

کاربرد مقاومت روزنه‌ای، دمای پوشش سبز و شاخص تنش آبی محصول در تعیین زمان آبیاری ذرت

رضا سعیدی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۴/۲۷

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

*-مسئول مکاتبه، پست الکترونیکی: saeidi@org.ikiu.ac.ir

چکیده

به منظور بررسی حد مجاز جذب آب توسط گیاه ذرت در مراحل مختلف رشد و برنامه‌ریزی آبیاری، پژوهشی در دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه) به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. در تیمار شاهد نیاز آبی گیاه به طور کامل تأمین شد. اما تیمارهای تنش شامل اعمال تنش آبی (تا نقطه‌ی پژمردگی موقت)، در مراحل مختلف رشد ۶ برگ، ۱۲ برگ، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بود. در زمان اعمال تنش، مقاومت روزنه‌ای، دمای پوشش سبز و پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شد. بر اساس پاسخ پارامترهای گیاهی به تنش آبی، مقادیر آب سهل‌الوصول (RAW) و شاخص تنش آبی محصول (CWSI) تعیین شد. مقدار RAW و CWSI در مراحل رشد ۶ برگ، ۱۲ برگ، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب برابر با ۴۵، ۶۶، ۶۱ و ۷۰ درصد و ۰/۳۷، ۰/۵۴، ۰/۶۳ و ۰/۴۷ محاسبه شد. نتایج نشان داد حساسیت گیاه به تنش آبی، در مراحل مختلف رشد ذرت متفاوت بود. به طوری که مرحله‌ی گل‌دهی ذرت، حساس‌ترین مرحله به اعمال تنش آبی بود. لذا بر اساس واکنش‌های گیاهی، زمان شروع تنش آبی گیاه به عنوان زمان انجام آبیاری تعیین شد. همچنین با محاسبه حجم دقیق آب مورد نیاز گیاه و اعمال دوره‌های متغیر آبیاری در مراحل رشد، نیاز آبی گیاه تأمین و از تلفات آبیاری جلوگیری شد. در این شرایط با توجه به حساسیت متفاوت جذب آب در مراحل رشد گیاه، امکان افزایش بهره‌وری مصرف آب فراهم شد.

واژه‌های کلیدی: آب سهل‌الوصول، رطوبت خاک، حساسیت مراحل رشد، نیاز آبی، واکنش‌های گیاهی

Application of the Stomatal Resistance, Canopy Temperature and Crop Water Stress Index in Determining of Maize Irrigation Time

R. Saeidi^{1*}

Accepted: July 18, 2017

Received December 24, 2016

Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*Corresponding Author Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir

Abstract

In order to investigate the water uptake limit of maize at different growth stages and scheduling the irrigation time, research was conducted in Imam Khomeini International University as a factorial experiment in a randomized complete block design. In the control treatment, the water requirement of the plant was supplied. But stress treatments included applying water stress (up to the temporary wilting point), at growth stages of 6-leaf, 12-leaf, flowering and seeds doughing. In the period of water stress, stomatal resistance, canopy temperature and meteorological parameters were measured. Based on the response of crop parameters to water stress, the readily available water (RAW) and crop water stress index (CWSI) were determined. The amount of RAW and CWSI at the 6-leaf, 12-leaf, flowering and doughing stages, were calculated equal to 45, 66, 61 and 70 percent and 0.37, 0.54, 0.63, and 0.47, respectively. The results showed that crop sensitivity to water stress, was different at maize growth stages. The flowering stage of maize was the most sensitive stage to water stress. Therefore, based on crop response, the irrigation time was determined at the time of water stress. Also, by calculating the exact volume of water required and applying variable irrigation intervals during growth stages, the crop water requirement to be supplied and irrigation losses were prevented. Under these conditions, due to the different sensitivity of water absorption at growth stages, it was possible to increase the water productivity.

Keywords: Crop responses, readily available water, Sensitivity of growth stages, Soil moisture, Water requirement

مقدمه

دمای پوشش سبز گیاه (T_c^1) می‌باشد که افزایش مقدار آن از دمای هوا (T_a^2)، نشان‌دهنده ورود به تنش آبی و کاهش تعرق در گیاه است. لالور و کورنیک (۲۰۰۲) در پژوهشی گزارش کردند زمانی که دمای پوشش سبز گیاه نرت به مقدار یک تا چهار درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای هوا باشد، تعرق گیاه به‌طور کامل و فتوسنتز به‌خوبی انجام می‌گیرد. ولی اگر دمای برگ به مقدار چهار تا شش درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای هوا باشد، تعرق، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و در دماهای بالاتر به‌طور کامل متوقف می‌شود. اشارات و

کاهش منابع آب شیرین در بخش کشاورزی و افزایش نیاز بشر به تولیدات گیاهی، باعث شد نظر پژوهش‌گران بخش آبیاری به مدیریت بهینه مصرف آب معطوف گردد. تشخیص دقیق زمان آبیاری، یکی از راه‌کاری جلوگیری از هدررفت آب و تأمین به‌موقع نیاز آبی گیاهان به‌شمار می‌رود. احمدی و همکاران (۲۰۱۷) اعلام کردند که یک برنامه‌ریزی آبیاری مناسب، برنامه‌ای است که بر مبنای بررسی وضعیت آب در گیاه توسط شاخص‌های گیاهی استوار باشد. یکی از این شاخص‌ها

همکاران (۱۹۸۳) در مطالعه خود اعلام کردند به طور کلی مقدار دمای پوشش سبز گیاه تحت تأثیر عواملی از قبیل سرعت باد، رطوبت نسبی هوا و میزان تابش دریافتی از خورشید می باشد. هیرایاما و همکاران (۲۰۰۶) در پژوهشی گزارش کردند تنش آبی منجر به افزایش دمای برگ و کاهش تعرق گیاه شد. از این رو اثرات خنک‌کنندگی تعرق به دلیل عدم دسترسی به آب، از بین رفت. در شرایط تنش آبی شدید، تعرق گیاه متوقف شد که نتیجه آن افزایش مقاومت لایه مرزی و افزایش دمای برگ ذرت بود. گاردنر و همکاران (۱۹۸۱) در مطالعه خود اعلام کردند در شرایط تنش آبی، روند مقدار دمای پوشش سبز گیاه ذرت در طول روز ثابت نبود و در ساعت ۱۳ تا ۱۵ به بیشینه مقدار خود رسید. از سوی دیگر فیضی اصل و همکاران (۲۰۱۴) اعلام کردند هنگامی که $T_c - T_a < 0$ باشد، شرایط مطلوب رطوبتی برای گیاه گندم ایجاد شده و تعرق گیاه به تعرق پتانسیل منطقه نزدیک می‌گردد. در نتیجه جذب CO_2 و فتوسنتز با شدت بیشتری انجام شده و عملکرد محصول به عملکرد پتانسیل منطقه نزدیک می‌شود. گنزالس و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه خود بیان کردند در وضعیتی که دمای پوشش سبز گیاه بیشتر از دمای هوا باشد، گیاه تحت تنش آبی می‌باشد. در این تنش آبی، مقدار آب در برگ گیاه کاهش می‌یابد. در این شرایط گیاه برای مقابله با تنش آبی و حفظ آب اندام‌های خود، اقدام به بستن روزنه‌ها نمود تا از شدت تعرق کاسته شود. در نتیجه دمای پوشش سبز گیاهی افزایش یافت. از سوی دیگر سیفی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها از جمله شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاهان به‌شمار می‌رود که در کنترل میزان رطوبت خارج‌شده از گیاه و مقدار CO_2 وارد شده به آن تعیین‌کننده است. در فرایند تعرق، آب توسط گیاه از محیط خاک جذب شده و پس از عبور از

آوندهای گیاهی به صورت بخار از روزنه‌ها خارج می‌شود. ساعی و همکاران (۲۰۰۶) نیز اعلام کردند در گیاهان تحت تنش آبی، مقاومت روزنه‌ای دارای کمترین مقدار در صبح و با پیشرفت روز افزایش می‌یابد. این کار در گیاهان تحت تنش به منظور جلوگیری از عمل تعرق و کاهش هدر رفت آب انجام می‌گیرد. فتحی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی بیان کردند در پاسخ به تنش آبی شدید، مقاومت روزنه‌ای گیاه بادام ۷۰ تا ۷۵ درصد افزایش یافت. افزایش مقاومت روزنه‌ای و در پایان کاهش تعرق گیاه تحت تنش آبی، یک نوع سازگاری است که گیاه برای کاهش از دست دادن آب انجام می‌دهد. گویی و واسم (۱۹۹۳) در پژوهش‌های خود گزارش دادند، چون آماس سلول‌های محافظ روزنه‌ها به مقدار آب بستگی دارند، تنش آبی موجب بسته شدن روزنه‌ها شد. در پژوهش دیگر بر روی ذرت ماهرخ و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند در شرایط کمبود رطوبت خاک (تنش آبی)، هورمون ابسزیک اسید (ABA) به عنوان مکانیسم پیغام هورمونی وارد اندام‌های هوایی شده و به صورت یک سیستم هشداردهنده اولیه عمل نموده و باعث بسته شدن روزنه‌ها گردید. در این شرایط گیاه با بستن روزنه‌های خود اقدام به حفظ رطوبت کرده و از اتلاف آب جلوگیری می‌کند. به طوری که منجر به افزایش دمای برگ و کاهش تثبیت CO_2 می‌گردد. در برنامه‌ریزی‌های آبیاری پارامتر اساسی برای تعیین زمان آبیاری، رسیدن مقدار رطوبت خاک به آب سهل‌الوصول (RAW) می‌باشد. به این صورت که در روزهای پس از آبیاری با کاهش مقدار رطوبت خاک، شدت جریان آب به سمت ریشه گیاه برای تأمین آب موردنیاز تعرق کاهش می‌یابد. آن نقطه رطوبتی خاک که مرز ورود تنش جذب آب برای گیاه بوده و با کاهش عملکرد محصول همراه است، حد آب سهل‌الوصول می‌باشد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). گیاه با بستن تدریجی روزنه‌ها باعث کاهش تعرق می‌شود که به دلیل کاهش اثر خنک‌کنندگی تعرق دمای پوشش سبز

ذرت در طول روز ثابت نبود و در ساعت ۱۳ تا ۱۵ به بیشینه مقدار خود رسید. از سوی دیگر فیضی اصل و همکاران (۲۰۱۴) اعلام کردند هنگامی که $T_c - T_a < 0$ باشد، شرایط مطلوب رطوبتی برای گیاه گندم ایجاد شده و تعرق گیاه به تعرق پتانسیل منطقه نزدیک می‌گردد. در نتیجه جذب CO_2 و فتوسنتز با شدت بیشتری انجام شده و عملکرد محصول به عملکرد پتانسیل منطقه نزدیک می‌شود. گنزالس و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه خود بیان کردند در وضعیتی که دمای پوشش سبز گیاه بیشتر از دمای هوا باشد، گیاه تحت تنش آبی می‌باشد. در این تنش آبی، مقدار آب در برگ گیاه کاهش می‌یابد. در این شرایط گیاه برای مقابله با تنش آبی و حفظ آب اندام‌های خود، اقدام به بستن روزنه‌ها نمود تا از شدت تعرق کاسته شود. در نتیجه دمای پوشش سبز گیاهی افزایش یافت. از سوی دیگر سیفی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند مقدار مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها از جمله شاخص‌های فیزیولوژیکی گیاهان به‌شمار می‌رود که در کنترل میزان رطوبت خارج‌شده از گیاه و مقدار CO_2 وارد شده به آن تعیین‌کننده است. در فرایند تعرق، آب توسط گیاه از محیط خاک جذب شده و پس از عبور از

دوره‌های بحرانی تنش آبی ذرت شامل مراحل استقرار گیاهچه، دوره رشد سریع، مرحله گرده افشانی و پرشدن دانه است. از آنجایی که در هر مرحله از رشد فرایندهای فیزیولوژیکی متفاوتی در گیاه اتفاق می‌افتد، بنابراین دلیل اثر تنش روی عملکرد محصول نیز متفاوت خواهد بود.

در مطالعاتی که بر اساس دمای پوشش سبز گیاه صورت می‌گیرد، شاخصی به نام تنش آبی محصول^۱ (CWSI) ارائه می‌شود. ایدسو و همکاران (۱۹۸۱) در مطالعه خود، CWSI را برای بررسی وضعیت تنش آبی و برنامه‌ریزی آبیاری گیاه معرفی کردند. برای محاسبه شاخص مذکور روابطی بین اختلاف دمای هوا و دمای پوشش سبز گیاه و کمبود فشار بخار هوا^۲ (AVPD) ارائه شد. دامنه تغییرات CWSI، بین صفر تا یک می‌باشد. عدد صفر یعنی گیاه با تنش آبی مواجه نبوده و شرایط ایده‌آلی از لحاظ تعرق (بیشینه تعرق) داراست. اما عدد یک گویای بیشینه تنش آبی وارد شده به گیاه و توقف تعرق بود. فیضی اصل و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند در محاسبه CWSI از مقدار رطوبت خاک استفاده نشد و از پارامترهای گیاهی، فقط دمای پوشش سبز مد نظر بود. اما این شاخص معیار مناسبی برای تخمین وضعیت رطوبتی گیاه و خاک، در مراحل مختلف رشد گیاه بود. کندوگان و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی بر روی گیاه سویا در ترکیه گزارش کردند شاخص تنش آبی با حد آستانه ۰/۲۲ برای سویا، ابزار مناسبی برای تعیین زمان آبیاری گیاه است. به طوری که شاخص تنش آبی ارتباط معنی‌داری با مقدار تبخیر- تعرق گیاه داشت. بنابراین با توجه به پژوهش‌های گذشته و با استفاده از اطلاعات هواشناسی در این پژوهش، CWSI به منظور برنامه‌ریزی زمان آبیاری در طول دوره رشد ذرت برآورد شد. در میان محصولاتی که به صورت آبی کشت می‌گردد، گیاه

افزایش می‌یابد. بنابراین با تشخیص زمان افزایش مقاومت روزنه‌ها نسبت به شرایط بهینه رطوبتی و زمان افزایش دمای پوشش سبز نسبت به دمای هوا، می‌توان مقدار آب سهل‌الوصول داخل خاک را شناسایی نمود (وردی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۱). مقدار RAW به مقدار تبخیر- تعرق گیاه، بافت خاک، شرایط اقلیمی منطقه و دوره رشد گیاه بستگی دارد. آلن و همکاران (۱۹۹۸)، مقدار RAW را در شرایط استاندارد برای ذرت، ۵۵ درصد در کل دوره رشد گزارش کردند. علیزاده (۲۰۰۷) مقدار آب سهل‌الوصول ذرت دانه‌ای و ذرت شیرین را به صورت مقداری ثابت در کل دوره رشد و برابر با ۶۵ درصد گزارش کرد. برپسل و افتمسکو (۱۹۷۲) در پژوهشی در کشور رومانی، مقدار آب سهل‌الوصول برای ذرت دانه‌ای را از ۰/۴۵ تا ۰/۵ در کل دوره رشد توصیه کردند. بییر و همکاران (۱۹۶۷) در پژوهش دیگر بر روی نیاز آبی ذرت در ایالت آیوای آمریکا، زمان آبیاری را برای تولید بیشینه دانه در یک خاک لوم رسی، هنگام اتمام ۴۰ درصد آب قابل‌استفاده خاک توصیه نمودند. جاراللهی (۲۰۰۱) و وردی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۱) نیز مقدار RAW در طول دوره رشد ذرت را در محدوده‌ی ۰/۳ تا ۰/۸ برآورد کردند. کلاسن و شاو (۱۹۷۰) در پژوهشی گزارش دادند تأثیر کمبود آب بر جذب آن توسط گیاه، در مراحل مختلف رشد یکسان نمی‌باشد. در پژوهش دیگر ال‌کیسی و برونر (۲۰۰۹) مشاهده کردند که پاسخ گیاه ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد متفاوت است، که این مسئله در برنامه‌ریزی آبیاری اهمیت زیادی دارد. بر این اساس دورنبوس و کسام (۱۹۷۹) گزارش دادند که ذرت در مراحل رشد رویشی و رسیدگی، تحمل بیشتری به تنش آبی دارد. حساس‌ترین مرحله رشد ذرت مرحله گل‌دهی بود که کمترین عملکرد دانه در اثر کمبود رطوبت خاک، در آن مرحله حاصل گردید. در پژوهش دیگر، نیلسن (۲۰۰۲) اعلام کرد

این پژوهش در مزرعه‌ی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(د)، با موقعیت جغرافیایی ۵۰ درجه و صفر دقیقه و ۳۳ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۸ دقیقه و ۱۷ ثانیه عرض شمالی در شهر قزوین انجام شد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد ۳×۳ متر کاشته شد. رقم سینگل کراس ۷۰۴ به علت عملکرد بالا در منطقه، انتخاب شد. فاصله کرت‌ها از هم ۲ متر بود و هر کرت دارای چهار ردیف کشت جویچه‌ای بود که به صورت سطحی آبیاری شد. تاریخ کاشت بذرها ۱۳۹۵/۰۴/۰۷ و تراکم آن‌ها ۸۰۰۰۰ بوته بر هکتار بود (نصرالهی ۲۰۱۵). آمار روزانه پارامترهای هواشناسی در دوره رشد گیاه، از ایستگاه هواشناسی کنار مزرعه جمع‌آوری شد که نتایج ماهانه آن در جدول ۱ ارائه شده است. تیمار شاهد (Dc) شامل آبیاری کامل گیاه (شرایط بدون تنش آبی) بود. سایر تیمارها شامل اعمال تنش آبی در چهار مرحله رشد ۶ برگگی (D₁)، ۱۲ برگگی (D₂)، گل‌دهی (D₃) و خمیری شدن دانه‌ها (D₄) بود. تنش آبی تا آستانه‌ی توقف تعرق و پژمردگی موقت گیاه (بسته شدن جزئی روزنه برگ‌ها) اعمال شد. تیمارها در سه تکرار و مجموعاً ۱۵ کرت، به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد (شکل ۱). خاک مزرعه قبل از انجام پژوهش، آزمایش شد و نتایج آن مطابق جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمون خاک، کودهای اوره، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به ترتیب به مقدار ۳۵۰، ۲۰۰، ۲۰۰، ۲۰۰ و ۱۵۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار استفاده شد. به طوری که کود نیتروژن در طول دوره رشد گیاه و بقیه کودها قبل از کاشت به خاک اضافه شد. آب مورد نیاز برای آبیاری از آب چاه با هدایت الکتریکی $0/5 \text{ dS m}^{-1}$ و اسیدیته $7/2$ تأمین شد.

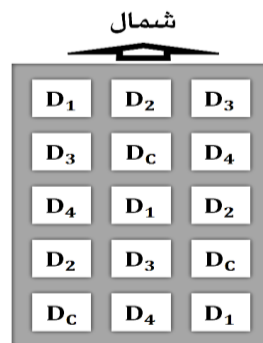
ذرت به دلیل تأمین نیاز غذایی انسان و دام، مانند گندم، جو و برنج از محصولات راهبردی می‌باشد. به همین دلیل پژوهش حاضر در مورد این گیاه انجام شد. بی‌تردید کمبود آب یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های رشد گیاهان زراعی می‌باشد (اکبری نودهی ۲۰۱۸). اگر روش مناسبی برای تشخیص زمان دقیق آبیاری در اختیار باشد، می‌توان با ایجاد ارتباط بین دو پارامتر CWSI و RAW، ابتدا کمبود رطوبت خاک و سپس مقدار دقیق حجم آب مورد نیاز در آبیاری را محاسبه نمود. در این صورت از ورود تنش آبی به گیاه و مصرف نامناسب آب جلوگیری می‌شود. در پژوهش‌های گذشته مانند پژوهش جارالهی (۲۰۰۱)، معمولاً با در نظر گرفتن تیمارهای مختلف آبیاری، حد آستانه کاهش عملکرد محصول نسبت به تنش آبی، قابل تعیین بود. به این صورت که مقدار رطوبت خاک در آستانه کاهش عملکرد محصول، به عنوان مقدار آب سهل‌الوصول گیاه در نظر گرفته می‌شد. اما در این پژوهش سعی شد با استفاده از واکنش‌های گیاهی مانند مقاومت روزنه‌ای و دامی پوشش سبز، مقدار RAW محاسبه گردد. لذا ضمن بررسی دقت دو پارامتر فوق در برنامه‌ریزی زمان آبیاری ذرت، بر تعیین نیاز آبیاری متناسب با مقدار جذب آب توسط گیاه، تأکید گردید. از سوی دیگر با مقایسه پارامترهای CWSI و RAW در طول دوره رشد ذرت، معیار مناسب‌تر برای مدیریت حجم آب مصرفی و برنامه‌ریزی آبیاری معرفی شد. در نهایت سعی شد با اهمیت دادن به تفاوت جذب آب در مراحل مختلف رشد گیاه، نتایجی از قبیل مصرف بهینه آب و جلوگیری از هدررفت آب ارائه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه اجرای پژوهش

جدول ۱- خصوصیات آماری هواشناسی در طول دوره رشد ذرت

ماه	دما (C°)		درصد رطوبت نسبی		بارندگی (mm)	ساعات آفتابی	تبخیر از تشت کلاس A (mm)	بیشینه سرعت باد m s ⁻¹
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه				
تیر	۱۳/۶	۴۰	۸	۸۵	۰	۳۷۵ / ۱	۳۴۱ / ۳	۱۴
مرداد	۱۴/۲	۴۰/۶	۹	۸۸	۰	۳۵۵ / ۷	۲۷۱ / ۹	۱۶
شهریور	۱۱	۳۶/۴	۷	۹۲	۰	۳۲۴	۲۵۶ / ۵	۱۰
مهر	۱	۳۲	۹	۹۴	۰	۲۸۸ / ۶	۱۷۰ / ۷	۱۵



شکل ۱- شبکه تیمارها در مزرعه.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه.

نوع تجزیه	واحد	عمق خاک (سانتی‌متر)		
		۰-۳۰	۳۰-۶۰	۶۰-۹۰
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک	dS m ⁻¹	۰/۵۴	۰/۶	۰/۶۷
اسیدیته گل اشباع (pH)	-	۷/۶	۷/۶	۷/۸
کربن آلی	%	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱
نیتروژن	%	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱۲
فسفر قابل جذب	mg kg ⁻¹	۴	۱	۱
پتاسیم قابل جذب	mg kg ⁻¹	۲۸۸	۶۰	۵۷
بافت خاک	-	لوم شنی	لوم شنی	لوم شنی
رس	%	۱۰	۸	۱۱
سیلت	%	۳۳	۲۴/۵	۳۰
شن	%	۵۷	۶۷/۵	۵۹
رطوبت وزنی حد گنجایش مزرعه‌ای (پتانسیل مکشی ۰/۳ بار)	%	۲۳	۲۴/۵	۲۳/۷
رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دائم (پتانسیل مکشی ۱۵ بار)	%	۱۰	۱۱	۱۰/۶
چگالی ظاهری	g cm ⁻³	۱/۶۳	۱/۵۵	۱/۵۱

اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای و دمای پوشش سبز

مقاومت روزنه‌ای و دمای پوشش سبز ذرت به صورت روزانه و به ترتیب توسط دستگاه‌های پرومتر مدل AP4 و دماسنج مادون قرمز مدل WT550 اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری پارامترها، از هر کرت به طور تصادفی سه گیاه و از هر گیاه، آخرین برگ کامل شده انتخاب شد. از سوی دیگر برای جلوگیری از تأثیر تابش مستقیم نور خورشید بر دمای پوشش سبز گیاه، این پارامتر در چهار جهت جغرافیایی اندازه‌گیری شد (وردی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۱). در نهایت میانگین داده‌ها در هر کرت، معرف مقدار پارامتر مد نظر برای آن کرت بود.

تعیین زمان و حجم آب آبیاری

در این پژوهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه، به صورت روزانه با دستگاه بازتاب‌سنج دامنه زمان^۱ (TDR) مدل TRIME-FM اندازه‌گیری شد. قبل از آغاز کشت، دستگاه TDR در متوسط عمق توسعه ریشه گیاه در خاک مزرعه واسنجی و عملکرد آن ارزیابی شد. به این صورت که خاک مزرعه تحت آبیاری سنگین قرار گرفت و از حالت اشباع تا زمان خشک شدن، مقدار رطوبت واقعی خاک با روش مستقیم (روش وزنی) اندازه‌گیری شد. در روش مذکور، از تقسیم وزن آب موجود در خاک مرطوب بر وزن دانه‌های خشک خاک، مقدار رطوبت وزنی محاسبه شد. از سوی دیگر، برای هر داده‌ی واقعی رطوبت، یک داده نیز توسط دستگاه ثبت شد. سپس در یک نمودار، داده‌های واقعی در محور عمودی و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد. بنابراین یک خط بین داده‌ها برآزش داده شد و منحنی اِشِل برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی رطوبت تشکیل داده شد. در تیمار شاهد قبل از اتمام آب سهل‌الوصول خاک، عملیات آبیاری انجام

شد. به این صورت که در پژوهش جارالهی (۲۰۰۱)، مقدار RAW گیاه ذرت در تمام مراحل رشد، بین ۴۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد. بنابراین در کرت‌های شاهد برای اطمینان از این‌که به گیاهان حتی در حساس‌ترین دوره رشد هم تنش آبی وارد نگردد، مقدار RAW برابر با ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. یعنی پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین حد ظرفیت مزرعه (FC^2) و نقطه پژمردگی دائم (PWP^2)، زمان آبیاری کرت‌های شاهد بود. اما سایر تیمارها شامل اعمال تنش آبی در مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌ها بود. در کرت‌های تحت تنش آبی پس از اعمال بیشینه تنش آبی ممکن به گیاهان (که همراه با بسته شدن جزئی روزنه‌ها بود)، عملیات آبیاری انجام شد. حجم آب آبیاری برای هر کرت، با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک تا حد FC، عمق ریشه گیاه و مساحت کرت، بر اساس معادله ۱ تعیین شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. آب از منبع مورد نظر توسط لوله به کرت‌ها انتقال داده شد و آبیاری در قالب سامانه سطحی جویچه‌ای، انجام شد. به دلیل توزیع آب به صورت یکنواخت و یک اندازه در جویچه‌های هر کرت و با توجه به محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌ها و عدم خروج آب از آن‌ها، بازده آبیاری صد در صد در نظر گرفته شد.

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

V: حجم آب آبیاری (m^3)، θ_{FC} : درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه‌ای، θ_i : درصد رطوبت وزنی خاک در زمان آبیاری، ρ_b : چگالی ظاهری خاک ($g\ cm^{-3}$)، D_{rz} : عمق ریشه گیاه (m) و A: مساحت کرت (m^2) بود.

نحوه تعیین آب سهل‌الوصول

با توجه به نظر آلن و همکاران (۱۹۹۸)، هرگاه سرعت جریان آب‌خاک به سمت ریشه گیاه برای تأمین

مبنای بالا نیز در روزهای قبل از آبیاری، دمای پوشش سبز از ساعت ۱۱ الی ۱۴ ثبت شد. به طور کلی برای محاسبه CWSI، از روابط ۳ تا ۶ استفاده شد (سعیدی‌نیا و همکاران ۲۰۱۹).

$$(T_c - T_a)_{ll} = a + b(VPD) \quad [۳]$$

$$VPD = 10 \times \exp \left[\frac{16.78 T_a - 116.9}{T_a + 237.3} \right] \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \quad [۴]$$

رابطه ۳ نشان‌دهنده خط مبنای پایین تنش (بدون تنش آبی) و مکان هندسی نقاطی بود که بیشترین تعرق گیاه برای آن‌ها اتفاق افتاد. در این رابطه اندیس I.I بیانگر خط پایین^۱ بود که در شکل ۲ نشان داده شده است. T_c : دمای پوشش سبز (درجه سانتی‌گراد)، T_a : دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)، a : عرض از مبدأ خط (واحد)، b : شیب خط (واحد) و VPD : کمبود فشار بخار هوا (میلی بار) بود که از رابطه ۴ به دست می‌آید. در رابطه ۴؛ T_a : دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) و RH : درصد رطوبت نسبی محیط (درصد) است. خط مبنای پایین معرف شرایطی بود که هیچ‌گونه محدودیت رطوبتی در ناحیه ریشه گیاه وجود نداشت. در این شرایط، مقدار تعرق گیاه برابر با مقدار تعرق پتانسیل بود (قربانی و برومندنسب ۲۰۱۶).

$$(T_c - T_a)_{ul} = a + b|VPG| \approx h \quad [۵]$$

رابطه ۵ بیان‌گر خط مبنای بالای تنش می‌باشد. در رابطه مذکور، $(T_c - T_a)_{ul}$: اختلاف درجه حرارت پوشش سبز و هوا (درجه سانتی‌گراد) و VPG : شیب فشار بخار اشباع (میلی بار) است. در رابطه ۵، h مقدار ثابتی بر حسب درجه سانتی‌گراد بوده و مستقل از کمبود فشار بخار هوا (VPD) است (ایدسو و همکاران، ۱۹۸۲). در این رابطه اندیس I.I نشان‌دهنده خط مبنای بالای تنش^۲ بود که این خط به صورت افقی، موازی محور VPD در شکل ۲ نشان داده شد. این خط نشان‌دهنده مکان هندسی مقادیر اختلاف دمایی (بین هوا و پوشش سبز) می‌باشد که در آن شرایط، تعرق گیاه در کمترین مقدار ممکن و

آب مورد نیاز تعرق کافی نباشد، آن نقطه رطوبتی خاک RAW می‌باشد. در این نقطه رطوبتی با محدود شدن دسترسی گیاه به آب خاک و کاهش جذب آب، مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاه افزایش یافته و روزنه‌ها شروع به بسته شدن می‌نمایند و دمای پوشش سبز بیشتر می‌شود. در نتیجه با هدف برنامه‌ریزی دقیق آبیاری، مقدار RAW بر اساس دمای پوشش سبز و مقاومت روزنه‌ای برآورد شد. در پژوهش مانوئل و همکاران (۱۹۷۱)، افزایش دو ثانیه بر سانتی‌متر در مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاه ذرت و در پژوهش وردی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۱) افزایش دو درجه سانتی‌گراد دمای پوشش سبز ذرت نسبت به هوا، نشان‌دهنده‌ی اعمال تنش آبی بر گیاه و اتمام آب سهل‌الوصول بود. در این شرایط پس از تشخیص مقدار RAW بر اساس افزایش مقاومت روزنه‌ای و دمای پوشش سبز، رطوبت خاک برای تعیین مقدار عددی RAW اندازه‌گیری شد. بر اساس معادله ۲، از تقسیم مقدار رطوبت خاک بر مقدار رطوبت بین حدود FC و PWP ، درصد RAW برآورد شد.

$$RAW = \frac{\theta_{FC} - \theta_0}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}} \quad [۲]$$

در معادله ۲، RAW : درصد آب سهل‌الوصول، θ_{FC} :

درصد رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه، θ_0 : درصد رطوبت وزنی خاک در زمان اعمال تنش بر گیاه و افزایش مقاومت روزنه‌ای و θ_{PWP} : درصد رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم می‌باشد.

تعیین شاخص تنش آبی محصول (CWSI)

خطوط مبنای پایین و بالای تنش آبی و شاخص تنش آبی محصول (CWSI)، در مراحل رشد مدنظر (مراحل اعمال تیمار) تعیین شد. برای خط مبنای پایین، در روزهای پس از آبیاری از ساعت ۷ صبح الی ۱۴، هرساعت یک‌بار دمای پوشش سبز بر اساس روش ایدسو و همکاران (۱۹۸۱) اندازه‌گیری شد. برای خط

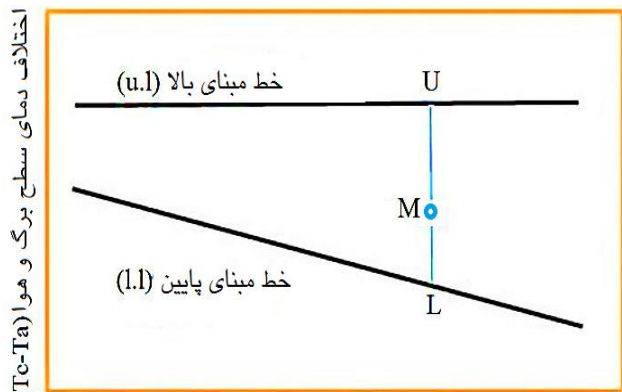
مقاومت روزنه‌ای، دمای پوشش سبز و آب سهل‌الوصول

وضعیتهای مختلف اختلاف دمای پوشش سبز با هوا ($T_c - T_a$) و مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاهان تحت تنش آبی نسبت به گیاهان شاهد، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده است. نتایج نشان داد در روزهای پس از آبیاری و تا زمان وجود رطوبت کافی و سهل‌الوصول برای گیاه، اختلاف دمای پوشش سبز و هوا مقداری منفی بود. به دلیل وجود رطوبت بهینه (سهل‌الوصول) در کرت‌های شاهد، اختلاف دمای منفی همواره برای گیاهان شاهد وجود داشت. اما پس از کاهش رطوبت خاک از حد سهل‌الوصول (RAW) برای گیاهان تحت تنش، مقادیر $T_c - T_a$ برای آن‌ها مثبت شد. یعنی با کاهش آب خاک و به دنبال آن کاهش تعرق گیاه، دمای پوشش سبز نسبت به دمای هوا افزایش یافت. نتایج مذکور در مورد مقادیر مقاومت روزنه‌ای به این صورت حاصل شد که تا زمان وجود آب مورد نیاز گیاه در خاک، مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاهان شاهد و تحت تنش خیلی نزدیک به هم بود. اما با اعمال تنش آبی به گیاهان، مقدار مقاومت روزنه‌ای آن‌ها نسبت به گیاهان شاهد افزایش ناگهانی یافت. بر اساس نتایج به دست آمده، نقطه‌ی جدایی منحنی‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده اتمام آب سهل‌الوصول خاک بود. در زمان جدایی منحنی‌ها، مقاومت روزنه‌ای گیاهان تحت تنش نسبت به گیاهان شاهد و دمای پوشش سبز نسبت به دمای هوا افزایش یافت. بنابراین RAW که معیاری مناسب برای برنامه‌ریزی زمان آبیاری گیاه بود، در این پژوهش با استفاده از مؤلفه‌های مقاومت روزنه‌ای، دمای پوشش سبز و هوا برآورد گردید. با توجه به شکل‌های ۳ و ۴ در تمام مراحل رشد گیاه، زمان رسیدن به RAW از طریق مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها حداقل یک روز زودتر از دمای پوشش سبز نشان داده شد. این مسئله نشان داد پاسخ ذرت به تنش آبی، از طریق روزنه‌های برگ

نزدیک به صفر قرار دارد. در روزهای قبل از آبیاری زمانی که اختلاف دمای بین هوا و پوشش سبز به این حد افزایش یابد (حوالی ساعت ۱۴)، عمل تعرق به طور کامل متوقف می‌گردد. طبق نظریه ایدسو و همکاران (۱۹۸۲)، برای توقف کامل تعرق لازم است فشار بخار محیط به اندازه شیب فشار بخار (VPG) افزایش یافته تا بتواند با گرادیان فشار بخار مقابله نماید.

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a)_M - (T_c - T_a)_{l,l}}{(T_c - T_a)_{u,l} - (T_c - T_a)_{l,l}} = \frac{ML}{LU} \quad [6]$$

شاخص تنش آبی محصول (CWSI) از طریق رابطه ۶ محاسبه شد. در این رابطه، $(T_c - T_a)_M$ معرف اختلاف دمای پوشش سبز و هوا برای هر روزی است که شاخص تنش برای آن محاسبه می‌شود. با توجه به شکل ۲، ML بیانگر اختلاف بین $(T_c - T_a)_M$ با خط مبنای پایین تنش و LU نشان‌دهنده مقدار اختلاف بین خط مبنای پایین و بالای تنش آبی در زمان ثبت داده‌ها است.



کمبود فشار بخار هوا (VPD)

شکل ۲- موقعیت خط مبنای بالا و پایین تنش آبی.

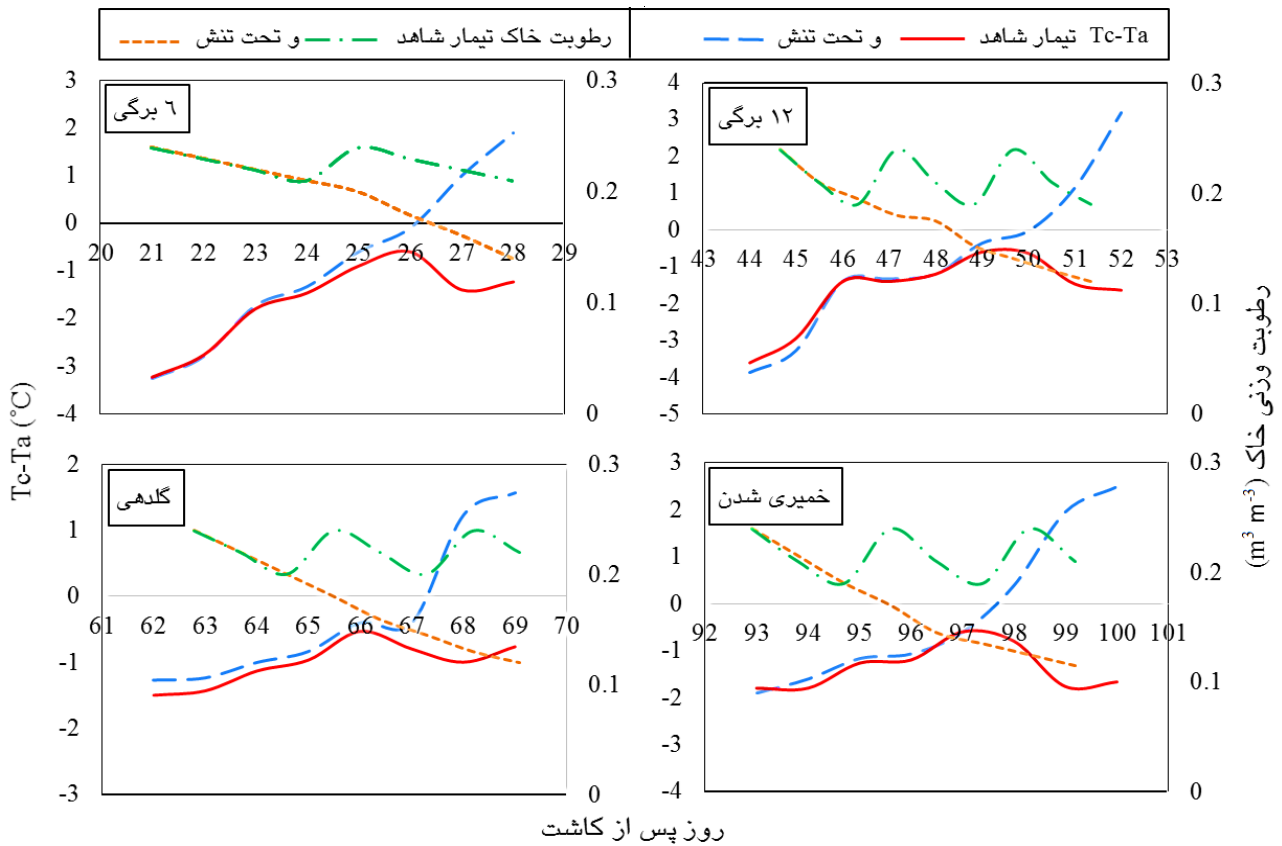
تحلیل آماری طرح

در این پژوهش، مقادیر CWSI و RAW در مراحل مختلف رشد تعیین شد. سپس با نرم‌افزار SPSS، موارد محاسبه شده مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها، توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

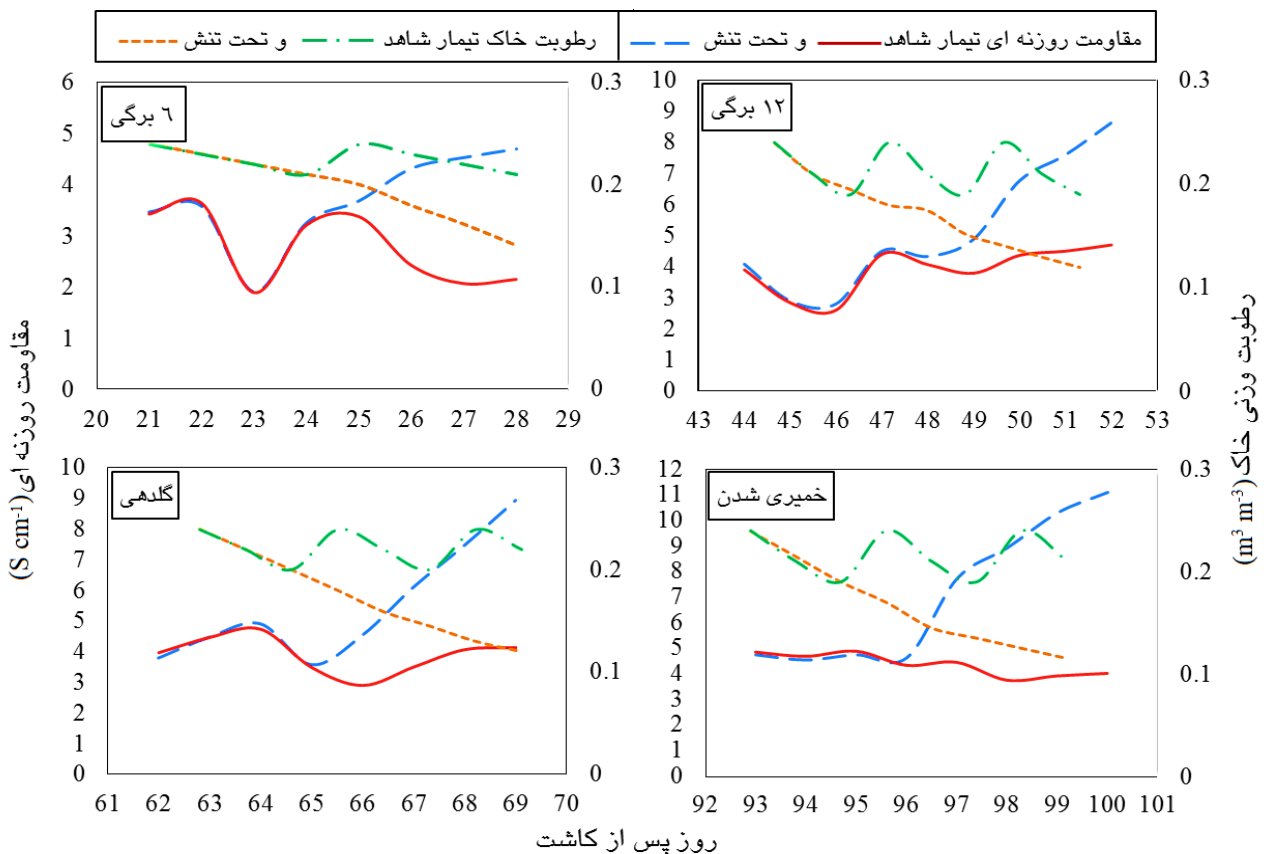
نتایج و بحث

به ترتیب ۴۶، ۶۷، ۶۲ و ۷۱ درصد برآورد شد. مقادیر مذکور در محدوده نتایج به دست آمده در پژوهش‌های مشابه، مشاهده شد. در پژوهش وردی نژاد و همکاران (۲۰۱۱) بیشینه مقدار RAW گیاه ذرت علوفه‌ای در چهار مرحله‌ی استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن، به ترتیب ۴۲/۸، ۵۹/۲، ۵۸/۹ و ۶۷/۵ گزارش شد. ال‌کیسی و برونر (۲۰۰۹) طی پژوهشی در کلرادوی آمریکا گزارش کردند مقدار RAW ذرت در مراحل رشد متفاوت بود و در مراحل رشد ۴ برگی، ۱۶ برگی، خمیری شدن دانه‌ها و رسیدن به ترتیب ۵۰، ۶۰-۷۰، ۵۰ و ۶۰-۷۰ درصد بود. در پژوهش دورنبوس و کسام (۱۹۷۹) مقدار رطوبت سهل‌الوصول در کشت ذرت برای مرحله استقرار، رویشی، گل‌دهی و رسیدن به ترتیب ۴۰، ۵۵، ۶۵ و ۸۰ درصد گزارش شد. در پژوهش جارالهی (۲۰۰۱) تعیین مقدار آب سهل‌الوصول ذرت دانه‌ای در کرج بررسی شد. در این پژوهش مقدار پارامتر مذکور در دوره‌های استقرار گیاه، شیری شدن دانه و مرحله برداشت به ترتیب ۰/۳، ۰/۷ و ۰/۸ برآورد شد. به‌طور کلی با استفاده از روش‌های پیشنهادی در پژوهش حاضر، می‌توان حدود آب سهل‌الوصول گیاه ذرت را در مراحل مختلف رشد برآورد نمود. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار جذب آب توسط ذرت در مراحل مختلف رشد یکسان نبود. علت آن به تفاوت توانایی جذب آب توسط ریشه، در مراحل حساس و غیر حساس رشد مرتبط بود. بنابراین اعمال دوره‌های متغیر آبیاری با حجم ثابت آبیاری و یا اعمال حجم‌های متغیر آبیاری با دوره‌های ثابت در کل دوره‌ی رشد گیاه، دستاورد کاربردی بود که باید مدنظر قرار داد. در نتیجه ضمن برآورد حجم آب آبیاری متناسب با نیاز واقعی گیاه، از مصرف بیش از حد آب جلوگیری به عمل آمد.

سریع‌تر از دمای پوشش سبز بود. یعنی در تشخیص زمان ورود تنش، داده‌های مربوط به مقاومت روزنه‌ای دقت بیشتری نسبت به دمای پوشش سبز داشتند. علت این بود که در افزایش دمای پوشش سبز، دمای هوا و تابش مستقیم نور خورشید نقش اصلی را بر عهده داشت. اما در افزایش مقاومت روزنه‌ای، غیر از تابش و دمای هوا سایر پارامترهای اقلیمی مؤثر بر تعرق گیاه، مانند سرعت باد و رطوبت نسبی محیط نیز دخالت داشتند. همچنین ممکن بود گیاه از نظر مقدار مقاومت روزنه‌ای تحت تنش باشد، اما در اثر ابری شدن ناگهانی هوا و نبود نور خورشید بر روی پوشش سبز، اختلاف دمای مثبت بین هوا و پوشش سبز نشان داده نشود. بنابراین مقاومت روزنه‌ای نسبت به دمای پوشش سبز، پارامتر معتبرتری بود و کمتر تحت تأثیر تغییرات لحظه‌ای جوی قرار داشت. در پژوهش عطارزاده و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش شد که گرما در حضور نور در مقایسه با سایه، موجب ورود اثرات مخرب تنش آبی با سرعت بیشتری بر روی ذرت گردید. اما تغییرات ناگهانی اتمسفر، تأثیری بر مقدار مقاومت روزنه‌ای نداشت. زیرا مقاومت روزنه پارامتری بود که به مقدار آب موجود در بافت گیاه و رطوبت خاک وابسته بود. به هر حال پس از تشخیص زمان رسیدن به RAW بر اساس پارامترهای مذکور، مقدار RAW محاسبه شد. بر اساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، اعمال تنش آبی تا حد افزایش مقاومت روزنه‌ای (اتمام آب سهل‌الوصول)، یک تأثیر مساوی بر مقدار رطوبت خاک و مقدار RAW در مراحل مختلف رشد نداشت. در این پژوهش مقدار RAW برای مراحل رشد ۶ برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌های ذرت در منطقه قزوین، با استفاده از پارامتر مقاومت روزنه‌ای به ترتیب ۴۵، ۶۵، ۶۰ و ۷۰ درصد محاسبه شد. مقادیر فوق از طریق اختلاف دمای پوشش سبز و هوا



شکل ۳- اختلاف دمای پوشش سبز ذرت و هوا در دوره اعمال تنش آبی (در مراحل مختلف رشد).



شکل ۴- اختلاف مقدار مقاومت روزنه ای گیاه در دوره اعمال تنش آبی (در مراحل مختلف رشد).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در طرح.

میانگین مربعات		درجه آزادی	تابع تغییرات
CWSI	RAW		
7×10^{-10} ns	9×10^{-10} ns	۲	تکرار
0.036^{**}	0.036^{**}	۳	مراحل رشد
$2/26 \times 10^{-10}$	$1/6 \times 10^{-10}$	۶	خطا
-	-	۱۲	مجموع

ns و **: به ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۴- مقادیر آستانه‌ای آب سهل‌الوصول (RAW) و شاخص تنش آبی محصول (CWSI) در مراحل مختلف رشد ذرت.

CWSI	RAW	مراحل رشد
0.37^d	0.46^d	D ₁
0.54^b	0.67^b	D ₂
0.63^a	0.67^c	D ₃
0.47^c	0.71^a	D ₄

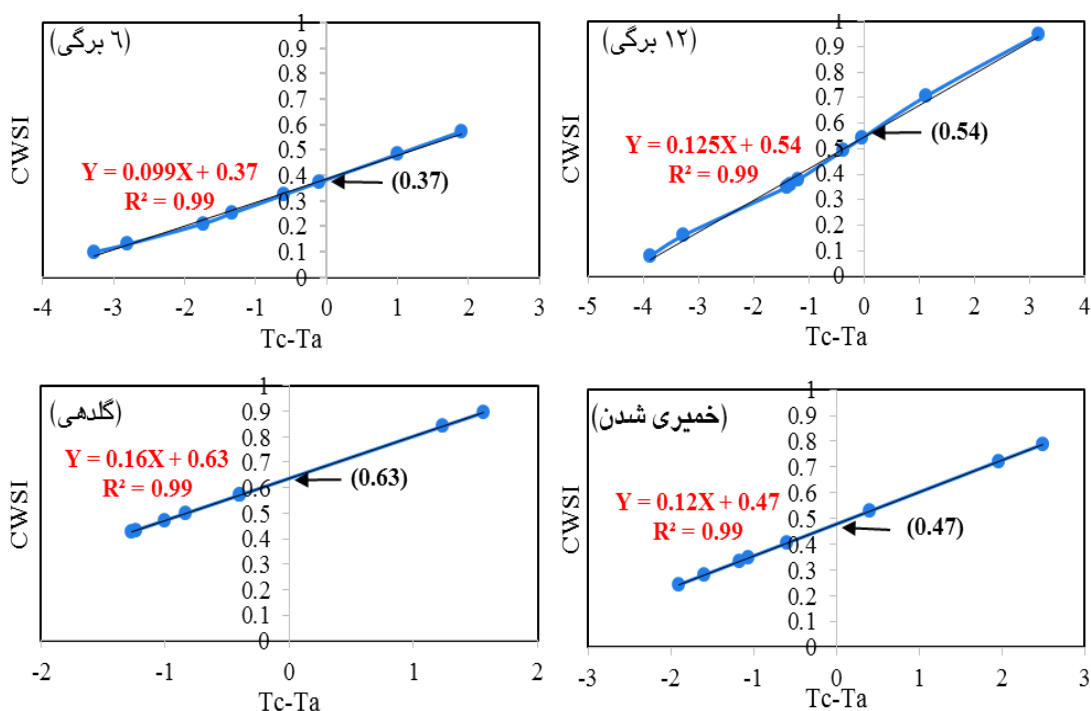
شاخص تنش آبی محصول

در روزهای پس از آبیاری یعنی شرایط ایجاد رطوبت بهینه در خاک، تعرق کامل گیاهان وجود داشت. اما کم‌ترین تعرق گیاه در زمانی اتفاق افتاد که تحت تأثیر تنش آبی، مقاومت روزنه‌ای برگ‌های گیاهان تحت تنش نسبت به گیاهان شاهد بیشترین افزایش را یافت و شروع به بسته شدن نمود. در این شرایط، شاخص تنش آبی محصول (CWSI) از طریق رابطه‌ی ۶ به صورت روزانه برآورد شد (شکل ۵). دامنه‌ی مقادیر CWSI در مراحل رشد ۶ برگه، ۱۲ برگه، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب در بازه‌ی ۰/۶-۰/۱، ۰/۹۵-۰/۱، ۰/۹۵-۰/۴۲ و ۰/۹-۰/۲۴ قرار داشت. بر اساس نتایج به دست آمده، زمانی که اختلاف دمای پوشش سبز و هوا منفی بود، گیاه در وضعیت مناسب تعرق قرار داشت. اما در اثر اعمال تنش آبی، دمای پوشش سبز نسبت به دمای هوا افزایش یافت و اختلاف دما مثبت شد. بنابراین CWSI برآورد شده در لحظه تساوی دمای پوشش سبز و هوا، به عنوان شاخص بحرانی ورود گیاه به تنش آبی در نظر گرفته شد (شکل ۵).

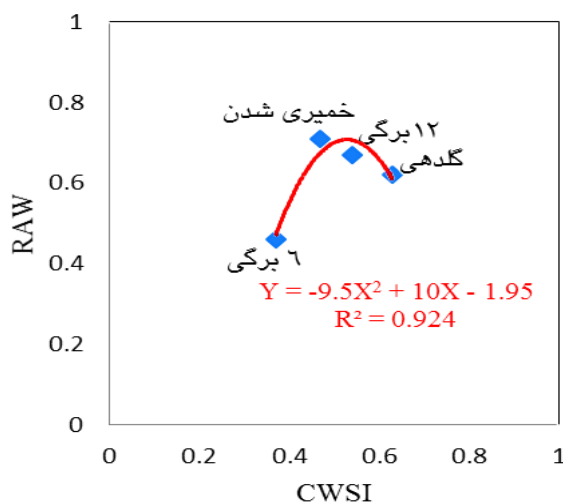
بر اساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، تأثیر مراحل مختلف رشد ذرت بر مقدار CWSI، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد مقادیر آستانه‌ای CWSI برای شروع تنش (عرض از مبدأ نمودارها در شکل ۵) در مراحل رشد ۶ برگه، ۱۲ برگه، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۵۴، ۰/۶۳ و ۰/۴۷ به دست آمد. کمترین CWSI مربوط به مراحل ابتدایی رشد و بیشترین آن مربوط به مرحله گل‌دهی ذرت بود. عدم ثبات CWSI آستانه در طول دوره رشد ذرت، نشان‌دهنده آستانه‌ی متفاوت تحمل تنش آبی توسط گیاه در مراحل مختلف رشد بود. شیب نمودارها نیز در شکل ۵ نشان داد که در مراحل حساس رشد، روند افزایش مقدار CWSI نسبت به اختلاف دمای پوشش سبز و هوا، بیشتر بود. یعنی به نسبت هر واحد افزایش اختلاف دما، تنش آبی بیشتری در مراحل حساس رشد بر گیاه اعمال شده است. در این پژوهش تعیین یک دمای شاخص برای پوشش سبز گیاه که از روی آن بتوان زمان آبیاری را برنامه‌ریزی نمود، کار ساده‌ای نبود. به این دلیل که دمای پوشش سبز گیاه در طول روز، تحت تأثیر نور خورشید و زاویه تابش آن،

پارامترهای مذکور، مقادیر بحرانی در مراحل مختلف رشد تعیین شد که نشان‌دهنده لحظه‌ی اثرگذاری تنش آبی بر گیاه ذرت و نیاز به آبیاری بود. بنابراین قابلیت هر دو پارامتر RAW و CWSI برای برنامه‌ریزی زمان آبیاری ذرت در مراحل مختلف رشد، تأیید گردید. اما علاوه بر آن، پارامتر RAW در محاسبات مربوط به حجم آب مورد نیاز در عملیات آبیاری نیز نقشی بر عهده داشت. پارامترهای CWSI و RAW به ترتیب بیانگر واکنش‌های گیاه و خاک، به کمبود آب (تنش آبی) بود. CWSI تعیین‌کننده زمان انجام آبیاری و RAW تعیین‌کننده مقدار آب مورد نیاز در آبیاری بود. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، ایجاد ارتباط بین دو پارامتر مهم CWSI و RAW از طریق یک معادله بود. برای این‌کار توابع مختلف بین دو پارامتر مذکور برآزش داده شد. اما بهترین تابع، تابع درجه ۲ با معادله $Y = -9.5X^2 + 10X - 1.95$ و ضریب رگرسیون ۰/۹۲۴ بود که در شکل ۶ نشان داده شد. نتایج نشان داد که در مراحل مختلف رشد ذرت، بین دو پارامتر مذکور از طریق یک مدل تجربی (تابع درجه ۲) همبستگی خوبی برقرار شد. از این‌رو با استفاده از معادله‌ی به دست آمده، می‌توان صرفاً با داشتن CWSI مقدار RAW را نیز تعیین نموده و در برنامه‌ریزی آبیاری از آن بهره‌برداری نمود. اهمیت مطلب فوق در این است که از طریق CWSI، زمان انجام آبیاری و از طریق RAW، کمبود رطوبت خاک و حجم آب مورد نیاز برای آبیاری قابل محاسبه است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تابع مذکور برای کل دوره رشد ذرت و تحت سطوح مختلف آبیاری برآورد شود. به این ترتیب تعیین مقدار RAW از روی CWSI، از اندازه‌گیری میدانی مقدار رطوبت خاک و صرف وقت و نیروی انسانی بیشتر جلوگیری می‌نماید.

متغیر بود. همچنین علاوه بر دما، سایر پارامترهای هواشناسی مانند رطوبت نسبی محیط و سرعت باد نیز بر تعرق گیاه و مقدار دمای پوشش سبز تأثیرگذار بود. بنابراین اعداد مربوط به مقادیر بحرانی CWSI در مراحل مختلف رشد، به عنوان معیار مناسبی برای تعیین زمان آبیاری ذرت در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در پژوهش‌های گذشته نیز توانایی شاخص تنش آبی محصول (CWSI) در برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای بررسی شد. ضیا و همکاران (۲۰۱۱)، CWSI را مبنایی موفق برای تشخیص آستانه ورود تنش رطوبتی و تشخیص زمان آبیاری دانسته‌اند. در پژوهش آن‌ها، مقدار بحرانی CWSI در کل دوره رشد گیاه ذرت، عدد ۰/۶ در مناطق خشک و نیمه‌خشک گزارش شد. در پژوهش احمدی و همکاران (۲۰۱۷) از CWSI برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت در اهواز استفاده شد. مقدار حد مجاز شاخص تنش آبی برای ذرت تابستانه و بهار به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۱۷ گزارش شد. در پژوهش قربانی و برومندنسب (۲۰۱۶) در اهواز، مقدار CWSI در ماه‌های شهریور و مهر در دوره رشد گیاه ذرت به ترتیب ۰/۲۶ و ۰/۲۲ برآورد شد. در پژوهش وردی نژاد و همکاران (۲۰۰۷) بر روی ذرت در کرج، مقدار شاخص تنش آبی برای سه مرحله ظهور کاکل، کامل شدن تاج و خمیری شدن دانه به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۳۳ و ۰/۴۲ برآورد شد در مطالعه سعیدی‌نیا و همکاران (۲۰۱۹) مقدار CWSI در تیمارهای ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد تأمین نیاز آبی ذرت در منطقه خرم آباد، به ترتیب برابر با ۰/۱۷، ۰/۲۱ و ۰/۳۹ گزارش شد. به طور کلی، در پژوهش حاضر پارامترهای RAW و CWSI با استفاده از داده‌های هواشناسی، مقدار رطوبت خاک، مقاومت روزنه‌ای و دمای پوشش سبز، برای گیاه ذرت در منطقه قزوین برآورد شد. برای



شکل ۵- تغییرات شاخص تنش آبی محصول (CWSI) و اختلاف دمای پوشش سبز و هوا در مراحل مختلف رشد ذرت.



شکل ۶- موقعیت پارامترهای آبی آبیاری (RAW) و شاخص تنش آبی محصول (CWSI) در مراحل مختلف رشد ذرت.

نتیجه‌گیری کلی

آبیاری ذرت تعیین شد. در این شرایط، مقدار آب سهل‌الوصول (RAW) ذرت در مراحل رشد ۶ برگه، ۱۲ برگه، گل‌دهی و خمیری شدن دانه به ترتیب ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۱ درصد (با استفاده از دمای پوشش سبز) برآورد شد. نتایج نشان داد جذب سهل‌الوصول آب در مراحل مختلف رشد ذرت متفاوت بود و در تشخیص آن، پارامتر مقاومت روزنه‌ای واکنش زودتری نسبت به دمای

در پژوهش حاضر، بر اساس واکنش مقاومت روزنه‌ای و دمای پوشش سبز گیاه ذرت به تنش آبی، برنامه‌ی زمانی آبیاری گیاه در مراحل مختلف رشد تعیین شد. در اثر ورود تنش آبی به گیاه، مقاومت روزنه‌ای و دمای پوشش سبز گیاه تحت تنش، به ترتیب نسبت به مقاومت روزنه‌ای گیاه شاهد و دمای هوا افزایش یافت. از این رو لحظه‌ی رویداد این افزایش، به‌عنوان زمان انجام

دانه به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۵۴، ۰/۶۳ و ۰/۴۷ محاسبه شد. نتایج نشان داد دمای پوشش سبز، مقدار مقاومت روزنه ای و پارامترهای RAW و CWSI، هرکدام به تنهایی توان برنامه ریزی زمان آبیاری ذرت را داشت اما RAW امکان برآورد حجم آب آبیاری را نیز فراهم می نمود. به این ترتیب می توان بر اساس حساسیت متفاوت ذرت به تنش آبی، دوره های متغیر آبیاری طی دوره رشد در نظر گرفت. در زمان آبیاری نیز، حجم آب آبیاری را متناسب با نیاز واقعی گیاه تعیین نمود تا از مصرف بی رویه آب جلوگیری به عمل آید.

پوشش سبز داشت. در میان دو پارامتر مذکور، مقاومت روزنه ای پارامتر مطمئن تری در این کار تعیین شد. علت آن متغیر بودن دمای پوشش سبز در یک زمان مشخص، تحت تأثیر سایه یا آفتابی بودن آسمان بود. در حالی که مقدار مقاومت روزنه ای، به وضعیت جذب آب و تعرق توسط گیاه وابسته بود و تغییرات لحظه ای جوئی بر آن تأثیرگذار نبود. CWSI، شاخص دیگری بود که از طریق دمای پوشش سبز و پارامترهای هواشناسی، زمان ورود تنش آبی به گیاه را تعیین نمود. مقادیر بحرانی CWSI در مراحل رشد ۶ برگ، ۱۲ برگ، گل دهی و خمیری شدن

منابع مورد استفاده

- Ahmadi H, Nasrolahi A, Sharifipour M and Isvand H, 2017. Soybean irrigation scheduling by using the temperature difference of the air and canopy cover. *Journal of Water and Irrigation Management* 7(1): 121-134 (In Persian with English abstract).
- Akbari Nodehi D, 2018. Effect of water stress on different growth stages of yield and water use efficiency of maize. *Journal of Water and Irrigation Management* 7(2): 305-318 (In Persian with English abstract).
- Alizadeh A, 2007. Design of Surface Irrigation Systems. Imam Reza University, Mashhad.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Pp. 1-326. FAO Irrigation Drainage Paper No.56, Rome, Italy.
- Alkansi MM and broner I, 2009. Crop Water Use and Growth Stages. Colorado State University Extension. No. 4.715
- Attarzadeh M, Baluchi HR, Rajaei M and Pooladi F, 2017. The effect of pretreatment with ABS in the tolerance induction to heat stress in maize seedlings. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences* 10(4): 641-653 (In Persian with English abstract).
- Beer CE, Shrader WD and Schwanke PK, 1967. Interrelationships of plant population and soil fertility in determining corn yields on colo clay loam at Ames, Iowa. *Res Bull.*
- Berbecel O and Eftimescu M, 1972. Effect of Agro Meteorological Conditions on Maize Growth Management. Institute of Meteorology, Bucharest.
- Candogan BK, Shncik M, Buyukcangaz H and Demirtas C, 2013. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean in sub-humid climatic conditions. *Journal of Agricultural Water Management* 118: 113– 121.
- Claassen MM and Shaw RH, 1970. Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Journal of Agronomy* 62: 652-655.
- Doorenbos J and Kassam AK, 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, United Nations, Rome.
- Fathi H, Amiri ME, Imani A, Hajilou J and Nikbakht J, 2017. Tolerance almond genotypes on GN15 rootstock to deficit irrigation stress on some physiological characteristics and leaf temperature. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology* 18(2): 159-176 (In Persian with English abstract).

- Feiziasl V, Fotovat A, Astaraei A, Lakzian A and Mousavi Shalmani MA, 2014. Determination of soil and plant water balance and its critical stages for rainfed wheat using crop water stress index (CWSI). *Journal of Water and Soil* 28(4): 804-817 (In Persian with English abstract).
- Gardner BR, Blad BL and Watts DG, 1981. Plant and air temperatures in differentially irrigated corn. *Journal of Agricultural Meteorology* 25: 207-217.
- Ghorbani M and Bromandnasab S, 2016. Assessing of the water salinity effect in surface irrigation on index rate CWSI (Crop Water Stress Index) for scheduled summer maize. *Journal of Water and Irrigation* 7(25): 54-67 (In Persian with English abstract).
- Gonzalez Dugo MP, Moran MS, Mateos L and Bryant R, 2005. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Journal of Irrigation Science* 24: 233-240.
- Guei RG and Wassom CE, 1993. Genetics of osmotic adjustment in breeding Maize for drought tolerance. *Heredity* 71: 436-441.
- Hirayama H, Wada Y and Neato H, 2006. Estimation of drought tolerance based on leaf temperature in upland rice breeding. *Journal of Breeding Science* 56: 47-54.
- Idso SB, Jackson RD, Pinter PJ, Reginato RJ and Hatfield JL, 1981. Normalizing the stress degree-day parameter for environmental variability. *Journal of Agricultural Meteorology* 24: 45-55.
- Idso SB, Reginato RJ and Radin JW, 1982. Leaf diffusion resistance and photosynthesis in cotton related to a foliage temperature based plant water stress index. *Journal of Agricultural Meteorology* 27:27-34.
- Jarollahi R, 2001. Determination of readily available water in different stages of growth for grain corn in Karaj. *Journal of Soil and Water Sciences* 15(2): 290-298 (In Persian with English abstract).
- Lawlor DW and Cornic C, 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Journal of Plant Cell Environment* 25: 275-294.
- Mahrokh A, Nabipoor M, Roshanfekr H and Chookan R, 2019. Response of some physiological traits of corn to drought stress and application of cytokinin and auxin. *Journal of Environmental Stresses in Crop Sciences* 12(1): 1-15 (In Persian with English abstract).
- Manuel F, Sanchez D and Paul J, 1971. Behavior of corn and sorghum under water stress and during recovery. *Journal of Plant Physiology* 48: 613-616.
- Nasrollahi A, 2015. Investigation the effect of different drip irrigation managements on maize yield and salt distribution in the root zone, Iran. PhD Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz (In Persian with English abstract).
- Nielsen RL, 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. *Journal of Agriculture (Purdue University)* 196: 19-25.
- Saei A, Zamani Z, Talaie AR and Fatahi R, 2006. Influence of drought stress periods on olive leaves stomata. *Journal of Agriculture and Biology* 8(4): 430-433.
- Saeidinia M, Nasrolahi AH and Sharifipoor M, 2019. Investigating the ability of crop water stress index for irrigation scheduling and estimating corn forage yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(3): 555-565 (In Persian with English abstract).
- Seifi A, Mirlatifi S, Dehghanisanij H and Torabi M, 2014. Determination of crop water stress index for pistachio trees under subsurface drip irrigation using canopy-air temperature difference. *Journal of Water and Irrigation Management* 4(1): 123-136 (In Persian with English abstract).
- Sharratt BS, Reicosky DC, Idso SB and Baker DG, 1983. Relationship between leaf water potential, canopy temperature, and evapotranspiration in irrigated and no irrigated alfalfa. *Agronomy Journal* 75: 891- 894.
- Verdinejad VR, Sohrabi T and Liaghat A, 2007. Maize irrigation planning at different growth stages using crop canopy and air temperature difference index. *Proceedings of the 9th Conference on Irrigation and Evaporation Reduction*. 16 January, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran (In Persian with English abstract).

- Verdinejad VR, Besharat S, Abghari H and Ahmadi H, 2011. Estimation of maximum allowable deficit in different growth stages of fodder mays using canopy-air temperature difference. *Journal of Water and Soil* 25(6): 1344-1352 (In Persian with English abstract).
- Zia S, Spohrer K, Du W, Spreer W, Romano G, He X and Muller J, 2011. Monitoring physiological responses to water stress in two maize varieties by infrared thermography. *Journal of Agricultural and Biological Engineering* 4(3): 7-15.