا (Ta) و رطوبت نسبی (RH) نیاز دارد و هر سه پارامتر تأثیر زیادی بر آب آبیاری گیاه دارند. در سال‌های اخیر استفاده از شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) مورد توجه بسیاری از محققین داخلی و خارجی برای

آبیاری با صرفه‌جویی در مصرف آب، راهی برای تضمین امنیت مواد غذایی جهان است (Ward and Pulido-Velazquez, 2008; Shammout et al., 2018). کم‌آبیاری همچنین می‌تواند باعث بهبود صفات مورفولوژیکی شود، به‌عنوان مثال می‌تواند موجب افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی و بهبود جذب و بازیابی مواد مغذی گیاه گردد. از جمله راهکارهای مختلف معرفی شده، استفاده از روش‌های کم‌آبیاری تنظیم‌شده (Regulated deficit irrigation, RDI) و خشکی موضعی ریشه (Partial root-zone drying, PRD) است که سبب کاهش حجم آب آبیاری و افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در بخش کشاورزی می‌گردد (Khaleghi et al., 2020; Hamidi Ahmadabad et al., 2019; Elhani et al., 2021).

در این میان استفاده از روش‌های مؤثر برای پایش وضعیت تنش آبی گیاه برای درک بهتر و صرفه‌جویی در مصرف آب ضروری است (Geerts and Raes, 2009; Han et al., 2018b). از این‌رو، به‌دست آوردن اطلاعات دقیق در مورد وضعیت تنش آبی محصول برای اجرای موفقیت‌آمیز کم‌آبیاری، حیاتی است. روش‌های پایش تنش آبی گیاه به اندازه‌گیری رطوبت خاک، میزان فتوسنتز و ویژگی‌های محصول (به‌عنوان مثال ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ) وابسته است (Ben-Gal et al., 2009). اغلب این روش‌ها زمان‌بر، پرحمت و در برخی موارد همراه با نمونه برداری از گیاهان و تخریب آن‌ها می‌باشند. از آنجایی که این اندازه‌گیری‌ها اغلب به بخش کوچکی از مزرعه محدود می‌شوند، نتایج ممکن است معرف نیاز واقعی آب محصول یا شرایط کلی رطوبت مزرعه نباشد (Ihuoma and Madramootoo, 2017). فوکس و تانر برای اولین بار امکان استفاده از دمای پوشش سبز را به‌عنوان معرف تنش آب در گیاه پیشنهاد نمودند (Fuchs and Tanner, 1966) و سپس هیلر و کلارک اختلاف دمای پوشش سبز و هوای مجاور گیاه را جهت مطالعه تنش آب در گیاه توصیه کردند (Hiler and Clark, 1971). دمای پوشش گیاه (Tc) مدت هاست به‌عنوان شاخصی برای تعیین وضعیت آبی گیاه شناخته شده است (DeJonge et al., 2015, Han et al., 2018b, Jackson et al., 2016). با توسعه فناوری

طرح حاضر در دو فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در سایت پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان با مشخصات مکانی عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه و ۲۲ متر ارتفاع از سطح دریا، اجرا شد. این مزرعه تحقیقاتی در یک منطقه گرم و خشک با میانگین بارش سالانه ۲۳۰ میلی‌متر (حدود ۸۵ درصد آن در ماه‌های آبان تا اسفند)، میانگین تبخیر و تعرق سالانه بالای ۲۴۰۰ میلی‌متر و میانگین مدت تابش آفتاب سالانه بیش از ۳۰۰۰ ساعت قرار دارد. برخی از اطلاعات هواشناسی منطقه در طول مدت اجرای طرح از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان که نزدیکترین ایستگاه به محل انجام طرح بود، در جدول (۱) ارائه شده است.

برنامه‌ریزی آبیاری درختان و گیاهان زراعی، از جمله پسته (Seyfi et al., 2017)، آفتابگردان (Nouraki et al., 2017)، ذرت (Saedinia et al., 2015) و فلفل قرمز (Sezen et al., 2014) قرار گرفت. با در نظر گرفتن جنبه‌های فوق‌الذکر، اهداف این مطالعه در ابتدا محاسبه شاخص CWSI و تعیین آستانه تنش رطوبتی برای گیاه گلرنگ و برآورد میزان تنش آبی محصول تحت مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری است. همچنین شناسایی مناسب‌ترین مدیریت آبیاری برای گلرنگ از طریق ارتباط بین شاخص تنش آبی گیاه با مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری جهت دستیابی به عملکرد مطلوب در شرایط اقلیمی خوزستان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات آب و هوایی منطقه طرح آزمایشی

سال	پارامتر	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد
۱۳۹۹-۱۴۰۰	میانگین دمای حداکثر (°C)	۱۹/۸۷	۲۱/۷۰	۲۵/۱۴	۲۸/۴۸	۳۸/۴۶	۴۳/۰۳	۴۸/۹۶
	میانگین دمای حداقل (°C)	۹/۴۵	۷/۲۲	۱۱/۹۶	۱۴/۰۹	۲۰/۱۶	۲۵/۴۸	۳۰/۵۶
	میانگین رطوبت نسبی (%)	۷۲/۸۳	۶۱/۱۹	۵۹/۴۴	۵۵/۱۷	۶۳/۵۵	۶۱/۵۰	۶۳/۵۵
	بارندگی (mm)	۵۵/۷	۱/۲	۲۷/۱۰	۵/۵	.	.	.
۱۴۰۰-۱۴۰۱	میانگین سرعت باد ($m.s^{-1}$)	۳۶/۱۱	۴۱/۲۱	۴۲/۳۳	۵۴/۰۳	۵۸/۷۷	۶۲/۵۰	۷۲/۲۲
	میانگین ساعات آفتابی ($hr.d^{-1}$)	۵/۵۹	۵/۵۴	۷/۲۹	۶/۷۵	۷/۹۷	۹/۰۵	۱۱/۰۳
	میانگین دمای حداکثر (°C)	۲۲/۲۹	۱۸/۷۷	۲۵/۵۷	۲۶/۸۴	۳۷/۲۳	۳۹/۴۸	۴۵/۸۶
	میانگین دمای حداقل (°C)	۱۰/۶۴	۷/۰۹	۱۱/۲۵	۱۳/۰۱	۲۰/۱۴	۲۳/۵۸	۲۸/۵۲
۱۴۰۰-۱۴۰۱	میانگین رطوبت نسبی (%)	۶۳/۵۶	۶۵/۶۷	۵۹/۳۶	۳۶/۳۱	۲۸/۰۲	۲۳/۴۲	۲۲/۲۵
	بارندگی (mm)	۶۴/۱	۲۰/۸	۱۳/۶	۱/۷	۴/۲	.	.
	میانگین سرعت باد ($m.s^{-1}$)	۳۹/۴۲	۴۶/۱۲	۴۳/۴۱	۵۸/۲۱	۶۲/۶۳	۶۷/۸۹	۷۵/۰۹
	میانگین ساعات آفتابی ($hr.d^{-1}$)	۵/۵۵	۵/۵۴	۷/۳۳	۶/۷۶	۸/۱۲	۹/۱۱	۱۰/۷۸

در این تحقیق برای دو فصل زراعی از بذر گلرنگ رقم گلدشت که دارای پتانسیل عملکرد بالا، زودرس و مقاوم به تنش آبی است، استفاده شد. برای تعیین مشخصات خاک محل آزمایش، پیش از آماده‌سازی زمین و قبل از کاشت، نمونه‌های خاک با استفاده از آگر در فواصل عمقی ۳۰ سانتی‌متری تا عمق ۹۰ سانتی‌متری از سه نقطه مزرعه تهیه شد که خصوصیات آن در جدول (۲) ارائه شده است. کشت بذر در دو فصل زراعی در تاریخ‌های

۱۳۹۹/۹/۲۷ و ۱۴۰۰/۹/۲۷ به صورت دستی روی داغ آب پشته‌ها با فاصله ۱۰ سانتی‌متر (تراکم ۱۶ بوته در مترمربع) و در عمق ۳-۴ سانتی‌متر در یک خاک سیلتی-رسی انجام شد. در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی محصول در اوایل خردادماه، تعداد ۱۶ بوته (مساحت یک مترمربع) از دو ردیف میانی به صورت تصادفی جهت اندازه‌گیری برداشت گردید.

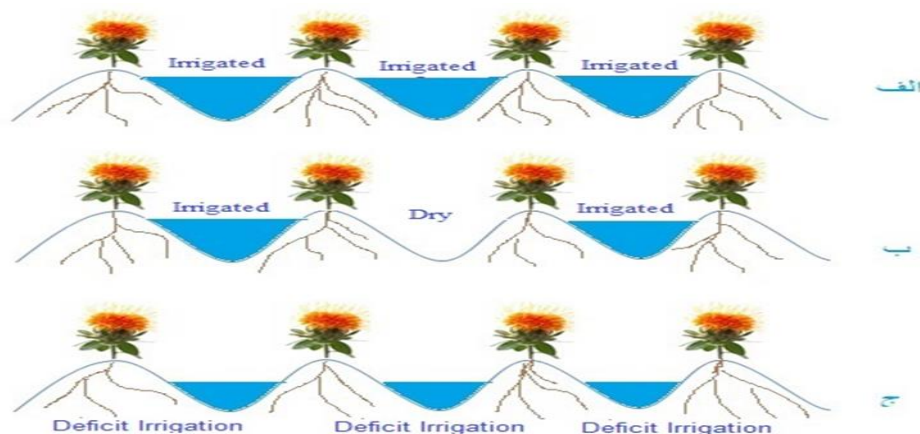
جدول ۲- نتایج تجزیه برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

عمق خاک (cm)			واحد	پارامتر
۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰		
۴۴	۴۴	۴۲	%	رس (Clay)
۳۹	۴۰	۴۱	%	سیلت (Silt)
۱۷	۱۶	۱۷	%	شن (Sand)
۲/۱۱	۲/۲۴	۲/۴۴	mm/hr	هدایت هیدرولیکی (Ks)
۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۶	g/cm ³	چگالی ظاهری (BD)
۰/۲۷۱	۰/۲۷۳	۰/۲۷۲	g/g	ظفت : ا.ع. (F.C)
۰/۱۳۴	۰/۱۳۴	۰/۱۳۱	g/g	نقطه پژمردگی (P.W.P)
۱/۸	۱/۸	۲/۶	ds/m	هدایت الکتریکی (EC)
۷/۷۱	۷/۳۶	۷/۶۵	-	pH

تأمین ۶۰ درصد کمبود رطوبت خاک، PRD80 کم آبیاری به صورت خشکی موضعی ریشه با تأمین ۸۰ درصد کمبود رطوبت خاک و PRD60 کم آبیاری به صورت خشکی موضعی ریشه با تأمین ۶۰ درصد کمبود رطوبت خاک می‌باشند. همان‌طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، در روش خشکی موضعی ریشه، بخشی از ریشه آبیاری و بخشی دیگر خشک می‌ماند. نیمه ریشه‌ای که آبیاری می‌شود، بیشتر وظیفه رساندن رطوبت به گیاه را دارد، درحالی‌که نیمه‌ی دیگر ریشه که تنش خشکی متوسطی را تجربه می‌کند، سیگنال‌های شیمیایی تولید کرده که باعث کاهش تعرق گیاه می‌شود.

طرح آزمایشی

طرح آزمایشی به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار در قالب چهار تکرار اجرا شد. هر کرت آزمایشی شامل پنج ردیف جویچه انتها بسته دوزنقه‌ای شکل به طول ۱۰ متر با عرض بالای ۶۰ سانتی‌متر، عرض پایین ۲۰ سانتی‌متر و عمق ۳۰ سانتی‌متر در جهت شرق به غرب (در راستای شیب زمین) احداث شد. تیمارهای آزمایشی شامل: CI آبیاری معمولی با تأمین ۱۰۰ درصد کمبود رطوبت خاک، RDI80 کم آبیاری تنظیم شده با تأمین ۸۰ درصد کمبود رطوبت خاک، RDI60 کم آبیاری تنظیم شده با



شکل ۱- نمای شماتیک از نحوه اعمال تیمارهای کم آبیاری الف: آبیاری معمولی (CI)، ب: کم آبیاری به روش خشکی موضعی ریشه (PRD)، ج: کم آبیاری تنظیم شده (RDI)

روش آبیاری

الی ۱۴ بعدازظهر برای هر تیمار ثبت و شاخص تنش آبی گیاه به روش ایدسو مطابق معادله (۲) تعیین شد (Idso et al, 1981).

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{l,l}}{(T_c - T_a)_{u,l} - (T_c - T_a)_{l,l}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، $(T_c - T_a)_m$ اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوای مجاور در روز موردنظر برای اندازه‌گیری میزان شاخص تنش، $(T_c - T_a)_{l,l}$ معرف خط مبنای پایین شاخص برحسب درجه سانتی‌گراد و برابر اختلاف دمای پوشش سبز گیاه (T_c) با هوا مجاور (T_a) در شرایط بدون تنش است. این خط نشان دهنده مکان هندسی نقاطی است که در آن میزان تبخیر و تعرق حداکثر بوده و محصول از نظر مصرف آب با هیچ محدودیتی روبرو نباشد. $(T_c - T_a)_{u,l}$ معرف خط مبنای بالا است که برابر اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاه و هوای مجاور در شرایط تنش کامل است. برای محاسبه خط مبنای پایین در یک روز بعد از آبیاری و در شرایطی که هوا صاف و آفتابی بود (Sezen et al., 2014; Seyfi et al., 2017)، اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه انجام شد. برای این کار از دستگاه دماسنج مادون قرمز مدل لوترون TM-958 ساخت کشور ویتنام استفاده شد. برای دقت بیشتر، اندازه‌گیری دمای گیاه از چهار جهت جغرافیایی و به فاصله هر یک ساعت از هر چهار تکرار تیمار شاهد صورت گرفت. با داشتن اطلاعات دمای هوا، دمای پوشش سبز و کمبود فشار بخار اشباع، خط مبنای پایین از معادله (۳) بدست آمد (Idso et al, 1981).

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

$$VPD = e_s(T_a) - e_a \quad (4)$$

$$e_s(T_a) = (0.6108 \times \exp(\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3})) \times \frac{1000}{101} \quad (5)$$

$$e_a = e_s(T_a) \times \frac{RH}{100} \quad (6)$$

در معادلات (۳) تا (۶): a عرض از مبدأ، b شیب خط، VPD کمبود فشار بخار هوا برحسب میلی‌بار، $e_s(T_a)$ فشار بخار اشباع در دمای هوا (T_a) برحسب میلی‌بار، e_a فشار بخار واقعی هوا

آب موردنیاز جهت آبیاری مزرعه تحقیقاتی از رودخانه کارون تأمین شد. میزان متوسط املاح آب آبیاری در طول دو فصل زراعی اندازه‌گیری و بر اساس طبقه‌بندی از نظر زیان شور و سدیمی در کلاس C3S1 قرار گرفت. با پایش وضعیت رطوبت خاک، نیاز آبی گیاه برای تیمارهای مختلف تعیین شد. به‌این‌ترتیب که ابتدا قبل از هر آبیاری میزان رطوبت خاک در عمق‌های ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متر با روش نمونه‌گیری وزنی اندازه‌گیری و مقدار آب خالص موردنیاز برای پرکردن ناحیه ریشه تا حد ظرفیت مزرعه از طریق معادله (۱) محاسبه شد (Sarker et al., 2019).

مقدار آب آبیاری در نظر گرفته‌شده برای آبیاری معمولی (CI) و کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) به‌طور مساوی در بین جوی‌ها تقسیم گردید. اما در روش کم‌آبیاری به‌صورت خشکی موضعی ریشه (PRD) جوی‌ها به‌صورت یکی در میان و ثابت آبیاری شد.

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{FC_i - MC_i}{100} \times B_i \times D_i \quad (1)$$

در معادله (۱)، I عمق خالص آب آبیاری (mm)؛ B_i چگالی ظاهری خاک (g/cm^3)؛ D_i عمق توسعه ریشه در لایه i خاک (m)؛ FC_i درصد وزنی رطوبت خاک در حد ظرفیت مزرعه در هر لایه، MC_i درصد وزنی رطوبت خاک در هر لایه قبل از هر آبیاری و n تعداد لایه‌های نیم‌رخ خاک در ناحیه ریشه است.

محاسبه شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)

از آنجاکه گیاه در هنگام تعرق حداکثری نسبت به تنش‌های محیطی و پارامترهای هواشناسی واکنش خاصی نشان می‌دهد، لذا ضروری است موقعیت این خطوط برای محصولات مختلف طی دوره رشد و بر اساس اقلیم‌های مختلف، نوع سیستم آبیاری و شرایط مدیریتی تعیین شود، تا بتوان برنامه‌ریزی آبیاری دقیق‌تری ارائه نمود. در این تحقیق به‌منظور اندازه‌گیری شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)، دمای پوشش سبز در روزهای قبل از آبیاری به همراه قرائت دماسنج‌های تر و خشک در فاصله زمانی ساعت ۱۱

سایر تیمارها عملکرد بالاتری نشان داد. میانگین عملکرد دانه در تیمارهای خشکی موضعی ریشه PRD80 و PRD60 به ترتیب ۲۵۷۷/۶ و ۲۲۸۰/۳ کیلوگرم در هکتار و همچنین برای تیمارهای کم آبیاری تنظیم شده RDI80 و RDI60 به ترتیب ۳۴۰۹/۳ و ۱۶۷۱/۴ کیلوگرم در هکتار بدست آمد. در واقع تیمارهای RDI80 و PRD80 با دریافت ۱۸/۲۶ درصد آب کمتر نسبت به آبیاری معمولی CI (در کل دوره رشد)، به ترتیب ۱۲/۷۴ و ۳۴/۰۳ درصد کاهش عملکرد محصول و همچنین تیمارهای RDI60 و PRD60 با ۳۶/۴۹ درصد دریافت آب کمتر در کل دوره رشد، به ترتیب ۵۷/۲۲ و ۴۱/۴۶ درصد کاهش عملکرد نشان دادند. اکثر محققان (Abd El-Lattief, 2013; Janmohammadi et al., 2017; Shahrokhnia and Sepaskhah, 2017; Ebrahimi et al., 2019). نتایج مشابهی را در مورد کاهش عملکرد دانه سایر گیاهان زراعی در شرایط تنش کم آبی گزارش کردند. بیشترین و کمترین مقدار شاخص بهره‌وری آب آبیاری بر اساس عملکرد دانه WPsy(Ir+P) به ترتیب مربوط به تیمار کم آبیاری تنظیم شده RDI80 (۰/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب) و RDI60 (۰/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بدست آمد. در آزمایشی بر روی گلرنگ بیشترین و کمترین مقدار بهره‌وری مصرف آب عملکرد دانه را برای تیمارهای مختلف کم آبیاری به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد (Abd El-Lattief, 2013).

برحسب میلی‌بار و RH درصد رطوبت نسبی است. معادله خط مبنای بالا نیز بر اساس روش ایدسو بر اساس معادله (۷) و با داشتن ضرایب a و b از معادله خط مبنای پایین، بدست آمد (Idso et al, 1981).

$$(Tc - Ta)u.l = h \quad (7)$$

$$(Tc - Ta)u.l = a + b|VPG| \quad (8)$$

$$VPG = es(a + Ta) - es(Ta) \quad (9)$$

در معادلات (۸) و (۹)، VPG شیب فشار بخار هوا و برحسب میلی‌بار است. به عبارت دیگر در این شرایط، عمل تعرق، بدون وابستگی به مقدار کمبود فشار بخار هوا قطع می‌شود.

نتایج و بحث

در جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری گیاه گلرنگ نشان می‌دهد، هیچ کدام از صفات اندازه گیری شده، اثر معنی‌داری از تغییرات سال و همچنین اثر متقابل سال- تیمار ندارند. مقدار عمق کل آب آبیاری، مقایسه میانگین عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری گلرنگ تحت تأثیر تیمارهای مختلف کم آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است. نتایج نشان داد، تیمار آبیاری معمولی CI با ۳۹۰۷/۵ کیلوگرم در هکتار نسبت به

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد دانه و بهره‌وری آب آبیاری گیاه گلرنگ

میانگین مربعات (MS)		درجه آزادی	منابع تغییر
عملکرد دانه	بهره‌وری آب آبیاری		
۲۷۳۵۱/۳۳ns	۰/۰۴۹۷ ns	۱	سال
۱۱۸۰۱۳/۹۵ns	۰/۰۰۳۶ns	۶	تکرار (سال)
۶۳۷۲۶۰۵/۵۵***	۰/۰۸۶۳***	۴	تیمار
۱۶۰۷۰۲/۱۱ns	۰/۰۰۴۶ns	۴	سال*تیمار
۱۶۲۷۳۵/۴	۰/۰۰۵	۲۴	خطا
۱۴/۵۶	۱۳/۳	C.V	ضریب تغییرات (درصد)

ns، * و *** به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح پنج و یک درصد

جدول ۴- مجموع عمق آبیاری، مقایسه میانگین عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری گیاه گلرنگ

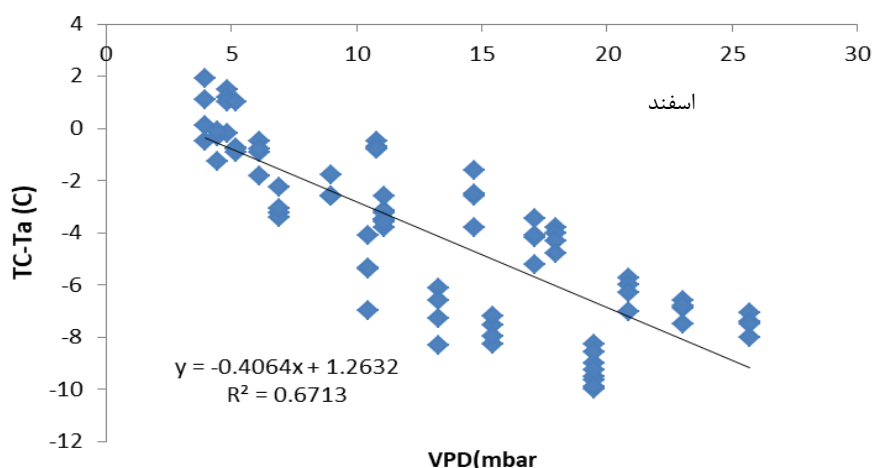
تیمار	میزان آبیاری (m ³ /ha)		عملکرد دانه (Kg/ha)		بهره‌وری آب آبیاری (Kg/m ³)	
	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم	سال اول	سال دوم
CI	۶۰۲۲/۱	۴۸۰۰/۵	۳۹۴۴/۶a	۳۸۷۰/۴a	۰/۶۶a	۰/۶۱a
RDI80	۴۹۶۱/۷	۳۹۰۶/۰	۳۶۵۹/۸b	۳۱۵۸/۹b	۰/۶۳a	۰/۶۴a
RDI60	۴۲۴۱/۷	۳۵۷۸/۲	۱۶۴۲/۷d	۱۷۰۰/۱d	۰/۴۱c	۰/۳۵c
PRD80	۳۹۰۱/۲	۳۰۱۱/۵	۲۵۸۶/۵c	۲۵۶۸/۷c	۰/۵۲b	۰/۴۵b
PRD60	۳۱۸۱/۳	۲۶۸۳/۶	۲۱۴۳/۲c	۲۴۱۷/۳c	۰/۵۹b	۰/۴۶b

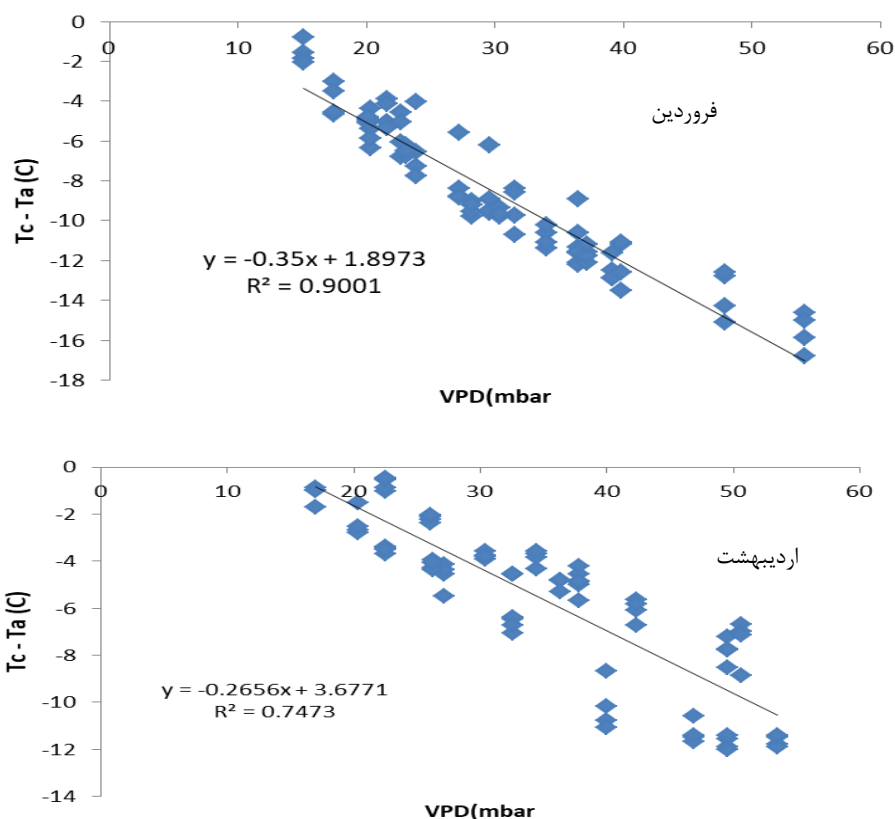
میانگین‌های با حروف مشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌دار ندارند

محاسبه خطوط مبنای پایین و بالا به روش ایدسو

در این بخش بر اساس داده‌های مزرعه‌ای و هواشناسی محل، ابتدا معادلات خطوط مبنای پایین و بالا برای گیاه گلرنگ تعیین و مبنای محاسبه شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) قرار گرفت. براساس فرضیات ایدسو خط مربوط به تنش حداکثری را می‌توان به‌عنوان خط مبنای بالا و خط مربوط به تیمار شاهد (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) را می‌توان به‌عنوان خط مبنای پایین در نظر گرفت (Idso et al., 1981). پس از تعیین مقادیر اختلاف دمایی پوشش سبز گیاه و هوای مجاور (Tc-Ta) در شرایط بدون تنش رطوبتی (تعرق کامل گیاه) و محاسبه مقادیر VPD، معادله خط مبنای پایین با رگرسیون خطی بین این دو پارامتر حاصل شد

و عرض از مبدأ و شیب معادله مشخص گردید. شکل (۲)، نمودار پراکندگی اختلاف دمایی پوشش سبز گیاه و هوا در مقابل کمبود فشار بخار هوا را برای ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۰-۱۴۰۱ نشان می‌دهد. این نمودارها وجود یک معادله رگرسیونی خطی بین اختلاف دمایی پوشش سبز و هوا و کمبود فشار بخار هوا را نشان می‌دهند که با افزایش مقدار کمبود فشار بخار هوا (VPD)، اختلاف دمایی پوشش سبز گیاه و هوای مجاور (Tc - Ta) نیز افزایش (از نظر قدرمطلق) می‌یابد. افزایش کمبود فشار بخار هوا موجب افزایش تبخیر و تعرق شده و اگر نیاز آبی محصول تأمین گردد، گیاه خنک می‌شود (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۴).





شکل ۲- نمودارهای خطوط مبنای پایین در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت سال ۱۴۰۱

جذب آب و میزان تعرق گیاه در طول دوره رشد می‌باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). همان‌گونه در جدول (۵) ملاحظه می‌شود، معادلات خطوط مبنای پایین و بالا با ضریب تبیین (R^2) بالایی برای ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت به‌دست آمد.

ارزیابی معادلات خطوط مبنای پایین برای ماه‌های مختلف نشان می‌دهد که ضرایب a (عرض از مبدأ) و b (شیب خط) دارای مقادیر متفاوتی هستند و شیب خط برای هر سه ماه منفی به‌دست آمد. مقادیر متفاوت این ضرایب نشان‌دهنده اختلاف در پتانسیل

جدول ۵- معادلات مربوط به خط مبنای پایین و بالا گیاه گلرنگ

R^2	معادله خط مبنای بالای تنش	معادله خط پایین تنش	تاریخ
۰/۹۲	$(T_c - T_a)_{u,1} = 2.05$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.5521 VPD + 1.0286$	۱۴۰۰/۱۲/۳
۰/۸۵	$(T_c - T_a)_{u,1} = 1.94$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.5801 VPD + 2.9762$	۱۴۰۰/۱۲/۱۳
۰/۹۴	$(T_c - T_a)_{u,1} = 2.08$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.4786 VPD + 4.2681$	۱۴۰۰/۱۲/۲۳
۰/۶۷	$(T_c - T_a)_{u,1} = 2.02$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.4064 VPD + 1.2632$	اسفندماه
۰/۹۵	$(T_c - T_a)_{u,1} = 3.34$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.3785 VPD + 2.1446$	۱۴۰۱/۱/۴
۰/۹۵	$(T_c - T_a)_{u,1} = 3.56$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.3518 VPD + 2.7567$	۱۴۰۱/۱/۱۴
۰/۸۶	$(T_c - T_a)_{u,1} = 3.33$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.3807 VPD + 2.5551$	۱۴۰۱/۱/۲۴
۰/۹۰	$(T_c - T_a)_{u,1} = 3.43$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.35 VPD + 1.8973$	فروردین‌ماه
۰/۸۹	$(T_c - T_a)_{u,1} = 6.42$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.1777 VPD + 1.3737$	۱۴۰۱/۰۲/۰۳
۰/۹۰	$(T_c - T_a)_{u,1} = 5.97$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.2626 VPD + 4.6868$	۱۴۰۱/۰۲/۱۳
۰/۹۴	$(T_c - T_a)_{u,1} = 6.22$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.2931 VPD + 2.9093$	۱۴۰۱/۰۲/۲۳
۰/۷۵	$(T_c - T_a)_{u,1} = 6.20$	$(Tc-Ta)_{l,1} = -0.2656 VPD + 3.6771$	اردیبهشت‌ماه

ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و میانگین آن در جدول (۶) ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد، تیمار CI با مقدار ۰/۱۷ کمترین و تیمار RDI60 با مقدار ۰/۶۷ بیشترین مقدار شاخص تنش آبی را به خود اختصاص دادند.

در مطالعه‌ای مقادیر شیب خط و عرض از مبدأ معادله خط مبنای پایین برای محصول گلرنگ در منطقه زرقان به ترتیب برابر ۰/۰۶- و ۸/۰۷ بدست آمد (شاهرخ‌نیا و خادم‌حمزه، ۱۴۰۱). معمولاً در مناطق گرم و خشک، شیب منحنی منفی‌تر و در مناطق سرد و مرطوب شیب منحنی به سمت صفر میل می‌کند (Kırmak et al., 2005). همچنین مقادیر شاخص تنش آبی گلرنگ برای

جدول ۶- شاخص تنش آبی گیاه تیمارهای آبیاری برای ماه‌های مختلف سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱

شاخص تنش آبی گیاه گلرنگ (CWSI)					تاریخ
PRD60	PRD80	RDI60	RDI80	CI	
۰/۷۳	۰/۴۷	۰/۶۶	۰/۴۷	۰/۳۴	اسفند
۰/۵۸	۰/۴۰	۰/۷۴	۰/۳۷	۰/۱۴	فروردین
۰/۵۲	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۱۴	اردیبهشت
۰/۶۱	۰/۴۰	۰/۶۷	۰/۴۰	۰/۱۷	میانگین

آب و مقاومت روزنه‌ای، پتانسیل نسبی آب برگ را افزایش داده و موجب ورود دی‌اکسیدکربن و حفظ فتوسنتز شوند و از این طریق باعث کاهش دمای پوشش سبز گیاه و افزایش عملکرد دانه گیاه شوند (Anjum et al., 2011).

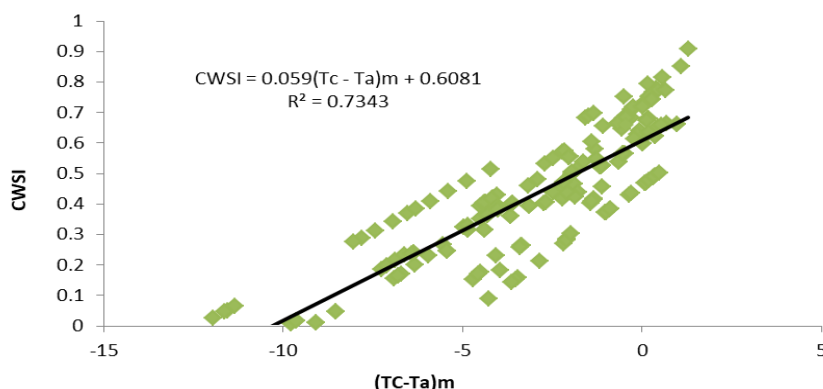
در شرایطی که اختلاف دمای گیاه و هوای مجاور کمتر از صفر گردد، در این حالت وضعیت رطوبتی گیاه به شرایط نرمال (تعرق پتانسیل) نزدیک‌تر شده، جذب دی‌اکسیدکربن با شدت بیشتری صورت می‌گیرد و عملکرد گیاه افزایش خواهد یافت. آستانه تنش آبی گیاه تا حدی دقیق است که اکثر پژوهشگران از این آستانه به‌عنوان مبنایی موفق و دقیق در تشخیص زمان آبیاری گیاهان مختلف یاد می‌کنند. برای مثال میزان آستانه شاخص CWSI توسط برخی محققین برای بادمجان بین ۰/۱۸ تا ۰/۲ (Barbosa da Silva and Colaka et al., 2015)، پنبه ۰/۳ (Ramana Rao, 2005)، ذرت ۰/۶ (Zia et al., 2011)، گندم بین ۰/۳ تا ۰/۴ (Bijanazadeh and Emam, 2012) و گوجه فرنگی برابر ۰/۷ (Lopez et al., 2011) گزارش کردند. در تحقیقی میزان آستانه شاخص فوق را برای گندم دیم در منطقه مراغه برابر ۰/۴ (فیضی‌اصل و همکاران، ۱۳۹۳) و برای منطقه هنام برابر ۰/۳۶ (دهقانی‌سانیچ و همکاران، ۱۳۹۵) گزارش شده است.

تعیین آستانه تنش آبی گیاه گلرنگ

پس از محاسبه شاخص تنش آبی گیاه CWSI و به‌منظور تعیین آستانه تنش، از معادله رگرسیونی بین شاخص مذکور با اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوای مجاور (Tc-Ta) برای مدیریت‌های مختلف آبیاری استفاده شد. مطابق شکل (۳) معادله بدست آمده به‌صورت $CWSI = 0.059(Tc-Ta)m + 0.6081$ با ضریب تبیین $R^2 = 0.73$ است.

چنانچه در معادله فوق‌الذکر میزان $(Tc-Ta)m = 0$ گردد، شاخص CWSI برابر با ۰/۶۱ خواهد شد. این عدد به‌عنوان آستانه تنش آبی گلرنگ در منطقه مورد مطالعه و با شرایط پژوهش معرفی می‌شود. در صورتی که $(Tc-Ta)m > 0$ ، بدان معنی است که دمای پوشش سبز گیاه بیشتر از دمای هوای مجاور خواهد بود و شرایط رطوبتی گیاه به حد بحرانی نزدیک‌تر می‌شود. در این هنگام گیاه به‌منظور مبارزه با تنش گرمایی و حفظ آب اندام‌های خود با بستن روزنه‌ها و کاهش تعرق با شرایط کمبود آب مبارزه می‌کند. لذا دمای سطح برگ و به دنبال آن دمای پوشش سبز گیاه افزایش خواهد یافت (Gonzalez et al., 2005).

در چنین شرایطی تیمارهایی موفق عمل می‌کنند که با رفع شرایط تنش آبی از طریق افزایش توسعه ریشه در خاک و جذب



شکل ۳- معادله بین اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا (Tc-Ta) با شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)

بررسی همبستگی شاخص تنش آبی گیاه با دمای پوشش سبز گیاه

شکل (۴) معادله رگرسیونی بین شاخص تنش آبی گیاه با دمای پوشش سبز گیاه برای مدیریت‌های مختلف آبیاری نشان می‌دهد. چنانچه در معادله به‌دست آمده $(CWSI = 0.066 Tc - 1.7169)$ مقدار آستانه تنش بدست آمده برای گلرنگ (۰/۶۱) را قرار دهیم، دمای پوشش سبز گیاه معادل آستانه تنش رطوبتی برابر $۳۵/۲۵$ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود. این دما می‌تواند مبنایی برای انتخاب ارقام و اعمال مدیریت‌های مناسب در منطقه مورد مطالعه قرار گیرد.

بررسی همبستگی شاخص تنش آبی گیاه با عملکرد دانه گلرنگ

شکل (۴) همبستگی بین شاخص CWSI و عملکرد محصول تحت تنش کم آبیاری را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، هر چه شاخص تنش آبی گیاه کمتر باشد، شرایط آبی گیاه مساعدتر و در نتیجه گیاه عملکرد بهتری خواهد داشت. معادله عملکرد محصول در مقابل شاخص تنش آبی گیاه به‌صورت $(SY = -0.85 CWSI + 4485.8 + 3879.8)$ بدست آمد که در آن SY عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار است. بیژن‌زاده و همکاران معادله عملکرد گلرنگ (برحسب گرم در مترمربع) در مقابل شاخص تنش آبی گیاه را به‌صورت $(Seed Yield = -0.008 Ir + 0.7917)$

بررسی همبستگی شاخص تنش آبی گیاه با عمق آبیاری

در این تحقیق میزان همبستگی بین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و میزان عمق آب آبیاری (Ir) بررسی گردید. شکل (۴) وجود یک معادله رگرسیونی خوبی بین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و میزان عمق آب آبیاری (Ir) را نشان می‌دهد که از دقت بالایی برخوردار است. معادله بدست آمده به‌صورت $CWSI = -0.0149 Ir + 1.0723$ با ضریب تبیین $R^2 = 0.79$ است که در آن Ir میزان عمق آب آبیاری برحسب میلی‌متر است. همان‌گونه که شکل (۳) نشان می‌دهد، با کاهش عمق آب آبیاری، شاخص تنش آبی گیاه CWSI افزایش می‌یابد. در حقیقت می‌توان بیان کرد که مکانیسم گیاه برای مقابله با تنش ناشی از کم آبیاری، بستن روزنه‌ها و کاهش تعرق است.

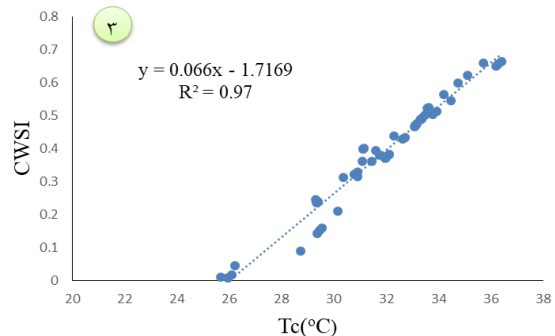
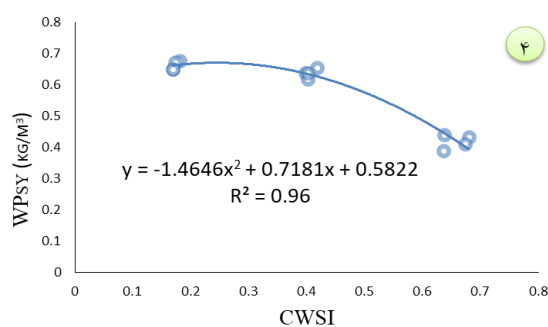
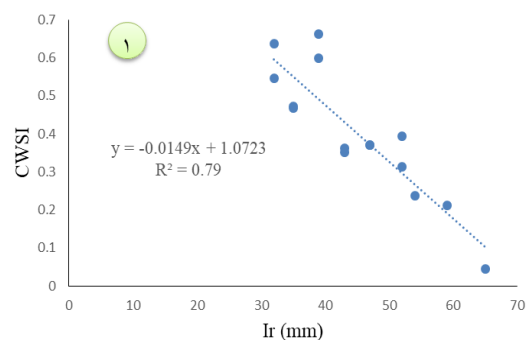
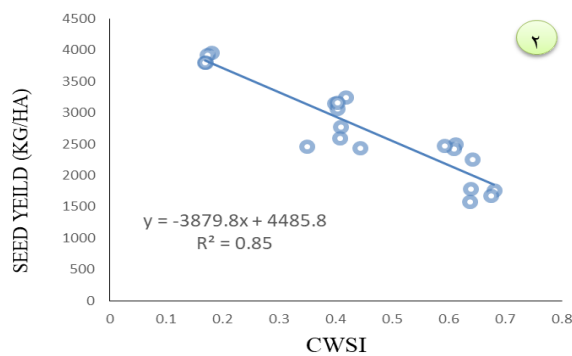
این عمل موجب افزایش دمای پوشش سبز و در نهایت موجب افزایش شاخص تنش آبی گیاه می‌شود. از آنجاکه همه تیمارهای آبیاری در شرایط یکسان آب و هوایی قرار داشتند، می‌توان نتیجه گرفت، تنها عامل مؤثر در افزایش شاخص تنش آبی گیاه، افزایش دمای پوشش گیاه در اثر تنش کم‌آبی بوده است. خورسند و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی به‌منظور تشخیص زمان تنش آبی محصول ذرت در منطقه ارومیه، معادله‌ی بین شاخص تنش آبی گیاه و عمق آب آبیاری برای تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه را به‌صورت $CWSI = -0.008 Ir + 0.7917$ بدست آوردند.

بررسی همبستگی شاخص تنش آبی گیاه با بهره‌وری آب آبیاری گلرنگ

در این تحقیق میزان همبستگی بین شاخص تنش آبی گیاه و بهره‌وری آب آبیاری عملکرد دانه در شرایط تنش کم آبیاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد، با اعمال تنش آبی، بهره‌وری آب آبیاری ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بررسی معادله بهره‌وری آب آبیاری با شاخص تنش آبی گیاه نشان داد که یک معادله چندجمله‌ای درجه دوم به صورت $WPSy = -1.4646 CWSI^2 + 0.7181 CWSI + 0.5822$ ضریب تبیین $R^2=0.95$ وجود دارد که در این معادله بهره‌وری آب آبیاری برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است. مطابق معادله بدست آمده، حداکثر بهره‌وری آب آبیاری در زمانی است که مقدار شاخص تنش آبی گیاه برابر 0.24 باشد.

$(1695.4 CWSI + 1601.3, R^2 = 0.83)$ بدست آوردند (Bijanazadeh et al., 2022).

همبستگی بالای بین عملکرد محصول و شاخص تنش آبی گیاه نشان می‌دهد، شاخص تنش آبی گیاه تحت تأثیر تنش کم آبیاری قرار می‌گیرد و تغییرات آن دارای روند مشخصی است. لذا می‌توان از این شاخص جهت پیش‌بینی عملکرد محصول استفاده نمود. از مزایای استفاده از شاخص تنش آبی گیاه برای پیش‌بینی عملکرد محصول می‌توان به استفاده از داده‌های مزرعه‌ای و اندازه‌گیری‌های مستقیم از پوشش سبز گیاه اشاره نمود. ولی این روش معایبی نیز دارد که از جمله آن‌ها می‌توان وقت‌گیر بودن، هزینه‌بر بودن، نبود امکانات و خطای اندازه‌گیری را نام برد که لازم است با سایر گزینه‌ها از جمله مدل‌های آماری و شبیه‌سازی، نیز مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۴- میزان همبستگی بین شاخص تنش آبی گیاه CWSI و ۱- عمق آب آبیاری (Ir)، ۲- عملکرد دانه گلرنگ، ۳- دمای پوشش سبز گیاه و ۴- بهره‌وری آب آبیاری عملکرد دانه

برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه

برنامه‌ریزی آبیاری این امکان را فراهم می‌کند تا مدیران بتوانند با استفاده از آن، اصول آبیاری را برای هر زمین زراعی تعیین کنند. برای توسعه هرچه بهتر یک برنامه‌ریزی آبیاری باید اهداف مدیریتی نظیر به حداکثر رساندن عملکرد، حداکثر رساندن سود خالص، حداقل رساندن هزینه‌ها، توزیع بهینه یک منبع آب محدود را در نظر گرفت که هر کدام به تنهایی یا به صورت یک مجموعه، وابسته به شرایط و اهداف می‌توانند در دستور کار قرار گیرند. هدف از برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس شاخص تنش آبی گیاه، تعیین حد مجازی برای اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا است که در زمان رسیدن به این حد آبیاری باید صورت گیرد.

برنامه‌ریزی آبیاری برای دستیابی به حداکثر عملکرد محصول

در شرایطی که دسترسی به آب کافی برای آبیاری میسر باشد و جهت استحصال آب محدودیتی وجود نداشته باشد، می‌توان

با به کار بردن آب به مقدار لازم به حداکثر محصول دست‌یافت. با توجه به یافته‌های تحقیق، بیشترین عملکرد محصول از تیمار آبیاری معمولی CI حاصل شد. بنابراین با توجه به عملکرد بالا، مقادیر شاخص تنش آبی گیاه در تیمار CI مبنای برنامه‌ریزی آبیاری قرار گرفت. با توجه به معادلات خط مبنای پایین و بالا به دست‌آمده، معادله حد مجاز اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا به صورت زیر به دست آمد. برای استفاده از این معادلات جهت تشخیص زمان شروع آبیاری ابتدا باید مقدار کمبود فشار بخار اشباع را در ساعت ۱۱ الی ۱۴ اندازه‌گیری کرده و سپس مقدار مجاز اختلاف دمای گیاه و هوای مجاور $(T_c - T_a)_a$ تعیین می‌شود. سپس مقادیر اختلاف دمای گیاه و هوای مجاور اندازه‌گیری شده $(T_c - T_a)_m$ را در شرایط حداکثر تنش در ساعت ۱۱ الی ۱۴ بدست می‌آید. از مقایسه مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار مجاز می‌توان زمان فرا رسیدن آبیاری را تشخیص داد. اگر مقدار اندازه‌گیری شده از مقدار مجاز کوچک‌تر باشد، بدان معنی است که هنوز زمان آبیاری فرا نرسیده است و در صورتی که مقدار اندازه‌گیری شده از مقدار مجاز بزرگ‌تر یا برابر باشد، زمان انجام آبیاری است.

جدول ۷- برنامه‌ریزی آبیاری برای دستیابی به حداکثر عملکرد محصول

ماه	محدوده VPD	معادلات برنامه‌ریزی آبیاری
اسفند	$10 \leq VPD \leq 60$	$(T_c - T_a)_a = 1.44 - 0.3088 VPD$
فروردین	$10 \leq VPD \leq 60$	$(T_c - T_a)_a = 2.11 - 0.301 VPD$
اردیبهشت	$10 \leq VPD \leq 60$	$(T_c - T_a)_a = 4.03 - 0.228 VPD$

بنابراین با توجه به معادلات به دست‌آمده برای خط مبنای پایین و بالا در طول مرحله رشد و معادلات حد مجاز اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا برای اسفند، فروردین و اردیبهشت‌ماه استخراج شد (جدول ۸). برای استفاده از این معادلات نیز همانند مورد قبل با محاسبه مقدار مجاز و اندازه‌گیری شده اختلاف دمای گیاه و هوای مجاور در ساعت ۱۱ الی ۱۴ و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌توان زمان آبیاری را تشخیص داد.

برنامه‌ریزی آبیاری با هدف دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب آبیاری

در شرایطی که هزینه‌های دسترسی به آب بالا است و یا منابع آب محدود باشد، ضروری است با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب آبیاری را دستور کار قرار داد. با توجه به نتایج تحقیق، بیشترین بهره‌وری آب آبیاری از تیمار RDI80 بدست آمد. لذا مقدار شاخص تنش آبی گیاه تیمار RDI80 برای ماه‌های مختلف مبنای برنامه‌ریزی قرار گرفت.

جدول ۸- برنامه‌ریزی آبیاری برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب آبیاری	ماه	محدوده VPD	معادلات برنامه‌ریزی آبیاری
	اسفند	$10 \leq VPD \leq 60$	$(Tc-Ta)_a = 1.618 - 0.215 VPD$
	فروردین	$10 \leq VPD \leq 60$	$(Tc-Ta)_a = 2.46 - 0.220 VPD$
	اردیبهشت	$10 \leq VPD \leq 60$	$(Tc-Ta)_a = 4.636 - 0.164 VPD$

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد، در معادلات بین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و دمای پوشش سبز، عملکرد محصول، عمق آب آبیاری و بهره‌وری آب آبیاری همبستگی بالایی وجود دارد که با استفاده از این معادلات و بدون نیاز به اندازه‌گیری میزان رطوبت خاک و گیاه، می‌توان وضعیت آبی و همچنین شدت تنش آبی گیاه را تنها با اندازه‌گیری دمای پوشش گیاه محاسبه نمود. نتایج نشان داد، تیمار CI با مقدار $0/17$ کمترین و تیمار RDI60 با مقدار $0/67$ بیشترین مقدار شاخص تنش آبی را به خود اختصاص دادند. برنامه ریزی آبیاری با هدف دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب آبیاری انجام شد و بر این اساس معادلات حد مجاز اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا برای ماه‌های اسفند ($(Tc-Ta)_a = 1.618 - 0.215$)، فروردین ($(Tc-Ta)_a = 2.46 - 0.220 VPD$)، اردیبهشت ($(Tc-Ta)_a = 4.636 - 0.164 VPD$) به‌دست آمد. آستانه تنش رطوبتی برای گلرنگ، از معادله رگرسیونی بین شاخص CWSI با اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوای مجاور ($(Tc-Ta)$) برابر $0/61$ بدست آمد که برای منطقه مورد مطالعه و با شرایط پژوهش معرفی شد. در مجموع تکنیک کم‌آبیاری تنظیم‌شده با تأمین ۸۰ درصد کمبود رطوبت خاک (RDI80) زمانی که CWSI در محدوده $0/40 - 0/24$ باشد، می‌تواند یک رژیم آبیاری قابل قبول برای گلرنگ در مناطق با اقلیم گرم و خشک و با محدودیت منابع آبی باشد.

قدردانی

این مقاله از پایان‌نامه دوره دکترای تخصصی در دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدین‌وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU. WI98.280) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- احمدی، ح.، نصرالهی، ع. ح.، شریفی پور، م. و عیسوند، ح. ۱۳۹۷. تعیین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) سویا برای مدیریت آبیاری جهت حداکثر عملکرد و بهره‌وری آب. فصل نامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۸ (۳۲): ۱۳۱-۱۲۰.
- خورسند، ا.، رضوردی-نژاد، و.، عسگرزاده، ح.، مجنونی هریس، ا.، رحیمی، ا.، بشارت، س. و صدرالدینی، ع. ا. ۱۳۹۸. تعیین شاخص تنش آبی (CWSI) جهت تشخیص تنش آب محصول ذرت در منطقه ارومیه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۴): ۸۸۴-۸۷۳.
- دهقانی‌سانج، ح.، نخجوانی‌مقدم، م. م. و قهرمان، ب. ۱۳۹۵. کاربرد شاخص تنش آبی گیاه برای زمانبندی تک آبیاری گندم دیم (مطالعه موردی در بالادست حوضه کرخه). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۱۱): ۵۶۱ - ۵۵۲.
- سعیدی‌نیا، م.، هوشمند، ع.، برومندنسب، س.، سلطانی‌محمدی، ا. و اندرزیان، ب. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر شوری آب آبیاری بر کارایی شاخص CWSI در شرایط اقلیمی اهواز. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۳۹(۴): ۱۲-۱.
- شاهرخ‌نیا، م. ع. و خادم‌حمزه، ح. ر. ۱۴۰۱. بررسی اثر تنش خشکی بر ارقام گلرنگ و ارائه حدود بحرانی تنش براساس دمای پوشش سبز گیاه. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶(۳): ۴۶-۱۲.
- فیضی‌اصل، و.، فتوت، ا.، آستارایی، ع. ر.، لکزیان، ا. و موسوی شلمانی، م. ا. ۱۳۹۳. تعیین موازنه آبی و مراحل بحرانی آن در گندم دیم با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۱۳(۴): ۸۰۴ - ۸۱۸.
- Abd El-Lattief, A.E. 2013. Safflower yields and water use efficiency as affected by irrigation at different soil moisture depletion levels and plant population density under arid conditions, Archives of Agronomy and Soil Science. 59(11): 1545-1557.

- Akkuzu, E., Kaya, U., Camoglu, G., Pamuk, G and Asik, S. 2015. Closure to "Determination of Crop Water Stress Index and Irrigation Timing on Olive Trees Using a Handheld Infrared Thermometer" by Erhan Akkuzu, Unal Kaya, Gokhan Camoglu, Glay Pam Mengu, and Serafettin Asik. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 141.10.
- Anjum, S.A., Xie, X., Wang, L., Saleem, M.F., Man, C and Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*. 6(9): 2026- 2032.
- Barbosa da Silva, B and Ramana Rao, T.V. 2005. The CWSI variations of a cotton crop in a semi-arid region of Northeast Brazil. *Journal of Arid Environments*. 62(4): 649-659.
- Bellvert, J., Marsal, J., Girona, J and Zarco-Tejada, P.J., 2015. Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrig. Sci.* 33 (2):81-93.
- Ben-Gal, A., Agam, N., Alchanatis, V., Cohen, Y., Yermiyahu, U., Zipori, I., Presnov, E., Sprintsin M., and Dag, A., 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: Correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. *Irrig. Sci.* 27(5): 367-376.
- Bijanazadeh, E., Moosavi, S.M and Bahadori, F. 2022. Quantifying water stress of safflower (*Carthamus tinctorius L.*) cultivars by crop water stress index under different irrigation regimes. *Heliyon*.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09010>.
- 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.
- Colaka, Y.B., Yazarb, A., Colakc, I., Akcaa, H and Duraktekina, G. 2015. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 4:372 – 382.
- Costa, J.M., Ortuno, M.F and Chaves, M.M. 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture. *J. Integer. Plant Biol.* 49: 1421-1434.
- DeJonge, K.C., Taghvaeian, S., Trout, T.J and Comas, L.H. 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agric. Water Manag.* 156: 51-62
- Ebrahimian, E., Seyyedi, S. M., Bybordi, A and Damalas, Ch. A. 2019. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*. 218: 149-157.
- Elhani, S., Haddadia, M., Csákvárib, E., Zantara, S., Hamima, A., Villányib, V, Douaikc, A and Bánfalvib, Z. 2019. Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield, irrigation water-use efficiency and some potato (*Solanum tuberosum L.*) quality traits under glasshouse conditions. *Agricultural Water Management*. 224:105745
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105745>.
- Fucs, M and Tanner, C.B. 1966. Infrared thermometry of vegetation. *Agron. J.* 58: 597-601.
- Geerts, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agric. Water Manage.* 96: 1275-1284.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Moran, M.S., Mateos, L and Bryant, R. 2005. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrigation Science*. 24: 233-240.
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Sohrabi, T., Rasoulzadeh, A and Ebrahimian, H. 2021. Improving performance of furrow irrigation systems using simulation modelling in the Moghan plain of Iran. *Irrigation and Drainage*. 70(1): 131-149.
- Han, M., Zhang, H., DeJonge, K.C., Comas, L.H and Gleason, S. 2018a. Comparison of three crop water stress index models with sap flow measurements in maize. *Agric. Water Manag.* 203: 366-375.
- Han, M., Zhang, H., DeJonge, K.C., Comas, L.H and Gleason, S. 2018b. Comparison of three crop water stress index models with sap flow measurements in maize. *Agric. Water Manage.* 203: 366-375.
- Hiler, E.A. and Clark, R.N. 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yield. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*. 14(4):757-761.
- Idso, S.B., Kackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J and Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*. 24:45-55.
- Ihuoma, S and Madramootoo, C. 2017. Recent advances in crop water stress detection. *Computers and Electronics in Agriculture*. 141: 267-275.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J and Pinter, J. P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*. 17:1133.
- Janmohammadi, M., Mohammadi, N., Shekari, F., Abbasi, A and Esmailpour, M., 2017. The effects of silicon and titanium on safflower

- (*Carthamus tinctorius* L.) growth under moisture deficit condition. *Acta Agric. Slov.* 109: 443–455.
- Karthe, D., Abdullaev, I., Boldgiv, B., Borchardt, D., Chalov, S., Jarsjö, J., Li, L.A and Nittrouer, J. 2017. Water in Central Asia: an integrated assessment for science-based management. *Environ Earth Sci.* 76: 690.
- Keener, M.E. and Kircher, P.L. 1983. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions. *Agric. Forest Meteorol.* 28: 339–349.
- Khaleghi, M., Hassanpour, F., Karandish, F. and Shahnazari, A. 2020. Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. *Agricultural Water Management.* 234: 106094
- King, B.A., Tarkalson, D.D., Sharma, V. and Bjorneberg, D.L. 2021. Thermal crop water stress index base line temperatures for sugarbeet in arid western US. *Agric. Water Manag.* 243: 106459
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106459>.
- Kırnak, 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. GAP IV. Tarım Kong., Sanlıurfa, 21-23 September. pp: 1164-1171.
- Kumar, N., Poddar, A., Shankar, V., Ojha, C.S.P and Adeloje, A.J. 2019. Crop water stress index for scheduling irrigation of Indian mustard (*Brassica juncea*) based on water use efficiency considerations. *J. Agron. Crop Sci.* 206:148–159.
- Lopez, L.R., Arteaga, R.R., Sanchez, C.I., Ojeda, B.W. and Gonzalez, L.V. 2011. Evapotranspiration and Crop Water Stress Index in Mexican Husk Tomatoes (*Physalis Ixocarpa Brot*). pp: 187-210. In: *Evapotranspiration-From Measurements to Agricultural and Environmental Applications*. Gerosa G (Editor). Intechwem. Organization.
- Luan, Y., Xu, J., Lv, Y., Liu, X., Wang, H. and Liu, S. 2021. Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging. *Agric. Water Manag.* 246, 106699
- Nouraki, A., Akhavan, S. and Rezaei, Y. 2017. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for sunflower under different Irrigation Regimes. *Journal of Researcher.* 9 (7): 59-63.
- O'shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D. and Howell, T.A. 2017. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. *Agric. Water Manag.* 107: 122–132.
- Osroosh, Y., Peters, R.T., Campbell, C.S and Zhang, Q. 2016. Comparison of irrigation automation algorithms for drip-irrigated apple trees. *Comput. Electron. Agric.* 128: 87–99.
- Saeedinia, M., Broomand Nasab, S., Hooshmand, A., Soltani Mohammadi, A. and Andarzian, B. 2015. Applicability of CWSI index for irrigation scheduling of maize using saline water in Ahvaz. *Journal of Water and Soil Science.* 26 (1): 173-185.
- Sarker, K.K., Hossain, A., Timsina, J., Biswas, S.K., Kundu, B.C., Barman, A., Murad, K.F.I., Akter, F. 2019. Yield and quality of potato tuber and its water productivity are influenced by alternate furrow irrigation in a raised bed system. *Agric. Water Manag.* 224: 105750.
- Seyfi, A., Mirlatifi, M., DehghaniSanij, H. and Torabi, M. 2017. Determination of water stress index for pistachio trees under subsurface drip irrigation method using temperature difference between the air and canopy cover. *Journal of Water and Irrigation Management.* 4(1): 123-136.
- Sezen, S. M., Yazar, A., Daşgan, Y., Yucel, S., Akyıldız, A., Tekin, S. and Akhoundnejad, Y. 2014. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. *Journal of Agricultural Water Management,* 143: 59-70.
- Shahrokhnia, M.H and Sepaskhah, A.R. 2017. Physiologic and agronomic traits in safflower under various irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization. *Ind. Crops Prod.* 95:126–139.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.021>.
- Shammout, M. W., Qtaishat, T., Rawabdeh, H and Shatanawi, M. 2018. Improving Water Use Efficiency under Deficit Irrigation in the Jordan Valley. *Sustainability* 10: 4317.
- Ward, F. A and Pulido-Velazquez, M. 2008. Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (47): 18215-18220.
DOI:10.1073/pnas.0805554105.
- Yang, C., Zhang, J. L., Zhang, G., Lu, J. W., Ren, T and Cong, R. H. 2022. Potassium deficiency limits water deficit tolerance of rice by reducing leaf water potential and stomatal area. *Agric. Water Manage.* 271: 107744
doi: 10.1016/j.agwat.2022.107744.
- Yildirim, E., Kirby, J.E., Brown, D.E., Mercier, F.E., Sadreyev, R.I., Scadden, D.T and Lee, J.T. 2013. Xist RNA is a potent suppressor of hematologic

cancer in mice. National Center for Biotechnology Information. 152(4):727-42.
Zia, S., Spohrer, K., Du, W., Spreer, W., Romano, G., He, X and Müller, J. 2011. Monitoring

physiological responses to water stress in two maize varieties by infrared thermography. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 4(3): 7-15 .

Application of the Crop Water Stress Index (CWSI) for Scheduling Safflower Irrigation in Khuzestan Climate

S. M. S. Mousavi¹, M. Albaji^{2*}, A. Naseri³, M. Golabi⁴, M. R. Moradi Telavat⁵

Abstract

The Crop Water Stress Index (CWSI) is a practical method for monitoring plant water status, detecting the onset of moisture stress, predicting crop yield, and irrigation schedule for various crops. The CWSI values range from zero to one, where zero indicates that the plant is not under water stress and has the most ideal conditions for transpiration, while a value of one signifies maximum water stress and complete cessation of transpiration. The present research was conducted to calculate the CWSI, determine the moisture stress threshold for safflower and identify optimal irrigation management practices by analyzing the relationship between the CWSI and various deficit irrigation management approaches. The research was carried out over two agricultural seasons, 2020-2021 and 2021-2022 at Khuzestan University of Agriculture and Natural Resources. The experiment used a randomized complete blocks design with a conventional irrigation treatment (CI) and four deficit irrigation treatments including (RDI80, RDI60: deficit irrigation adjusted by supplying 80% and 60% of soil moisture deficit, respectively) and (PRD80, PRD60: deficit irrigation in the form of partial root zone drying methods with 80% and 60% of soil moisture deficit, respectively) and with four repetitions. Results showed that the CI treatment had the lowest value of 0.17 and the RDI60 treatment had the highest CWSI at 0.67. Irrigation planning was done with the aim of achieving the maximum efficiency of water productivity, and based on this, the relationship between the permissible limit of the temperature difference of the Canopy cover of the plant and the air for the months of March (($T_c - T_a$)_a = 1.618 - 0.215 VPD), April (($T_c - T_a$)_a = 2.46 - 0.220 VPD) and May (($T_c - T_a$)_a = 4.636 - 0.164 VPD) were obtained. The moisture stress threshold for safflower was obtained from the regression relationship between the CWSI and the temperature difference of the Canopy cover of the plant and the temperature of the surrounding air ($T_c - T_a$) equal to 0.61, which was introduced for the study area and with the research conditions.

Keywords: CWSI, Deficit Irrigation, Plant temperature, Safflower, Scheduling Irrigation

¹ Ph.D student, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

² Associate professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (*Corresponding Author: m.albaji@scu.ac.ir)

³ professors, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁴ Associate professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

⁵ Associate professor, Department of Plant Production and Genetics, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran

Received: 18 Nov 2023

Accepted: 10 Jan 2023