

مقاله علمی-پژوهشی

برنامه‌ریزی آبیاری گیاه کینوا تحت سطوح مختلف آبیاری با استفاده شاخص تنش آبی گیاه

صابر جمالی^۱، حسین انصاری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

چکیده

با توجه به اینکه درجه حرارت پوشش گیاهی که با تعرق گیاه مرتبط است، دامسنگ مادون قرمز تعیین سریع درجه حرارت می‌تواند به‌عنوان روشی برای مدیریت آب در مزرعه مورد استفاده قرار گیرد و وضعیت آب در گیاه را نمایان سازد، بدین منظور این پژوهش باهدف بررسی تغییرات شاخص تنش آبی گیاه کینوا انجام شد. تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش چهار سطح آبیاری ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی (به ترتیب T_1 ، T_2 ، T_3 و T_4) بوده که در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار و در طول فصل رشد کینوا در سال ۹۸-۱۳۹۷ انجام شد. بر اساس نتایج این پژوهش، بیشترین مقدار از زیست توده، وزن خشک برگ، ساقه، ریشه و سنبله به ترتیب با $۳۹/۷$ ، $۱۱/۳$ ، $۸/۸$ ، $۲/۸۳$ ، $۱۶/۸$ گرم در بوته در تیمار T_1 مشاهده شد. تیمارهای T_2 ، T_3 و T_4 در مقایسه با تیمار T_1 منجر به کاهش $۳۷/۶$ ، $۵۲/۵$ و $۶۴/۸$ درصد در عملکرد دانه، $۳۰/۴$ ، $۳۴/۵$ و $۳۰/۷$ درصد در شاخص برداشت، $۱۶/۴$ ، $۲۹/۷$ و $۵۱/۱$ درصد در زیست توده و افزایش $۱۹/۴$ ، $۳۶/۶$ و $۷۷/۴$ درصد در کارایی مصرف آب شد. نتایج نشان داد CWSI با عملکرد دانه و زیست توده، همبستگی منفی در سطح احتمال یک درصد دارد. بیشترین و کمترین میزان از عملکرد دانه نیز در این پژوهش در متوسط CWSI برابر با $۰/۰۵$ و $۰/۶۱$ به دست آمد؛ به طوری که برای دستیابی به بیشترین عملکرد دانه در بوته، پس از رسیدن به $CWSI=0.05$ باید گیاهان آبیاری شوند. بیشترین کمترین میزان از شاخص CWSI به ترتیب در تیمارهای T_4 (با $۰/۷۲$) و T_1 (با $۰/۰۵$) مشاهده شد. مقادیر متوسط CWSI در تیمارهای مختلف T_1 ، T_2 ، T_3 و T_4 در روز قبل از آبیاری، به ترتیب برابر با $۰/۰۵$ ، $۰/۱۹$ ، $۰/۴۸$ و $۰/۷۲$ بود. کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ درصد نیاز آبی منجر به افزایش $۳/۸$ برابری در شاخص CWSI شد. به طوری که از این شاخص برای برنامه‌ریزی آبیاری این گیاه می‌توان استفاده کرد، به طوری که بهترین زمان آبیاری در تیمار شاهد بر اساس رابطه $(5 \leq VPD \leq 20)$ $(T_c - T_a)_a = 2.41 - 0.21$ است.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح برگ، شاخص CWSI، عملکرد دانه کینوا، کارایی مصرف آب، کم آبیاری

مقدمه

معنای تعیین بهترین زمان و مقدار مناسب آب آبیاری است (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸؛ Steduto et al., 2012)؛ به طوری که علاوه بر اینکه آب مورد نیاز گیاه تأمین شده و از مصرف بی‌رویه آب جلوگیری می‌شود، منجر به جلوگیری از بروز تنش خشکی و کاهش عملکرد محصول نیز می‌شود. روش‌های متفاوتی برای تعیین زمان مناسب آبیاری وجود دارد که به طور کلی به سه دسته بیلان آب، استفاده از نمایه‌های خاک و استفاده از نمایه‌های گیاهی تقسیم می‌شوند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۵). شاخص تنش آبی محصول (CWSI) شاخص قابل اعتمادی از وضعیت آب در گیاهان بوده و برای پایش تنش آبی، پیش‌بینی عملکرد و برنامه‌ریزی آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kumar et al., 2021). استفاده از روش نمایه‌های گیاهی نظیر شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) می‌تواند در برنامه‌ریزی آبیاری برای استفاده از ذخیره‌سازی آب خاک بدون اطلاع از عمق خاک، عمق ریشه‌زایی محصول و پایش آب خاک در اعماق بیش از $۰/۶$ متر و همچنین برای محاسبه تعرق نسبی در گیاهان استفاده شود (King et al., 2021; Ru et al., 2020; Gonzalez-Dugo et al., 2020).

امروزه اکثر کشورهای جهان با مشکل جدی کمیت و کیفیت آب مواجه هستند که این مشکل در دهه‌های پیش رو با افزایش جمعیت، بیشتر نیز خواهد شد، چراکه پیش‌بینی شده است جمعیت کنونی ۷ میلیاردی تا سال ۲۰۳۰ به ۸ میلیارد نفر و تا سال ۲۰۵۰ به ۹ میلیارد نفر برسد (بیرامی و همکاران، ۱۳۹۸؛ صمدزاده و همکاران، ۱۳۹۹). کمبود منابع آب با کیفیت مشکلات بزرگی مانند کاهش تولید محصولات غذایی، شوری خاک، فقر غذایی و ... را به دنبال دارد و در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای تولید محصولات کشاورزی محدودیت ایجاد می‌کند (خشائی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ از این رو برنامه‌ریزی آبیاری مناسب در کشاورزی امری ضروری است که به

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: Ansary@um.ac.ir)

(*- نویسنده مسئول)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.6.1.1

زمان آبیاری قطره‌ای مقادیر CWSI معادل ۰/۱۷، ۰/۱۵ و ۰/۱۲ ارائه شد (لاوند و همکاران، ۱۳۹۹).

خرسندی و همکاران با بررسی شاخص CWSI در گیاه کنجد نشان دادند که این شاخص جهت تشخیص تنش آبی و برآورد میزان نسی آبی در این گیاه مناسب است (Khorsandi et al., 2018). یون و همکاران در پژوهشی بر روی درخت هلو در کره جنوبی نشان دادند که شاخص CWSI روزانه با دمای سایبان و اختلاف دمای برگ و هوا همبستگی بالایی داشته ولی با پتانسیل آب خاک همبستگی نداشت (Yun et al., 2020). در پژوهشی بر روی گیاه سویا نتایج نشان داد که افزایش ۰/۱ واحدی در شاخص CWSI در مقادیر بیش از ۰/۲ منجر به افزایش کارایی مصرف آب دانه سویا به میزان ۰/۴۹ کیلوگرم در مترمکعب می‌شود (Anda et al., 2020). در پژوهشی دیگر که در کشور هند بر روی خردل هندی در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ انجام شد، نتایج نشان داد که در اثر اعمال تنش آبی ۳۰ درصدی، بیشترین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب حاصل شد و مقدار CWSI در این شرایط برابر با ۰/۴ بود (Kumar et al., 2020). در پژوهشی که در دانشگاه آیداهو^۱ آمریکا بر روی انگور رقم Malbec انجام شد، نتایج نشان داد که کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ و ۷۵ به ۵۰ و ۳۵ درصد تخییر-تغرق گیاهی، مقدار آستانه CWSI روزانه از ۰/۴ به ۰/۶ افزایش یافت (Shellie and King, 2020). در پژوهشی که توسط جمشیدی و همکاران بر روی مرکبات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های محلی انجام شد، نتایج نشان داد که خط مبنای پایینی و بالایی برای مرکبات به ترتیب برابر با $T_c - T_a$ $Jamshidi et al., (2021)$ $= -0.57 \times VPD + 2.31$ و $T_c - T_a = 3.43$ بود. در پژوهشی که در کشور ترکیه بر روی گیاه کینوا رقم Titicaca انجام شد، نتایج نشان داد که CWSI با عملکرد دانه، عملکرد ماده خشک، شاخص سطح برگ و میانگین محتوای آب خاک همبستگی معنی‌دار منفی و در سطح احتمال یک درصد داشت و با افزایش مقادیر CWSI عملکرد دانه کینوا کاهش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد که در CWSI برابر با ۰/۳۵ بیشترین میزان عملکرد دانه مشاهده شده است (Çolak et al., 2021).

گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Wild) دارای ارزش غذایی بالایی بوده و در شرایطی که اراضی دارای حاصلخیزی کم و یا دارای محدودیت هستند به‌خوبی قابل کشت بوده و محصول مناسب تولید می‌کند (جمالی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Bertero, 2021). کینوا از آنجاکه گیاهی دارویی و هم‌چنین بدون گلوتن است غذایی ارزشمند بوده و به‌سلامت جامعه نیز کمک خواهد نمود (Jacobsen, 2003; Ruiz-Carrasco et al., 2011; Bonales-Alatorre et al., 2013). از طرفی مطالعات متعددی در زمینه برنامه‌ریزی آبیاری با

بیشتر مناطق ایران، خشک و نیمه‌خشک بوده که بعضاً با شوری خاک بالا نیز مواجه است، از این رو برای دستیابی به تولید زراعی در این مناطق نیاز به استفاده از گیاهان و ارقامی متحمل به شوری و خشکی است؛ به طوری که یکی از گیاهانی که در این مناطق قابلیت کشت دارد، گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Wild) است (Schmöckel, 2021).

در پژوهشی بر روی گیاه سویا نتایج نشان داد که افزایش در شاخص CWSI منجر به کاهش عملکرد دانه سویا می‌شود و حد آستانه شاخص تنش آبی برابر با ۰/۱۸ مبنای محاسبه زمان آبیاری با استفاده از شاخص تنش آبی قرار گرفت. مقادیر شاخص CWSI برای زمان‌بندی آبیاری سویا جهت دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب در مراحل توسعه، میانی و نهایی رشد گیاه به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۳۷ و ۰/۲۹ توسط آن‌ها محاسبه شد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). تغییرات مقدار شاخص تنش آبی گیاه در پژوهش خیری شلمزاری و همکاران (۱۳۹۸) بر روی گیاه سیب‌زمینی در تیمارهای کم‌آبیاری برای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب بین ۰/۱۶ تا ۰/۵۶ و ۰/۱۵ تا ۰/۴۹ بود. آن‌ها برای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به ترتیب روابط $Y = -122.28$ و $Y = -101.61$ CWSI + 70.97 را برای بیان ارتباط شاخص تنش آبی گیاه با عملکرد محصول، ارائه کردند و همچنین نشان دادند که آبیاری در محدوده‌ی ۰/۱۶ تا ۰/۲ شاخص تنش آبی گیاه سیب‌زمینی، منجر به دستیابی به بالاترین عملکرد در روش آبیاری قطره‌ای سطحی است. فتاحی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی بر روی ذرت علوفه‌ای در شمال اصفهان نشان دادند که میزان شاخص تنش آبی CWSI در روز قبل از آبیاری، در تیمارهای ۳۷، ۶۳، ۷۵، ۸۷ و ۱۰۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی در محدوده ۰/۱۲ تا ۰/۴۶ بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که تغییر ۱۰ درصدی در رطوبت خاک در محدوده ۲۶ تا ۳۶ درصد منجر به افزایش ۳/۵ برابری شاخص CWSI می‌شود. نوری و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی بر روی لوبیاچیتی نشان دادند که مقدار آستانه شاخص CWSI برای این محصول در استان لرستان برابر با ۰/۲۱ بوده و برای تعیین زمان مناسب آبیاری این گیاه می‌توان از رابطه $(T_c - T_a)_a = 3.56 - 0.11VPD$ استفاده کرد. در پژوهشی دیگر بر روی ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی اهواز، برای روز بعد و قبل از آبیاری به ترتیب $CWSI = 1.038 - 0.0281\theta_v$ و $CWSI = 1.8296 - 0.0586\theta_v$ برای تیمار آبیاری کامل توسط محققین ارائه شده و نتایج تحقیق نشان داد که با کاهش آب مصرفی، شاخص تنش آبی گیاه افزایش می‌یابد (جلیلیان و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی بر روی لوبیاچیتی برای آبیاری تیپ و سطحی به ترتیب مقادیر ۰/۱۹ و ۰/۲۴ به عنوان مقادیر آستانه CWSI ارائه شد (نصرالهی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی دیگر برای مراحل رشد و توسعه، میانی و پایانی ذرت جهت تعیین

گلخانه مذکور از سیستم پوشال پنکه جهت سرمایش و از سیستم لوله آب گرم جهت گرمایش استفاده شد. در این پژوهش از گلدان‌هایی با ابعاد ۳۰ (ارتفاع) و ۲۰ (قطر) سانتی‌متری استفاده شد. تیمارهای موردبررسی در این پژوهش شامل ۴ سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) بود. پس از تهیه محیط کشت مربوطه، آن را به گلدان‌های پلاستیکی انتقال داده و با توجه به چگالی ظاهری هر بافت، مقدار مشخصی خاک درون گلدان‌ها ریخته شد. لازم به ذکر است که ابتدا در کف گلدان‌ها به‌صورت یکسان لایه‌ای از سنگ‌ریزه به‌عنوان پالایه جهت بهبود زهکشی و تهویه قرار داده شد و ۵ سانتی‌متر بالایی گلدان‌ها به‌منظور اعمال آبیاری خالی در نظر گرفته شد و بقیه حجم خالی گلدان‌ها از خاک پر شد. جهت جلوگیری از نشست خاک در گلدان و رسیدن به وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه، پر کردن خاک گلدان به‌صورت تدریجی و در لایه‌های پنج سانتی‌متری همراه با کوبش انجام شد. به‌منظور از بین بردن شوری، محیط کشت گلدان‌ها با آب شهری اشباع شده و اجازه داده شد که آب از زهکش‌های آن خارج شود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

استفاده از اندازه‌گیری دمای پوشش گیاهی در داخل و خارج از کشور بر روی گیاهان مختلف انجام شده است، ولی مطالعات اندکی در این ارتباط بر روی این گیاه صورت گرفته و از این‌رو هدف این پژوهش برنامه‌ریزی آبیاری گیاه کینوا تحت سطوح مختلف آبیاری با استفاده از دمای پوشش سبز تحت شرایط گلخانه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر کم‌آبیاری بر دمای پوشش سبز، تعیین خطوط مبنای بالایی و پایینی و تعیین شاخص تنش آبی CWSI پژوهشی در قالب طرح کاملاً تصادفی در زمستان ۱۳۹۷ و بهار ۱۳۹۸ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد (با دمای محیط حدود ۲۴ درجه سانتی‌گراد در روز و ۱۸ درجه سانتی‌گراد در شب با رطوبت نسبی حدود ۷۵ درصد) با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی، ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۹۵۸ متر ارتفاع از سطح دریا بر روی گیاه کینوا رقم Titicaca به‌صورت کشت گلدانی و با ۴ تکرار انجام شد. در گلخانه در طول شبانه‌روز به میزان ۸۰۰۰ الی ۱۲۰۰۰ لوکس نور با استفاده از لامپ‌های هالوژنی فراهم گردید. در

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

بافت خاک	شن	سیلت	رس	چگالی ظاهری	ظرفیت زراعی	هدایت الکتریکی	pH
	%	%	%	gcm ⁻³	%	dSm ⁻¹	
سیلتي رسي	۸	۵۰	۴۲	۱/۴۷	۳۸/۲	۱/۲۵	۷/۸۵

و تعیین اثر شرایط محل و عملیات زراعی بر نیاز آبی گیاه. در این تحقیق از تست تبخیر کلاس A و از روابط (۱) و (۲) برای تعیین میزان تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی استفاده شد (علیزاده، ۱۳۹۳).

$$ET_0 = K_p \times E_{pan} \quad (1)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

در این رابطه، K_p ضریب تشتت و E_{pan} میزان تبخیر اندازه‌گیری از تشتت (میلی‌متر) برای هر منطقه است که تبخیر-تعرق گیاه مرجع و تبخیر-تعرق واقعی گیاه بدان وابسته است. مقدار K_p به عوامل متعددی از جمله رطوبت نسبی هوا، سرعت باد و محیط اطراف تشتت بستگی دارد. میزان ضریب تشتت با توجه به پژوهش امیری و همکاران (۱۳۹۰) برابر با ۰/۹۴ در نظر گرفته شد. همچنین بر اساس بررسی‌های انجام شده ضریب گیاهی برای کینوا تعیین شد و در محاسبه نیاز آبی مدنظر قرار گرفت (Talebnejad and Sepaskhah, 2015) (جدول ۲).

در تاریخ ۲۵ اسفند ۱۳۹۷، ۱۰ بذر گیاه کینوا رقم Titicaca در عمق ۱/۵ سانتی‌متری کشت شد، به‌طوری‌که پس از رسیدن به مرحله ۴ برگی تراکم بوته‌ها در هر گلدان به ۳ بوته تقلیل یافت. تا مرحله استقرار گیاه (مرحله ۸ برگی)، آبیاری تمام تیمارها با استفاده از آب چاه و به میزان نیاز آبی گیاه انجام شد و سپس اعمال تیمارها صورت پذیرفت. وجین علف‌های هرز با دست و در طی ۴ مرحله انجام شد. در این پژوهش برای مبارزه با آفت مگس سفید (*Trialeurodes vaporariorum*) از سم ترکیبی دورسیان و کنفیدور با غلظت ۱ در هزار حجمی و با تناوب استفاده شد. دور آبیاری و عمق آبیاری در این طرح متغیر بود. برای تعیین میزان آب آبیاری در هر نوبت از میزان تبخیر-تعرق گیاه کینوا (که بر اساس تبخیر-تجمعی از تشتت تبخیر موجود در گلخانه تعیین شد) استفاده گردید. پس از مشخص شدن درصد وزنی رطوبت خاک در ظرفیت زراعی مزرعه، میزان رطوبت موجود در خاک برای اعمال تیمارهای رطوبتی مختلف مشخص شده و با قرائت روزانه دستگاه TDR ساخت شرکت Lutron تایوان مدل PMS-714 که از قبل برای این خاک کالیبره شده بود، دور آبیاری تعیین شد (جمالی و انصاری، ۱۳۹۸). تعیین نیاز آب شامل سه مرحله بود: تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0)، تعیین ضریب گیاهی (K_c)

جدول ۲- ضریب گیاهی، گیاه کینوا رقم (Talebnjad) Titicaca (and Sepaskhah, 2015)

مرحله رشد	میزان ضریب گیاهی
ابتدایی	۰/۵۵
میانی	۱/۲
انتهایی	۰/۷۵

به منظور تعیین شاخص تنش آبی که بیانگر وضعیت آب در گیاه بر اساس اختلاف دمای هوا و پوشش سبز گیاه است، از روش ایدسو و همکاران استفاده شد و برای این منظور دمای پوشش سبز گیاهی با استفاده از دماسنج مادون قرمز (مدل testo 830-T1)، دمای تر و خشک با استفاده از دماسنج تر و خشک در ساعت‌های ۸ تا ۱۴ هر یک ساعت یک بار در روزهای آفتابی و قبل از آبیاری برای تمامی تیمارهای مورد بررسی و از ۴ جهت اندازه‌گیری شد (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸؛ Idso et al., 1982؛ Sezen et al., 2014). در روش ایدسو برای بیان شاخص تنش آبی از رابطه (۳) استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاهی از تاریخ ۲۵ فروردین ۱۳۹۸ زمانی که گیاهان در شروع مرحله ساقه روی بودند، انجام گرفت و تا زمان گلدهی ۵ خرداد ۱۳۹۸ ادامه یافت.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{l,l}}{(T_c - T_a)_{u,l} - (T_c - T_a)_{l,l}} \quad (3)$$

که در آن $(T_c - T_a)_{l,l}$ اختلاف دمای پوشش سبز و هوا در شرایط بدون تنش است که بیانگر خط مبنای پایینی شاخص بوده و با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$(T_c - T_a)_{l,l} = a + b \times VPD \quad (4)$$

در رابطه فوق a و b ضرایب ثابت خط مبنای پایینی بوده که وابسته به نوع گیاه، رقم و اقلیم منطقه است (سعیدی نیا و همکاران، ۱۳۹۸؛ Colack and Yazar, 2017) و باید برای هر گیاه در منطقه مورد مطالعه تعیین شود. VPD نیز بیانگر کمبود فشار بخار هوا بوده و با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸).

$$VPD = 10 \times \exp\left[\frac{16.87T_a - 116.9}{T_a + 273.3}\right] \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (5)$$

در رابطه (۵) مقادیر T_a و RH به ترتیب بیانگر دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی (درصد) است. به منظور اندازه‌گیری دمای هوا از دماسنج خشک و برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی از روش غیرمستقیم و دماسنج تر و خشک استفاده شد. در رابطه (۳) پارامتر $(T_c - T_a)_{u,l}$ بیانگر خط مبنای بالایی شاخص یا خط تنش کامل است که بیانگر بیشترین میزان اختلاف دمای هوا و پوشش سبز است که در آن توقف کامل تعرق گیاه رخ داده و این عمل مستقل از کمبود فشار بخار هوا است (رابطه ۶، قربانی و برومند نسب،

۱۳۹۵) $(T_c - T_a)_m$ نیز بیانگر اختلاف دمای پوشش سبز و هوا است.

$$(T_c - T_a)_{u,l} = a + |b \times VPG| = h \quad (6)$$

که در آن پارامترهای a ، b و VPG به ترتیب بیانگر ضرایب تجربی در معادله خط مبنای پایینی و شیب فشار بخار اشباع برحسب میلی بار است. شیب فشار بخار اشباع از رابطه (۷) محاسبه می‌گردد که در آن مقادیر e_a^* و e_c^* به ترتیب بیانگر فشار بخار اشباع هوا در دمای T_a (رابطه ۸) و فشار بخار اشباع هوا در دمای $T_c = T_a + a$ (Heydari et al., 2019).

$$VPG = e_c^* - e_a^* \quad (7)$$

$$e_a^* = 0.0446 - 0.00064 \times (1.8T_a + 48) + 33.864 \times (0.00738 * T_a + 0.8072)^8 \quad (8)$$

در تاریخ ۵ تیر ۱۳۹۸ گیاهان کف بری شده و صفات مورفولوژیکی و عملکردی گیاه (وزن خشک برگ، ساقه، ریشه و سنبله؛ زیست‌توده، عملکرد دانه و شاخص برداشت) برداشت شد. از رابطه (۹) شاخص برداشت محاسبه گردید. جهت محاسبه کارایی مصرف آب نیز از رابطه (۱۰) استفاده شد.

$$\text{عملکرد دانه} \quad (9) \\ \text{شاخص برداشت} = \frac{\text{عملکرد دانه}}{\text{عملکرد بیولوژیکی}}$$

$$\text{کارایی مصرف آب} = \frac{\text{عملکرد دانه}}{\text{حجم آب مصرفی}} \quad (10)$$

برای تجزیه و تحلیل آماری صفات مورد بررسی از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده شد و آزمون مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون LSD انجام شد. نمودارها و جداول نیز با استفاده از Excel ترسیم شد.

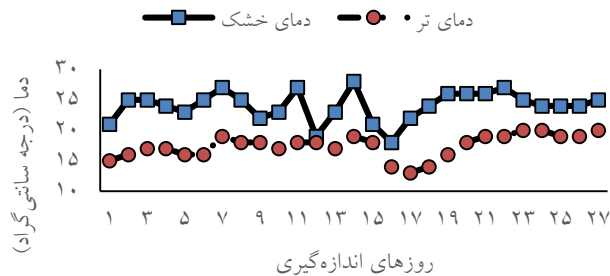
نتایج و بحث

در شکل (۱) دمای تر و خشک قرائت‌شده در طول دوره رشد، ارائه شده است. در شکل (۲) موقعیت خط مبنای پایینی تنش در شرایط آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه که با استفاده از داده‌های دمایی برداشت‌شده در طول دوره رشد گیاه ترسیم شده، ارائه شده است.

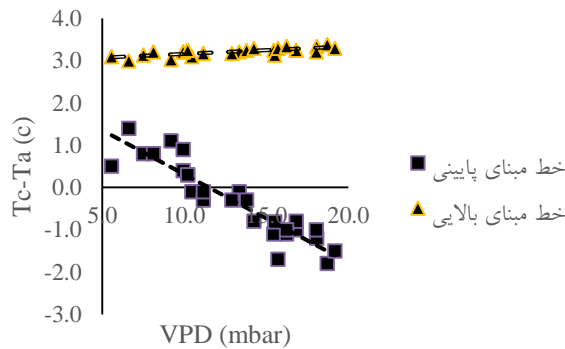
نتایج مطابق شکل (۲) نشان داد که شیب خط مبنای پایینی برای طول دوره رشد گیاه منفی بوده است یا به عبارت دیگر با افزایش میزان کمبود فشار بخار هوا (در محدوده ۵ تا ۲۰ میلی بار متغیر است)، قدر مطلق اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا افزایش یافته است. بر اساس شکل (۲) مقادیر a ، b و مقدار خط مبنای بالایی به ترتیب

مقدار خط مبنای بالایی به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۲۴ و ۳/۲۱ به دست آمد. بر اساس شکل (۳) مقادیر a و b و مقدار خط مبنای بالایی به ترتیب ۰/۰۸، ۱/۰۱ و ۱/۳۲ به دست آمد.

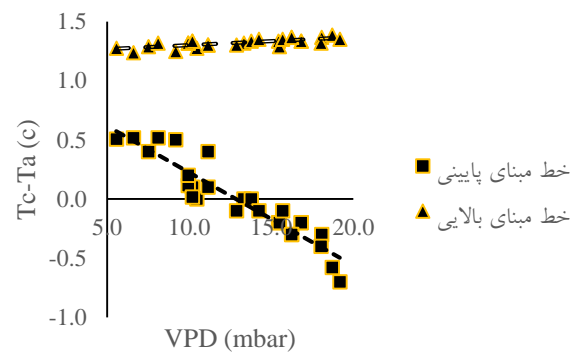
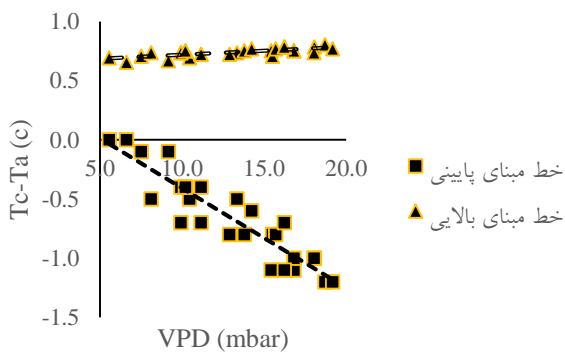
مقدار خط مبنای بالایی به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۵۱ و ۰/۷۴ به دست آمد. بر اساس شکل (۴) مقادیر a، b و مقدار خط مبنای بالایی به ترتیب



شکل ۱- دمای تر و خشک اندازه‌گیری شده در محیط گلخانه



شکل ۲- نمودار خط مبنای بالایی و پایینی برای گیاه کینوا تحت آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی

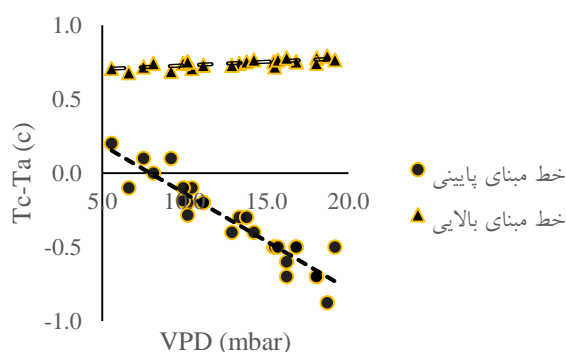


شکل ۳- نمودار خط مبنای بالایی و پایینی برای گیاه کینوا تحت آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی

شکل ۴- نمودار خط مبنای بالایی و پایینی برای گیاه کینوا تحت آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی

در تیمارهای ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است و با توجه به نتایج این اشکال، دمای پوشش سبز (درجه حرارت برگ) به میزان آب آبیاری بستگی دارد.

بر اساس شکل (۵) مقادیر a، b و مقدار خط مبنای بالایی به ترتیب ۰/۰۸، ۰/۴۳ و ۰/۷۴ به دست آمد. بر اساس نتایج شکل‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ با توجه به هم‌زمانی آبیاری و شرایط اقلیمی یکسان، موقعیت خط مبنای پایینی باهم متفاوت است که بیانگر تنش بیشتر



شکل ۵- نمودار خط مبنای بالایی و پایینی برای گیاه کینوا تحت آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی

پوشش سبز گیاهی به دلیل احتمال بروز خطا اندازه‌گیری نشد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ قربانی و برومند نسب، ۱۳۹۵). عوامل متعددی نظیر اقلیم، نوع خاک و گیاه منجر به ایجاد اختلاف در مقادیر شیب و عرض از مبدأ در تیمارهای موردبررسی نسبت به مطالعات گذشته شده است (نخجوانی مقدم و قهرمان، ۱۳۸۷). سعیدی نیا و همکاران (۱۳۹۸) بر روی ذرت علوفه‌ای نیز تغییرات ضرایب معادله خط مبنای پایینی را در طول فصل رشد گیاه گزارش کردند. بر اساس نظر احمدی و همکاران (۱۳۹۶) تغییر در این ضرایب به دلیل میزان تعرق و پتانسیل جذب گیاه در شرایط مختلف محیطی است.

با توجه به نتایج جدول (۳) با افزایش تنش آبی بر میزان شاخص CWSI افزوده شده است. با توجه به مقادیر متوسط شاخص CWSI گیاه کینوا موردبررسی در این پژوهش، در طول دوره رشد در آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی بیشترین میزان این شاخص (۰/۶۲) و کمترین میزان آن نیز در تیمار آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی (۰/۰۱) مشاهده شد. دلیل افزایش CWSI در شرایط تنشی می‌تواند کاهش تعرق گیاه به دلیل بسته شدن روزنه‌ها باشد که خود سببی برای افزایش دمای پوشش سبز و درجه حرارت برگ است (سیفی و همکاران، ۱۳۹۳).

در شرایط فراهمی آب در ناحیه توسعه ریشه‌ها، افزایش میزان VPD بر میزان تبخیر-تعرق گیاه افزوده و منجر به کاهش دمای پوشش سبز و خنک شدن گیاه می‌شود. دلیل تفاوت در خطوط بالایی و پایینی در این پژوهش با پژوهش خورسند و همکاران (۱۳۹۸) و سعیدی نیا و همکاران (۱۳۹۸)، می‌تواند اختصاصی بودن این خطوط برای گیاهان مختلف باشد، همچنین می‌توان این‌گونه بیان کرد که در هنگام بروز تعرق حداکثری این گیاه با سازوکار مختص خود در برابر تغییرات محیطی واکنش نشان داده و نسبت به سایر گیاهان تغییرات تعرق متفاوتی دارد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۶). به‌منظور ترسیم خطوط مبنای بالایی و پایینی تنش در کل دوره رشد از روش ایدسو استفاده شده و اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا در مقابل کمبود فشار بخار اشباع رسم شده است، پس از ترسیم خطوط مبنای مذکور معادلات رگرسیونی آن استخراج شده و در جدول (۳) ارائه شده است. برای نشان دادن اثر کم‌آبیاری بر خط مبنای پایینی تنش، در هر یک از تیمارهای موردبررسی خط مبنای پایینی ترسیم شد و معادلات رگرسیونی آن استخراج گردید. ضرایب a و b در معادله خط مبنای پایینی در طول دوره رشد گیاه در شرایط مختلف رطوبتی متغیر بوده و بین ۰/۰۶- و ۰/۲۱- (ضریب a) و ۰/۴۳ و ۲/۴ (ضریب b) متغیر است. بنا به پژوهش‌های گذشته در ابتدای مرحله رشد گیاه، دمای

جدول ۳- معادلات خط مبنای پایینی و بالایی و شاخص تنش آبی متوسط در طول دوره رشد گیاه کینوا در تیمارهای موردبررسی

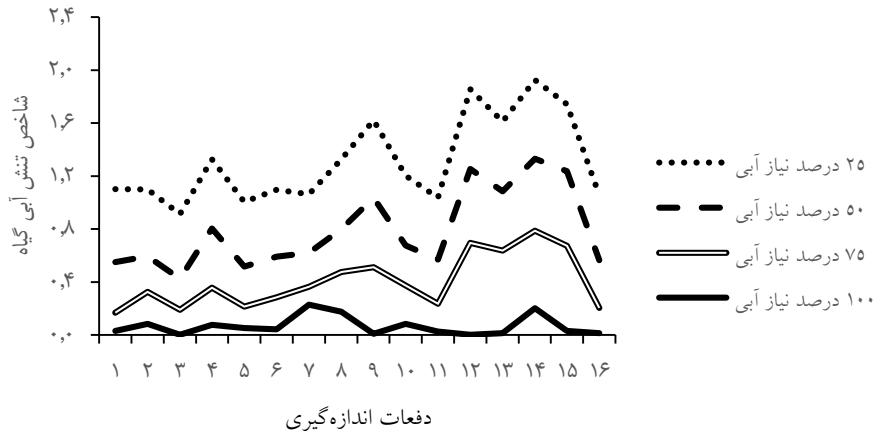
تیمار سطوح مختلف آبی	معادله خط مبنای پایینی	معادله خط مبنای بالایی	R ²	CWSI
۱۰۰ درصد نیاز آبی	$(T_c - T_a)_{li} = -0.21 (VPD) + 2.4$	$(T_c - T_a)_{ui} = 3.21$	۰/۸۶	۰/۰۵
۷۵ درصد نیاز آبی	$(T_c - T_a)_{li} = -0.08 (VPD) + 1.01$	$(T_c - T_a)_{ui} = 1.32$	۰/۸۷	۰/۱۹
۵۰ درصد نیاز آبی	$(T_c - T_a)_{li} = -0.06 (VPD) + 0.51$	$(T_c - T_a)_{ui} = 0.74$	۰/۵۴	۰/۴۸
۲۵ درصد نیاز آبی	$(T_c - T_a)_{li} = -0.08 (VPD) + 0.43$	$(T_c - T_a)_{ui} = 0.74$	۰/۸۷	۰/۷۲

بیانگر یکسان نبودن خطوط مبنای پایینی برای این گیاه (در شرایط اقلیمی یکسان و سطوح مختلف آبیاری) است. بر اساس داده‌های این

بر اساس جدول (۳) معادلات خطوط حداقل تنش (خط مبنای پایینی) در مقادیر عرض از مبدأ و شیب دارای تفاوت می‌باشند که

فرض شود. در شکل (۶) تغییرات شاخص تنش آبی در طول دوره رشدی گیاه ارائه شده است. با استفاده از رابطه (۱۱) برای تعیین زمان آبیاری از طریق شاخص CWSI برای تیمارهای آبیاری ۱۰۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه و ارائه شده است.

جدول خط حداکثر تنش (خط مبنای بالایی) در تیمارهای آبیاری به میزان ۲۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه نسبت به تیمار بدون تنش کمتر است که خود بیانگر قطع شدن تعرق توسط گیاه در اختلاف دمای کمتر (اختلاف دمای پوشش سبز و هوا) است، از این رو مطابق با این نتایج باید دور آبیاری در این تیمارها نسبت به دو تیمار دیگر کمتر



شکل ۶- روند تغییرات شاخص تنش آبی در طول دوره رشد گیاه

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_a - (T_c - T_a)_{l,l}}{(T_c - T_a)_{u,l} - (T_c - T_a)_{l,l}} \quad (11)$$

$$(T_c - T_a)_a = 2.41 - 0.21 VPD (5 \leq VPD \leq 20) \text{ (100 درصد نیاز آبی گیاه)} \quad (12)$$

$$(T_c - T_a)_a = 0.62 - 0.03 VPD (5 \leq VPD \leq 20) \text{ (25 درصد نیاز آبی گیاه)} \quad (13)$$

بود. بر اساس جدول (۵) بیشترین و کمترین میزان CWSI در تیمارهای ۲۵ درصد نیاز آبی (۰/۷۲) و ۱۰۰ درصد نیاز آبی (۰/۰۵) مشاهده شد. کاهش آب مصرفی و در نتیجه کاهش تعرق، باعث افزایش دمای گیاه و افزایش شاخص تنش آبی گیاه شده است که با نتایج پژوهش کلاک و همکاران بر روی کینوا مطابقت دارد (Çolak et al., 2021).

شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)، شاخص برداشت (HI)، عملکرد دانه (GY)، کارایی مصرف آب (WUE)، زیست توده (B)، وزن خشک برگ (LDW)، ساقه (SDW)، ریشه (RDW)، سنبله (PDW)

به منظور تعیین زمان آبیاری گیاه کینوا بر اساس روابط ۱۲ و ۱۳، در بین ساعت‌های ۱۱ تا ۱۴ میزان VPD تعیین و با استفاده از این روابط مقدار $(T_c - T_a)_a$ تعیین شده و در صورتی که مقدار آن از مقدار $(T_c - T_a)_m$ کمتر بود، زمان آبیاری گیاهان فرارسیده است و در غیر این صورت، اگر مقدار اختلاف دمای مجاز از مقدار اختلاف دمای اندازه‌گیری شده بیشتر بود، هنوز زمان آبیاری نشده است. بر اساس جدول (۴)، سطوح مختلف آبیاری بر شاخص تنش آبی، شاخص برداشت، عملکرد دانه، کارایی مصرف آب، زیست توده، وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه و وزن خشک سنبله در سطح احتمال یک درصد و بر وزن خشک ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار

جدول ۴- تجزیه واریانس صفات عملکرد دانه، اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و شاخص تنش آبی گیاه کینوا

میانگین مربعات									درجه آزادی	منابع تغییرات
PDW	RDW	SDW	LDW	B	WUE	GY	HI	#CWSI		
**۳۹/۳	*۰/۴۹	**۱۱/۷	**۲۰/۹	**۲۲/۲	**۰/۲۸	**۳۶/۳	**۶۴/۹	**۰/۲۶	۳	آبیاری
۰/۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۲	۰/۹	۰/۰۰۵	۰/۲	۰/۹	۰/۰۰۱	۸	خطا
۳/۷	۸/۲	۵/۳	۵/۲	۳/۲	۵/۶	۴/۹	۳/۹	۷/۵	-	ضریب تغییرات

***، ** و * به ترتیب بیانگر معنی‌داری در سطح یک درصد، معنی‌داری در سطح ۵ درصد و عدم معنی‌داری است.

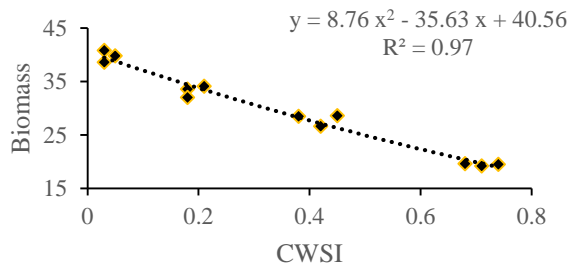
جدول ۵- مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه، اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و شاخص تنش آبی گیاه کینوا در شرایط اعمال تنش آبی

GY	PDW	RDW	SDW	LDW	B	WUE	HI	CWSI	ترکیبات تیماری
g/plant									
Kg/m ³									
۱۲/۳۸ a	۱۶/۸ a	۲/۸۳ a	۸/۸ a	۱۱/۳ a	۳۹/۷ a	-۰/۹۳ d	۳۲/۲ a	-۰/۰۴ d	۱۰۰ درصد نیاز آبی
۷/۷۲ b	۱۳/۹ b	۲/۴۵ b	۷/۱۷ b	۹/۶ b	۳۲/۲ b	۱/۱۱ c	۲۲/۴ b	-۰/۱۹ c	۷۵ درصد نیاز آبی
۵/۸۸ c	۱۰/۹ c	۲/۳۳ b	۶/۵۷ b	۸/۱ c	۲۷/۹ c	۱/۲۷ b	۲۱/۱ b	-۰/۴۲ b	۵۰ درصد نیاز آبی
۴/۳۶ d	۸/۴ d	۱/۸۷ c	۴/۰۴ c	۵/۱ d	۱۹/۴ d	۱/۶۵ a	۲۲/۳ b	-۰/۷۱ a	۲۵ درصد نیاز آبی
-۰/۷	-۰/۹	-۰/۳۷	-۰/۶۶	-۰/۸۵	۱/۸	-۰/۱۳	۱/۸	-۰/۰۵	LSD (۰/۰۵)

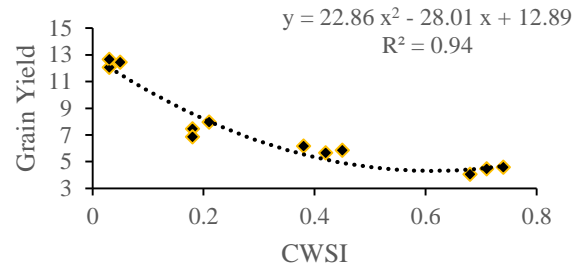
حروف مشترک در ستون‌ها بیانگر عدم معنی‌داری در مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال ۵ درصد است.

افزایش شاخص تنش آبی کاهش یافته است و در شاخص تنش آبی به میزان ۰/۶۱ کمترین میزان عملکرد دانه (۴/۳۱ گرم در بوته) مشاهده شد. بر اساس نتایج این شکل زیست‌توده نیز در شرایط افزایش شاخص تنش آبی، روند نزولی را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج این شکل شاخص برداشت نیز در شرایط افزایش شاخص تنش آبی، روند خاصی نداشته است. در شاخص تنش آبی به میزان ۰/۴۷ بر اساس شکل (۷) کمترین میزان شاخص برداشت (۱۹/۵۹ درصد) مشاهده شد. برخی از محققین بر این عقیده‌اند گیاه جهت کاستن از میزان تعرق خود، کاهش سطح برگ داده که اولین مکانیسم گیاه پس از مواجهه با شرایط تنشی است تا آب کمتری از دست بدهد (Burnett et al., 2005; Alishah et al., 2006; Baghalian et al., 2011). با کاهش رشد سلول‌ها، اندازه و توسعه اندام هوایی و ریشه محدود شده و به تبع آن کاهش جذب نور نیز اتفاق می‌افتد. پی کاهش جذب نور، از ظرفیت کل فتوسنتزی گیاه نیز کاسته می‌شود و فرآورده‌های فتوسنتزی کمتری در این شرایط تولید شده و متعاقب آن در عملکرد گیاه نقصان ایجاد می‌کند (Okwany et al., 2012). کاهش میزان فتوسنتز به علت تخریب رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و همچنین مصرف کربوهیدرات‌های تولید برای تولید اسمولیت‌ها در شرایط تنش، از علت‌های کاهش وزن خشک اندام‌های مختلف به شمار می‌رود (Ashraf and Foolad, 2007). نتایج این پژوهش با نتایج جمالی و همکاران (۱۳۹۸) و آوار بلترن و همکاران بر روی کینوا مطابقت داشت (Alvar-Beltrán et al., 2019). در شرایط تنش آبی بر اساس نظر برخی محققین کلروفیل و هدایت روزنه‌ای گیاه کاهش یافته و پیری زودرس برگ‌ها را به همراه دارد که خود منجر به کاهش میزان دی‌اکسید کربن و فتوسنتز می‌شود و در پی خود کاهش عملکرد دانه را نیز به همراه دارد (تدین و کریم‌زاده سورشجانی، ۱۳۹۸؛ Naz et al., 2020).

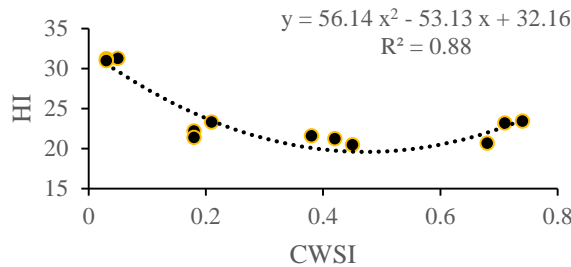
مطابق نتایج جدول (۵)، شاخص برداشت در تیمارهای ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب با ۳۲/۲ و ۲۱/۱ درصد، به ترتیب بیشترین و کمترین میزان را نشان داد. بر اساس نتایج این جدول، بیشترین مقدار زیست‌توده، وزن خشک برگ، ساقه، ریشه و سنبله به ترتیب با ۳۹/۷، ۱۱/۳، ۸/۸، ۲/۸۳، ۱۶/۸ گرم در بوته در تیمار آبیاری به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی مشاهده شد، همچنین کمترین میزان این صفات نیز به ترتیب با ۱۹/۴ گرم در بوته (زیست‌توده)، ۵/۱ گرم در بوته (وزن خشک برگ)، ۴/۰۴ گرم در بوته (وزن خشک ساقه)، ۱/۸۷ گرم در بوته (وزن خشک ریشه) و ۸/۴ گرم در بوته (وزن خشک سنبله) در تیمار آبیاری به میزان ۲۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد. بر اساس جدول (۵)، بیشترین و کمترین میزان کارایی مصرف آب در تیمارهای ۲۵ درصد نیاز آبی (با ۱/۶۵ کیلوگرم در مترمکعب) و ۱۰۰ درصد نیاز آبی (با ۰/۹۳ کیلوگرم در مترمکعب) مشاهده شد، در صفت عملکرد دانه نیز مطابق نتایج این جدول بیشترین (۱۲/۳۸ گرم در بوته) و کمترین (۴/۳۶ گرم در بوته) مقدار در تیمارهای ۱۰۰ درصد نیاز آبی و ۲۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد. بر اساس نتایج جدول (۵) در صفت شاخص برداشت بین تیمارهای ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد در مقایسه میانگین‌ها مشاهده نشد. در وزن خشک ساقه و ریشه بین تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد در مقایسه میانگین‌ها مشاهده نشد. استفاده از ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه در آبیاری در مقایسه با تیمار شاهد منجر به کاهش ۳۷/۶، ۵۲/۵ و ۶۴/۸ درصد در عملکرد دانه شد. تیمارهای ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد نیاز آبی گیاه منجر به بروز تغییراتی به میزان ۳۰/۴-، ۳۴/۵- و ۳۰/۷- درصد در شاخص برداشت، ۱۶/۴-، ۲۹/۷- و ۵۱/۱- درصد در زیست‌توده و ۱۹/۴+، ۳۶/۶+ و ۷۷/۴+ درصد در کارایی مصرف آب شد (لازم به ذکر است که + و - بیانگر افزایش و کاهش در صفت موردبررسی است). بر اساس نتایج شکل (۷)، عملکرد دانه در شرایط



ب



الف



ج

شکل ۷- رابطه بین شاخص تنش آبی با الف) عملکرد دانه، ب) زیست توده، ج) شاخص برداشت

شرایط مختلف کشت و در مزرعه نیز برای این محصول در مطالعات آبی، تحقیقاتی انجام شود.

نتیجه‌گیری

شاخص CWSI بیانگر وضعیت آب در دسترس گیاه بوده و با مقدار آب مصرفی گیاه دارای رابطه عکس است. همچنین به دلیل اهمیت مقدار آب جهت آبیاری گیاه با استفاده از روابط خطوط مبنا به دست آمده در طول فصل زراعی برای تیمار شاهد می‌توان برای تعیین زمان آبیاری گیاه کینوا استفاده کرد. بر اساس نتایج این پژوهش، همچنین بیشترین میزان از شاخص CWSI در تیمار T₄ (با ۰/۷۲) و کمترین میزان در تیمار T₁ (با ۰/۰۵) مشاهده شد. بر اساس نتایج این پژوهش برای دستیابی به بیشترین عملکرد دانه در بوته، پس از رسیدن به CWSI=0.05 باید گیاهان آبیاری شوند، همچنین نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه در CWSI برابر با ۰/۰۵ و ۰/۶۱ به دست آمد. برای تعیین زمان آبیاری در تیمار شاهد رابطه $(T_c - T_a)_a = 2.41 - 0.21 VPD$ ($5 \leq VPD \leq 20$) به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر در شرایط محدودیت آب (T₂) و آبیاری کامل (T₁) برای حصول عملکرد دانه مناسب در CWSI کمتر یا مساوی با ۰/۱۹ و ۰/۰۵ باید گیاهان آبیاری شوند. علاوه بر این در شرایط محدودیت آب تیمار T₂ جهت تعیین شاخص تنش آبی و برنامه‌ریزی آبیاری انتخاب شد. شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) بر اساس نتایج این تحقیق به عنوان یک ابزار مناسب می‌تواند جهت برنامه‌ریزی آبیاری با توجه به اهداف مختلف مدیریتی سیستم مورد استفاده قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود با توجه به کارایی شاخص تنش آبی گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری از این شاخص در

منابع

- احمدی، ح.، نصرالهی، ع.ج.، شریفی‌پور، م. و عیسوند، ح. ۱۳۹۶. برنامه‌ریزی آبیاری سویا با استفاده از اختلاف دمای هوا و پوشش گیاهی. مدیریت آب و آبیاری. ۷(۱): ۱۲۱-۱۳۴.
- احمدی، ح.، نصرالهی، ع.ج.، شریفی‌پور، م. و عیسوند، ح. ۱۳۹۷. تعیین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) سویا برای مدیریت آبیاری جهت حداکثر عملکرد و بهره‌وری آب. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۸(۴): ۱۲۱-۱۳۱.
- امیری، م.ج.، عابدی کوپایی، ج. و اسلامیان، س.س. ۱۳۹۰. ارزیابی استفاده از تشت‌های تبخیر در محیط گلخانه. روابط خاک و گیاه. ۲(۱): ۶۳-۷۳.
- بیرامی، ح.، رحیمیان، م.ج.، صالحی، م. و یزدانی بیوکی، ر. ۱۳۹۸. تأثیر سطوح مختلف شوری آب آبیاری بر عملکرد و اجزاء عملکرد کینوا در کشت بهاره. مجله تولید گیاهان زراعی. ۱۲(۴): ۱۱۱-۱۲۰.
- تدین، م.ر. و کریم‌زاده سورشجانی، ا.ه. ۱۳۹۸. تأثیر ژئولیت بر شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیک ارزن پروسو تحت مدیریت کم‌آبیاری. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۲(۲): ۴۱۵-۴۲۷.
- جلیلیان، س.، سلطانی محمدی، ا. و برومندنسب، س. ۱۳۹۹. برنامه‌ریزی آبیاری ذرت دانه‌ای با استفاده از شاخص CWSI در

- شرایط اقلیمی اهواز، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۵): ۱۸۴۲-۱۸۵۲.
- جمالی، ص.، شریفان، ح.، هزارجریبی، ا. و سپهوند، ن. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر سطوح مختلف شوری بر جوانه‌زنی و شاخص‌های رشد دو رقم گیاه کینوا. حفاظت منابع آب و خاک. ۶(۱): ۸۷-۹۸.
- جمالی، ص. و انصاری، ح. ۱۳۹۸. اثر کیفیت آب و مدیریت آبیاری روی رشد و عملکرد گیاه کینوا. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳(۳): ۳۳۹-۳۵۱.
- جمالی، ص.، گلدانی، م. و زین‌الدین، س.م. ۱۳۹۸. بررسی اثر تنش آبی دوره‌ای بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه کینوا (رقم NSRCQ). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۶): ۱۶۸۷-۱۶۹۷.
- خشائی، ف.، بهمنش، ج.، رضوردی نژاد، و. و آزاد، ن. ۱۳۹۸. تأثیر مقدار آبیاری و تقسیط کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳(۴): ۶۰۱-۶۱۲.
- خورسند، ا.، رضوردی نژاد، و.، عسگرزاده، ح.، مجنون‌هی هریس، ا.، رحیمی، ا. و بشارت، س. ۱۳۹۸. برنامه‌ریزی آبیاری ماش سیاه بر اساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) تحت روش آبیاری قطره‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۹): ۲۱۲۵-۲۱۳۸.
- خیری شلمزاری، ک.، سلطانی محمدی، ا.، برومند نسب، س. و حقیقتی، ب. ۱۳۹۸. ارزیابی شاخص تنش آبی گیاه برای سیب‌زمینی تحت رژیم‌های متفاوت آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. مدیریت آب و آبیاری. ۱۹(۱): ۲۹-۴۲.
- سعیدی نیا، م.، حسینیان، س.ح.، بیرانوند، ف. و نصراللهی، ع.ح. ۱۳۹۸. تأثیر تنش آبی بر عملکرد و دمای برگ گیاه مرزه و تعیین شاخص CWSI. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳(۲): ۲۳۷-۲۴۷.
- سیفی، ا.، میر لطیفی، س.م.، دهقانی سانجی، ح. و ترابی، م. ۱۳۹۳. تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا. مدیریت آب و آبیاری. ۱۴(۱): ۱۲۳-۱۳۶.
- صمد زاده، ع.، زمانی، غ. و فلاحی، ح. ۱۳۹۹. امکان‌سنجی تولید گیاه جدید کینوا در شرایط اقلیمی خراسان جنوبی تحت تأثیر تاریخ و تراکم کاشت. پژوهش‌های کاربردی زراعی. ۳۳(۱): ۸۲-۱۰۴.
- فتاحی دولت‌آبادی، خ.، بابا زاده، ح.، نجفی، پ. و صدقی، ح. ۱۳۹۸. برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای (SC-701) با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه در شمال اصفهان. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۲(۲): ۱۰۵-۱۱۸.
- قربانی، م. و برومند نسب، س. ۱۳۹۵. بررسی اثر شوری آب در آبیاری سطحی بر میزان شاخص تنش آبی گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت تابستانه. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۷(۱): ۵۴-۶۵.
- قربانی، م.، برومند نسب، س. و سلطانی محمدی، ا. ۱۳۹۵. بررسی اثر شوری آب در آبیاری بارانی بر میزان شاخص CWSI برای سه رقم ذرت تحت رژیم‌های آبیاری قطره‌ای (اراضی شمال خوزستان). حفاظت منابع آب و خاک. ۹(۴): ۵۷-۷۰.
- نخجوانی‌مقدم، م.م. و قهرمان، ب. ۱۳۸۷. بررسی اثر دمای پوشش سبز بر زمان‌بندی آبیاری و عملکرد گیاه گندم زمستانه. آب و خاک. ۱۱۲(۱): ۱۰۱-۱۱۲.
- نصراللهی، ع.ح.، احمدی، ح.، سبزواری، ی. و نوری، س. ۱۳۹۹. مقایسه تغییرات شاخص تنش آبی گیاه لوبیاچیتی در شرایط آبیاری سطحی و تیپ با استفاده از دماسنج مادون‌قرمز. علوم آب و خاک. ۲۴(۲): ۱۳-۲۶.
- نوری، س.، نصراللهی، ع.ح.، ملکی، ع. و شریفی‌پور، م. ۱۳۹۹. برآورد میزان رطوبت خاک با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه جهت مدیریت آبیاری لوبیاچیتی. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۱): ۱۳۶-۱۴۵.
- Alishah, H.M., Heidari, R., Hassani, A., and Dizaji, A., 2006. Effect of water stress on some morphological and biochemical characteristics of purple basil. *Journal of Biological Sciences* 6(4): 763-767.
- Alvar-Beltrán, J., Saturnin, C., Dao, A., Dalla Marta, A., Sanou, J., and Orlandini, S. 2019. Effect of drought and nitrogen fertilisation on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under field conditions in Burkina Faso. *Italian Journal of Agrometeorology* 1: 33-43.
- Anda, A., Soos, G., Menyhart, L., Kucserka, T., and Simon, B. 2020. Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. *Field Crops Research* 245: 107673.
- Ashraf, M., and Foolad, M.R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany* 59(2): 206-216.
- Baghalian, K., Abdoshah, Sh., Khalighi-Sigaroodi, F., and Paknejad, F. 2011. Physiological and phytochemical response to drought stress of german chamomile (*Matricaria recutita* L.). *Plant Physiology and Biochemistry* 49(2): 201-207.
- Bonales-Alatorre, E., Pottosin, I., Shabala, L., Chen, Z. H., Zeng, F., Jacobsen, S. E., and Shabala, S. 2013. Differential activity of plasma and vacuolar membrane transporters contributes to genotypic differences in salinity tolerance in a halophyte species, *Chenopodium quinoa*. *International Journal of Molecular Sciences* 14(5): 9267-9285.
- Burnett, S.E., Pennisi, S.V., Thomas, P.A., and Iersel, M.W.V. 2005. Controlled drought affects morphology and anatomy of *salvia splendens*. *Journal of American Society and Horticultural Science* 130(5): 775-781.
- Çolak, Y.B., and Yazar, A. 2017. Evaluation of crop

2021. Evaluating the Performance of Self-Organizing Maps to Estimate Well-Watered Canopy Temperature for Calculating Crop Water Stress Index in Indian Mustard (*Brassica juncea*). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 147(2): 04020040.
- Naz, H., Akram, N.A., and Kong, H. 2020. Assessment of secondary metabolism involvement in water stress tolerance of Quinoa subjected to water regimes. *Pakistan Journal of Botany* 52(5): 1553-1559.
- Okwany, R.O., Peters, T.R., Ringer, K.L., and Walsh, D.B. 2012. Sustained deficit irrigation effects on peppermint yield and oil quality in the semi-arid pacific northwest, USA. *Applied Engineering in Agriculture* 28(4): 551-558.
- Ru, C., Hu, X., Wang, W., Ran, H., Song, T., and Guo, Y. 2020. Evaluation of the Crop Water Stress Index as an Indicator for the Diagnosis of Grapevine Water Deficiency in Greenhouses. *Horticulturae* 6(4): 86.
- Ruiz-Carrasco, K., Antognoni, F., Coulibaly, A. K., Lizardi, S., Covarrubias, A., Martínez, E. A., ... and Zurita-Silva, A. 2011. Variation in salinity tolerance of four lowland genotypes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as assessed by growth, physiological traits, and sodium transporter gene expression. *Plant Physiology and Biochemistry* 49(11): 1333-1341.
- Schmöckel, S.M. (Ed.). 2021. *The Quinoa Genome*. Springer Nature.
- 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. *Agricultural water management* 143: 59-70.
- Shellie, K.C., and King, B.A. 2020. Application of a Daily Crop Water Stress Index to Deficit Irrigate Malbec Grapevine under Semi-Arid Conditions. *Agriculture* 10(11): 492.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., and Raes, D. 2012. *Crop yield response to water* (Vol. 1028). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Talebnejad, R., and Sepaskhah, A.R. 2015. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter. *Agricultural water management* 148: 177-188.
- Yun, S. K., Kim, S. J., Nam, E. Y., Kwon, J. H., Do, Y. S., Song, S. Y., ... and Shin, H. 2020. Evaluation of Water Stress Using Canopy Temperature and Crop Water Stress Index (CWSI) in Peach Trees. *Protected Horticulture and Plant Factory* 29(1): 20-27.
- water stress index on Royal table grape variety under partial root drying and conventional deficit irrigation regimes in the Mediterranean Region. *Scientia horticulturae* 224: 384-394.
- Çolak, Y. B., Yazar, A., Alghory, A., and Tekin, S. 2021. Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science* 39(1): 81-100.
- Gonzalez-Dugo, V., Testi, L., Villalobos, F. J., López-Bernal, A., Orgaz, F., Zarco-Tejada, P. J., and Fereres, E. 2020. Empirical validation of the relationship between the crop water stress index and relative transpiration in almond trees. *Agricultural and Forest Meteorology* 292: 108128.
- Heydari, A., Bijanzadeh, E., Naderi, R., and Emam, Y. 2019. Quantifying water stress in canola (*Brassica napus* L.) using crop water stress index. *Iran Agricultural Research* 38(1): 1-8.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter Jr, P.J., Reginato, R. J., and Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural meteorology* 24: 45-55.
- Idso, S. B., Reginato, R. J., and Radin, J. W. 1982. Leaf diffusion resistance and photosynthesis in cotton as related to a foliage temperature based plant water stress index. *Agricultural Meteorology* 27(1-2): 27-34.
- Jacobsen, S.E. 2003. The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food reviews international* 19(1-2): 167-177.
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, S., and Niyogi, D. 2021. Assessing Crop Water Stress Index of Citrus Using In-Situ Measurements, Landsat, and Sentinel-2 Data. *International Journal of Remote Sensing* 42(5): 1893-1916.
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S.A., Amirfattahi, R. and Ehsanzadeh, P. 2018. Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management* 204: 222-233.
- 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. *Agricultural Water Management* 243: 106459.
- Kumar, N., Poddar, A., Shankar, V., Ojha, C.S.P., and Adeloje, A. J. 2020. Crop water stress index for scheduling irrigation of Indian mustard (*Brassica juncea*) based on water use efficiency considerations. *Journal of Agronomy and Crop Science* 206(1): 148-159.
- Kumar, N., Shankar, V., Rustum, R., and Adeloje, A. J.

Scheduling Quinoa Irrigation by Crop Water Stress Index

S. Jamali¹, H. Ansari^{2*}

Received: May.23, 2021

Accepted: Aug.11, 2021

Abstract

An infrared thermometer can become a readily usable tool for crop agricultural water management since it allows a quick determination of canopy surface temperature that, as linked to transpiration, can give an idea of crop water status. This study aimed to calculate the crop water stress index (CWSI) of Quinoa. This study was conducted in a completely randomized design with four irrigation levels of 100 (T1), 75 (T2), 50 (T3), and 25 (T4) % of crop water requirements in three replications, and experimental treatments and measurements were mainly carried out during Quinoa growing season at 2017-2018 years. The results revealed that the highest of leaf, stem, root, inflorescence dry weights, and biomass by 11.3, 8.8, 2.8, 16.8, and 39.7 g were in the T1 treatment. Using the T2, T3, and T4 compared with T1 were decreased grain yield (by 37.6, 52.5, and 64.8%), harvest index (by 30.4, 34.5, and 30.7%), and Biomass (by 16.4, 29.7, and 51.1%). But, these treatments caused to WUE increase (by 19.4, 36.6, and 77.4%) compared with T1. CWSI correlated significantly ($P < 0.01$) and negatively with grain yield and biomass. Also, the results showed that the highest and lowest quinoa grain yield at average CWSI values of almost 0.05 and 0.61. Therefore, to achieve the highest grain yield in irrigation, the quinoa crop should be irrigated at 0.05 of the CWSI. The lowest CWSI values were observed in T1 (by 0.04) and the highest in T4 (by 0.72). In this study, the average CWSI was calculated in the days before irrigation in T1, T2, T3, and T4 treatments, and its values were 0.05, 0.19, 0.48, and 0.72, respectively. The results also revealed that with crop water requirement change from 100 to 75 percent, the CWSI was about 3.8 times higher. Accordingly, the CWSI can be used to plan irrigation. The best irrigation time is based on T1 treatment when $(T_c - T_a)_a = 2.41 - 0.21$ VPD ($5 \leq \text{VPD} \leq 20$).

Keywords: CWSI, Deficit irrigation, Leaf surface Temperature, Quinoa grain yield, Water use efficiency.

1- PhD Candidate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran

(* - Corresponding author: Ansary@um.ac.ir)