



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

صفحه‌های ۱۳۴-۱۳۳

تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا

اکرم سیفی*^۱، سیدمجید میرلطیفی^۲، حسین دهقانی سانج^۳، منوچهر ترابی^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران-ایران

۲. دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران-ایران

۳. استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی، کرج-ایران

۴. عضو هیات علمی مؤسسه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، اصفهان-ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۷

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴

چکیده

تحقیق حاضر به منظور بررسی امکان استفاده از شاخص تنش آب گیاه (CWSI) برای برنامه‌ریزی آبیاری درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام گرفت. تأثیر دور آبیاری شامل سه (I₃) و چهارده (I₁₄) روز بر CWSI بررسی شد. تبخیر-تعرق از اوایل خرداد تا اواخر شهریور در دو تیمار I₃ و I₁₄ به ترتیب ۱۴۲۹/۱۹ و ۱۰۳۹/۳۳ میلی‌متر محاسبه شد. CWSI با اندازه‌گیری دمای تاج با استفاده از دماسنج مادون قرمز و همچنین مقادیر کمبود فشار بخار برای تیمارهای مختلف آبیاری محاسبه شد. با اندازه‌گیری دمای خشک و تر هوا و دمای پوشش سبز گیاهی، رابطه خط مبنای پایینی $(T_c - T_a)_{LL} = -1.642 VPD + 1.432$ به دست آمد که دارای ضریب همبستگی ۰/۷۷ و معنادار در سطح ۹۹ درصد بود. مقدار متوسط آستانه CWSI حدود ۰/۵ برای تیمار I₃ و ۰/۴۹ برای I₁₄ محاسبه شد. آزمون آماری دانکن نشان داد که اثر مقادیر مختلف عمق آبیاری بر CWSI در سطح ۹۵ درصد معنادار است. رابطه بین مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و CWSI ماهانه به صورت رابطه خطی $ET = -450.7 CWSI + 463.1$ با ضریب تعیین ۰/۶ ارائه شد که در سطح ۹۵ درصد معنادار بود. بنابراین، از رابطه یادشده می‌توان برای ارزیابی تنش آب درختان پسته استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: اختلاف دمای تاج و هوا، تبخیر-تعرق گیاهی، دماسنج مادون قرمز، دور آبیاری، کمبود فشار بخار.

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب و خاک، استفاده بهینه از نهاده‌های کشاورزی و افزایش تولید گیاه در واحد سطح از طریق کاربرد فناوری‌های جدید و استفاده از رویکردهای کشاورزی دقیق بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۳]. با مدیریت خوب آبیاری می‌توان اطمینان حاصل کرد که رطوبت خاک در طول فصل رشد، در حد کافی نگه داشته می‌شود [۱۸]. پاسخ گیاهان به آبیاری، تابعی از وضعیت آب در گیاه است که تحت تأثیر عواملی همچون پتانسیل آب خاک (انرژی لازم برای برداشت آب از خاک)، واکنش بین خاک و ریشه‌های گیاه (مقاومت و مساحت) و هدایت هیدرولیکی درون گیاه و تقاضای تبخیری (شرایط جوی) قرار می‌گیرد. از این رو، روش‌های استفاده‌شده برای برنامه‌ریزی آبیاری، شامل اندازه‌گیری شرایط جوی، رطوبت خاک یا تنش گیاهی است [۳۸]. مقدار رطوبت خاک و شرایط جوی نمی‌توانند به‌طور مؤثری تعیین‌کننده وضعیت آب گیاه باشند. بنابراین به‌منظور بهبود برنامه‌های آبیاری، از روش‌های تعیین وضعیت آب درون گیاه استفاده می‌شود [۳۱]. نتایج مطالعات نشان داده است که روش‌های مبتنی بر گیاه، قابلیت زیادی در برنامه‌ریزی آبیاری دارند. به این منظور، می‌توان از تغییرات پتانسیل آب گیاه، دمای تاج، جریان شیره و قطر بدنه گیاه استفاده کرد [۱۴].

دمای برگ به‌عنوان شاخص مقدار آب قابل استفاده و در دسترس، از سال‌های پیش کاربرد داشته است [۶، ۱۱، ۲۰، ۲۲، ۴۰]. دمای برگ گیاهان تحت تنش آبی، ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای برگ گیاهان بدون تنش است، اما اختلاف دمایی زیاد در حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد نیز ثبت شده است [۱۲، ۲۴، ۲۶]. هنگام تعرق گیاهی، انرژی رسیده به سطح برگ، به‌صورت آب مورد نیاز برای تبخیر مصرف می‌شود، بنابراین دمای برگ به کمتر از دمای هوا نزول می‌کند. با کاهش آب خاک، جذب

آب توسط گیاه نیز کاهش می‌یابد، تعرق کند می‌شود و روزه‌های برگ‌ها به‌کندی شروع به بسته شدن می‌کنند، بنابراین تبادل گرمای نهان بین سطح برگ و هوای اطراف کمتر می‌شود. در این وضعیت، انرژی تابشی سبب افزایش دمای برگ خواهد شد. هنگامی که دمای برگ از دمای هوا بیشتر شود، تعرق خیلی کند می‌شود [۳۴]. در این صورت، به‌منظور ارزیابی مقدار آب در دسترس برای استفاده در ناحیه ریشه، اختلاف بین دمای تاج گیاه و دمای هوا را می‌توان به‌عنوان شاخص تنش استفاده کرد [۶].

برای تبدیل داده‌های دمای تاج گیاه به اطلاعات بیانگر وضعیت آب گیاه، چند شاخص پیشنهاد شده است که یکی از رایج‌ترین و کاربردی‌ترین آنها، شاخص تنش آب گیاه^۱ (CWSI) است (۱۰، ۲۵). CWSI شاخص خوبی برای بیان کمبود آب در گیاهان است، اما به‌ندرت در مورد درختان استفاده شده است.

ارزیابی تنش رطوبتی درختان براساس روش‌های قدیمی به‌کاررفته برای گیاهان (مانند مقدار آب خاک، پتانسیل آب برگ یا هدایت روزه‌ای، جریان شیره) مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است و اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای را برای یک موقعیت خاک، یک برگ، شاخه یا درخت تأمین می‌کند. این روش‌ها قادر به بیان وضعیت آب درختان در یک باغ کامل نیستند و از نظر مالی نیز به‌دلیل تعدد مکان‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری‌ها، غیرعملی هستند. امروزه استفاده از دماسنج مادون قرمز^۲ (IRT) در تخمین شاخص‌های تنش، به‌نسبت ارزان، دقیق و آسان است. استفاده از CWSI محاسبه‌شده براساس اندازه‌گیری‌های مداوم IRT می‌تواند روشی ساده و کم‌هزینه برای کنترل تنش آب و برنامه‌ریزی آبیاری در

1. Crop Water Stress Index
2. Infrared Thermometers

تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا

زیتون بررسی و براساس یافته‌ها، برنامه‌ریزی آبیاری بهینه تعیین شد. پنج تیمار این تحقیق شامل ۲۵ درصد (S-0.25)، ۵۰ درصد (S-0.5)، ۷۵ درصد (S-0.75)، ۱۰۰ درصد (S-1) و ۱۲۵ درصد (S-1.25) تبخیر تجمعی از تشتک کلاس A در مدت ۵ روز بود. دو تیمار دیگر شامل آبیاری براساس کمبود رطوبت در اعماق ۰-۹۰ سانتی‌متری خاک تا حد ظرفیت مزرعه (S-C) و بدون آبیاری (S-0) بود. طی دوره پژوهش، بیشترین مقدار CWSI در تیمار S-0 و کمترین مقدار آن در تیمار S-1.25 ثبت شد. یکی از یافته‌های مهم این بود که می‌توان از دماسنج مادون قرمز به منظور تعیین تنش و برنامه‌ریزی آبیاری درختان زیتون استفاده کرد. با ارزیابی بازده استفاده از آب، پیشنهاد شد که آبیاری زمانی انجام گیرد که نیمی از آب تشتک تبخیر، تبخیر شده باشد [۶].

مقایسه جریان شیرهای و دمای تاج با روش‌های کلاسیک مانند پتانسیل آب ساقه و هدایت روزنه‌ای به منظور پیش‌بینی اثر کم‌آبیاری بر وزن میوه تازه در درختان مرکبات انجام گرفت. نتایج نشان داد که اندازه‌گیری T_c درختان مرکبات با استفاده از عکسبرداری گرمایی ابزار خوبی برای پیش‌بینی اثر کم‌آبیاری بر وزن میوه تازه است [۹].

در تحقیقی، مقادیر CWSI در باغ پسته کالیفرنای مرکزی با دو نوع آبیاری کامل و ناقص (۴۰ درصد تبخیر-تعرق) اندازه‌گیری شد. تیمار آبیاری ناقص مقادیر دمای تاج بیشتری نسبت به تیمار کنترل در طول ساعات تعرق فعال داشت و این اختلاف، بعد از آبیاری افزایش بیشتری می‌یافت، درحالی‌که CWSI در تیمار خوب آبیاری شده به‌ندرت در طول فصل، از ۰/۲ تجاوز می‌کرد و در تیمار آبیاری ناقص به مقدار ۰/۸-۰/۹ در انتهای دوره می‌رسید.

درختان باشد [۳۵]. در شرایط مزرعه‌ای از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای شامل مشاهده فقط یک گیاه یا قسمتی از گیاه به‌منظور کمی کردن تنش آب استفاده می‌شود [۱۳]. مفهوم CWSI براساس رابطه بین اختلاف دمای هوا و دمای تاج ($T_c - T_a$) و کمبود فشار بخار^۱ (VPD)، اغلب در مورد گیاهان یکساله به‌کار برده شده است (۵، ۱۹، ۲۰، ۲۸، ۳۷، ۳۹). در داخل کشور نیز تحقیقاتی درباره گیاهان یکساله انجام گرفته است. از رابطه شاخص تنش آب گیاه با متغیرهایی همچون تبخیر-تعرق، تعرق و عملکرد لوبیا به‌منظور برنامه‌ریزی آبیاری و ارائه مدل‌های عملکرد گیاهی استفاده شد. با استفاده از CWSI برابر با ۰/۱۰۶، زمان آبیاری گیاه لوبیا بین ۱۳ تا ۱۴ ساعت برآورد شد [۳۲]. شاخص تنش آبی در زمان آبیاری مزارع نیشکر بین ۰/۱ تا ۰/۳ محاسبه شد [۲]. به‌منظور برآورد تخلیه مجاز رطوبتی و برنامه‌ریزی آبیاری ذرت علوفه‌ای براساس اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا، آزمایش مزرعه‌ای در دانشکده کشاورزی کرج انجام گرفت [۴].

مطالعاتی درباره درخت انجیر [۱۹]، هلو [۱۶]، شلیل [۳۶]، گردوی آمریکایی [۱۵]، سیب [۸] و لیموشیرین [۳۳] انجام گرفته است. در این تحقیقات، رابطه بین $T_c - T_a$ و VPD برای برنامه‌ریزی آبیاری درختان با استفاده از IRT پیشنهاد شده است.

در ترکیه بررسی توانایی دماسنج مادون قرمز در اندازه‌گیری دمای برگ و متعاقباً CWSI به‌منظور استفاده در برنامه‌ریزی‌های آبیاری درختان زیتون مطالعه شد. پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی زیتون ترکیه و در سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ انجام گرفت. در این مطالعه، تأثیرات تیمارهای مختلف آبیاری بر عملکرد، دمای تاج و CWSI درختان

1. Vapor Pressure Deficit

مواد و روش‌ها

محل آزمایش

آزمایش‌ها در سال ۱۳۹۲ در باغ پسته خصوصی واقع در شهرستان سیرجان استان کرمان (مزرعه نمونه کشوری) اجرا شد. این باغ در طول جغرافیایی $55^{\circ}18'24''$ و عرض جغرافیایی $29^{\circ}30'06''$ و ارتفاع ۱۷۱۴ متر از سطح دریا واقع است. متوسط دمای سالانه، رطوبت نسبی، سرعت باد و بارندگی کل به ترتیب ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد، ۳۴/۴ درصد، ۱/۵۷ متر بر ثانیه و ۱۴۸ میلی‌متر بود. متوسط ماهانه بعضی از عوامل هواشناسی در طول مدت آزمایش که با استفاده از ایستگاه هواشناسی اتوماتیک واقع در داخل باغ و در مجاورت کرت آزمایشی به صورت ساعتی اندازه‌گیری شده‌اند، در جدول ۱ آورده شده است. خاک مزرعه در اعماق مختلف آزمایش شد و نتایج دانه‌بندی و چگالی ظاهری آن در جدول ۲ آورده شده است. هدایت الکتریکی آب آبیاری، ۸/۲ دسی‌زیمنس بر متر بود.

شاخص CWSI پاسخگوی مقادیر آبیاری در طول فصل بود. نتایج تحقیق نشان داد که CWSI شاخص خیلی حساس و خوبی برای بیان تنش آب در درخت پسته است [۳۵]. برای بررسی امکان استفاده از شاخص‌های گیاهی برای ارزیابی تنش آبی، باید آنها را در نواحی مختلف و انواع گیاهان آزمایش کرد. با توجه به پیشینه ذکر شده در بالا، تاکنون در ایران تحقیقی درباره درخت پسته، چه در سیستم‌های آبیاری سطحی و چه در سیستم‌های آبیاری تحت فشار انجام نگرفته است. از آنجا که کاربرد بهترین روش آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری به منظور حداکثرسازی مزایای استفاده از آب در باغ‌های پسته به‌ویژه در نواحی دچار محدودیت منابع آب مانند استان کرمان حیاتی است، اهداف مطالعه حاضر عبارت است از: ۱. محاسبه CWSI درختان پسته با استفاده از اختلاف دمای تاج و دمای هوا؛ ۲. بررسی تفاوت بین CWSI دو دور آبیاری سه و چهارده‌روزه درختان پسته تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی^۱ (SDI)؛ ۳. بررسی رابطه بین تبخیر-تعرق گیاهی و CWSI.

جدول ۱. داده‌های هواشناسی مزرعه آزمایشی

ماه	دمای هوا (°C)	رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد (m/s)	ساعات آفتابی (hr)	بارندگی (mm)	تبخیر-تعرق مرجع (mm)
خرداد	۲۵/۶۷	۱۸/۵۲	۱/۱۳	۱۱/۸۹	۰/۰۰	۱۶۰/۰۱
تیر	۲۹/۰۲	۱۸/۲۳	۱/۴۶	۱۱/۳	۰/۰۰	۱۸۴/۳۵
مرداد	۲۶/۹۲	۳۱/۲۹	۱/۵۴	۱۰/۵۴	۶	۱۸۸/۴
شهریور	۲۱/۸۳	۲۲/۵۸	۱/۴	۱۰/۳۲	۰/۰۰	۱۱۳/۹۵

تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا

جدول ۲. نتایج تجزیه فیزیکی خاک

عمق (cm)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	شن (درصد)	وزن مخصوص (gr/cm ³)	EC (dS/m)	بافت خاک
۰-۲۰	۵۰	۶	۴۵	۱/۲۴	۸/۹	Silt loam
۲۰-۴۰	۵۲	۶	۴۲	۱/۲۴	۸/۸	Silt loam
۴۰-۶۰	۶۲	۶	۳۲	۱/۲۴	۹/۷	Silt loam
۶۰-۸۰	۵۱	۶	۴۳	۱/۴۲	۸/۲	Silt loam
۸۰-۱۰۰	۵۱	۶	۴۳	۱/۵۴	۸	Silt loam

درخت؛ و WBI: رطوبت حجمی خاک پیش از آبیاری (درصد) است. اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک در اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متری و در فواصل ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی متری از درخت انجام گرفت.

تبخیر-تعرق گیاهی با استفاده از معادله بیلان آب در ۹۰ سانتی متر لایه بالایی خاک حساب شد. معادله به صورت زیر نوشته می‌شود [۷]:

$$ET = I + P \pm \Delta SW - DP - RO \quad (۲)$$

در این رابطه، ET: تبخیر-تعرق گیاهی (mm)؛ I: عمق آب آبیاری (mm)؛ P: عمق بارندگی (mm)، ΔSW : تغییر در ذخیره رطوبتی ۹۰ سانتی متری نیمرخ خاک (mm)؛ DP: نفوذ عمقی (mm)؛ و RO مقدار رواناب (mm) است. از آنجا که مقدار آب آبیاری کنترل می‌شود، از تلفات رواناب چشم‌پوشی شد. برای محاسبه نفوذ عمقی آب یا محاسبه مقدار فرونشست عمقی (آب زهکشی) از روش موازنه جرم به شرح زیر استفاده شد:

$$DP = I_r - \left[\sum_{j=1}^{n'} \left(\sum_{i=1}^m (W_{FCi} - W_{Bli}) \times Bd_i \times \frac{D_i}{Bd_w} \right) \right] / 100 \quad (۳)$$

$$I_r = \left[\sum_{j=1}^{n'} \left(\sum_{i=1}^n (W_{Afi} - W_{Bli}) \times Bd_i \times \frac{D_i}{Bd_w} \right) \right] / 100 \quad (۴)$$

دور آبیاری شامل فواصل سه و چهارده روز آبیاری (I_3 و I_{14}) با سه تکرار ارزیابی شد. آب آبیاری توسط سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای تیمارهای مورد نظر تأمین می‌شد و قطره‌چکان‌ها از نوع تنظیم‌کننده فشار بودند. قطر لوله‌های آبد ۱۶ میلی متر بود و در دو طرف درختان قرار داشتند. قطره‌چکان‌ها از نوع طولانی مسیر داخل لوله با بدنه ۲ لیتر بر ساعت و با فواصل ۸۰ سانتی متر روی لوله‌های آبد بودند. رقم درختان پسته، احمد آقایی و سن آنها، ۱۵ سال بود. آبیاری براساس اندازه‌گیری رطوبت خاک و به منظور رساندن رطوبت تا حد ظرفیت زراعی انجام گرفت (رابطه ۱). برای ارزیابی تغییر مقدار رطوبت خاک در عمق مؤثر ریشه، رطوبت حجمی با استفاده از دستگاه تی‌دی آر مدل TRIME-FM3 با مارک IMKO ساخت شرکت Soil Moisture به همراه لوله‌های TECHNAT مربوط به آن اندازه‌گیری شد.

$$I_n = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m (W_{FCi} - W_{Bli}) \times D_i \right) \quad (۱)$$

در این رابطه، I_n : عمق خالص آبیاری (mm)؛ W_{FC} : رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی (درصد)، D_i : عمق ناحیه ریشه (mm)، m: تعداد لایه‌های خاک در عمق توسعه ریشه؛ i: شمارشگر تعداد لایه؛ j: شمارشگر نقاط اندازه‌گیری اطراف درخت؛ n: تعداد نقاط اندازه‌گیری اطراف

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LL}}{(T_c - T_a)_{UL} - (T_c - T_a)_{LL}} \quad (5)$$

در این رابطه، $T_c - T_a$: اختلاف دمای هوا و گیاه؛ $(T_c - T_a)_{LL}$: حد پایین‌تر مورد انتظار $T_c - T_a$: اختلاف در موردی که تاج گیاه با سرعت پتانسیل تعرق می‌کند؛ و $(T_c - T_a)_{UL}$: اختلاف مورد انتظار در موردی است که تاج تعرق نمی‌کند. حدهای بالا و پایین $T_c - T_a$ استفاده شده در معادله بالا با استفاده از سه روش مختلف به دست می‌آیند.

روش اول: تحت شرایط خوب آب خاک (به طور ایده-آل، حداکثر هدایت روزنه‌ای)، $T_c - T_a$ تابعی خطی از VPD (خط مبنای بدون تنش آب، NWSB) است. مقادیر $(T_c - T_a)_{LL}$ براساس VPD واقعی محاسبه می‌شود. حد بالاتر $(T_c - T_a)_{UL}$ ثابت است. مقدار آب با حل همان معادله NWSB برای مقادیر VPD منفی فرضی به دست می‌آید که بیانگر اختلاف فشار بخار ایجاد شده توسط اختلاف دمای $T_c - T_a$ در زمان $VPD = 0$ است [۲۰]. انتظار می‌رود که مقدار حد بالا، نزدیک به عرض از مبدأ α معادله NWSB (بسته به دما) باشد و فقط در موارد خاص که $\alpha = 0$ باشد، مقدار آن برابر با α است. این روش ساده است، اما به آزمایش خاصی نیاز داشته و به مکان بستگی دارد. اگر اندازه‌گیری‌ها سه ساعت بعد از طلوع خورشید و سه ساعت قبل از غروب خورشید انجام گیرد، خط‌های مبنا مستقل از دما، تابش و سرعت باد هستند. هرچند، تعدادی این استدلال را رد کرده‌اند [۱۷، ۲۹].

روش دوم: محاسبه حدهای بالا و پایین $T_c - T_a$ نظری است. رابطه $T_c - T_a$ معادلات تعادل انرژی و انتشار را ترکیب می‌کند: حدود با اعمال مقاومت روزنه‌ای به سمت بی‌نهایت برای $(T_c - T_a)_{UL}$ یا قرار دادن آن برابر با صفر برای $(T_c - T_a)_{LL}$ به دست می‌آیند. این روش به آگاهی در

که در آن DP: نفوذ عمقی (mm)؛ I_r : عمق آب نفوذ یافته در خاک (mm)؛ W_{FCi} : رطوبت وزنی خاک در ظرفیت زراعی در لایه نام (درصد)؛ W_{Bfi} : رطوبت وزنی خاک پیش از آبیاری یا بارندگی در لایه i ام (درصد)؛ Bd_i : جرم ویژه ظاهری خاک در لایه i ام (gr/cm^3)؛ Bd_w : جرم ویژه ظاهری (gr/cm^3)؛ D_i : عمق لایه (mm)؛ n: تعداد لایه‌های خاک تا عمقی که تغییرات رطوبت مشاهده شده است؛ n' : تعداد فواصل اندازه‌گیری از محل قطره‌چکان؛ m: تعداد لایه‌های خاک تا عمق توسعه ریشه؛ و W_{Afi} : رطوبت وزنی خاک ۲۴ ساعت پس از آبیاری یا بارندگی در لایه i ام (درصد) است.

اندازه‌گیری دمای تاج و محاسبه شاخص تنش آب گیاه

دمای تاج گیاه که تحت تأثیر محیط، مرحله فنولوژیکی رشد گیاه و کمبود رطوبت در خاک است، با استفاده از دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری شد (مدل YOKOGAWA 53003). اندازه‌گیری‌ها زمانی انجام می‌گیرد که هیچ ابری در آسمان نباشد و هوا کاملاً صاف باشد. در هر کرت، اندازه‌گیری‌ها از دو درخت و در جهات شمالی، جنوبی، شرقی، غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی انجام گرفت. از میانگین‌گیری این مقادیر، متوسط دمای تاج در هر کرت محاسبه شد [۱۶]. اندازه‌گیری‌های دمای تاج ساعت ۱۱ ظهر و ۲۴ ساعت بعد از آبیاری انجام گرفت. مقادیر VPD با استفاده از معادلات سایکرومتری محاسبه شد [۷]. دمای تر و خشک با استفاده از دماسنج‌های جداگانه ایستگاه هواشناسی اتوماتیک اندازه‌گیری شد.

اگر بتوان دو حد T_c را برای تعرق پتانسیل و صفر گیاه (یا به طور مشابه، برای هدایت تاج حداقل و حداکثر) تحت شرایط محیطی داده شده به دست آورد، می‌توان شاخص

CWSI را به صورت زیر محاسبه کرد [۲۰]:

تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا

تیمار I₃ بیشتر از تیمار I₁₄ بود. مقدار ET فصل تابستان در تیمارهای I₃ و I₁₄ به ترتیب ۱۱۴۱/۸۲ و ۸۵۴/۶۳ میلی‌متر محاسبه شد. کمترین ET در تیمار I₁₄ اتفاق افتاد، زیرا آبیاری کمتری انجام گرفت. مقادیر مختلف آب آبیاری کاربردی در مطالعات مختلف و در وضعیت‌های مختلف منطقه‌ای و خاک‌های مختلف بررسی شد. مقدار آب کاربردی درختان پسته (رقم کرمانی) ایالات متحده آمریکا از اوایل خرداد تا اواخر شهریور برابر با ۷۷۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه میکروآپاش با دفعات آبیاری دو بار در هفته محاسبه شد [۲۱]. از سیستم آبیاری قطره‌ای با دو دور آبیاری هفت و چهارده روز به منظور آبیاری درختان پسته در ترکیه استفاده شد. مقدار آب آبیاری کاربردی از اول خرداد تا نیمه شهریور به ترتیب ۹۰۷ و ۴۶۷ میلی‌متر محاسبه شد [۲۳]. با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) با دور آبیاری ده روز در روستای اکبرآباد رفسنجان، حجم آب مورد نیاز آبیاری درختان پسته از خرداد تا اواخر شهریور ۴۴۰/۳ لیتر محاسبه شد [۱]. نیاز آبی پسته در آمریکا با استفاده از روش آبیاری سطحی معادل ۱۴۴۰ میلی‌متر از خرداد تا شهریور است [۱۷] که این مقدار برای پسته ایران براساس گزارش نشریه‌های مؤسسه تحقیقات آب و خاک کشور ۳۱۹ میلی‌متر محاسبه شده است [۳]. مقادیر آب آبیاری محاسباتی در تحقیق حاضر اندکی با تحقیقات بیان شده متفاوت است که این موضوع ممکن است به دلیل روش آبیاری، اقلیم و شرایط آب‌وهوایی متفاوت و همچنین تفاوت در رقم پسته مورد تحقیق باشد. یادآوری می‌شود اکثر تحقیقات پیشین درباره رقم کرمانی انجام گرفته است، در حالی که پسته احمدآقایی تاکنون در هیچ تحقیقی بررسی نشده است. یکی دیگر از دلایل تفاوت در مقدار آب آبیاری محاسباتی، اختلاف در روش محاسبه سطوح آبیاری است. در اکثر تحقیقات از کسر تبخیر-تعرق مرجع یا تبخیر از تشت به منظور محاسبه

مورد متغیرهایی نیاز دارد که به دست آوردن آنها مشکل است (مانند تابش خالص و به‌ویژه مقاومت آبرودینامیک) [۲۲]. روش سوم: از این روش برای به دست آوردن حدود $T_c - T_a$ با استفاده از اندازه‌گیری‌های مستقیم سطوح مرجع تر و خشک به صورت طبیعی یا مصنوعی استفاده می‌شود [۲۷، ۳۰]. این روش پتانسیل علمی زیادی دارد، اما در حال حاضر، برای استفاده مستقیم و پیوسته به منظور برنامه‌ریزی آبیاری کاربرد چندانی ندارد. در تحقیق حاضر، شاخص تنش آب گیاه با استفاده از روش سوم [۳۵] محاسبه شد. مقادیر دمای هوا و VPD از داده‌های هواشناسی به دست آمدند. NWSB با استفاده از معادله رگرسیون خطی مقادیر $T_c - T_a$ اندازه‌گیری شده در تیمارهای تحت آزمایش در برابر VPD در روزهای مورد نظر محاسبه شد. حد بالای $(T_c - T_a)_{UL}$ با حل معادله NWSB برای $VPD = 0$ به دست آمد، سپس برای اختلاف فشار بخار القاشده به وسیله اختلاف دمای هوا تصحیح شد [۲۰].

نتایج و بحث

آب آبیاری و تبخیر-تعرق گیاهی

برنامه‌های مختلف آبیاری، مقدار کل آب آبیاری و ET در جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۱ نیز داده‌های روزانه بارندگی و مقدار آب کاربردی نشان داده شده است. بیشترین بارندگی روزانه در DOY^۱ برابر با ۲۲۱، به مقدار ۲/۲ میلی‌متر ثبت شده است. در طول دوره بررسی، ۳۴ آبیاری با دور سه روز و ۹ آبیاری با دور چهارده روز انجام گرفت. مجموع مقادیر آب آبیاری در طول دوره تحقیق در تیمارهای I₃ و I₁₄ به ترتیب ۲۸۸۰/۹۲ و ۱۸۲۷/۵۱ میلی‌متر (معادل ۱۱۵۲/۳۷ و ۷۳۱ لیتر) محاسبه شد. ET ماهانه در

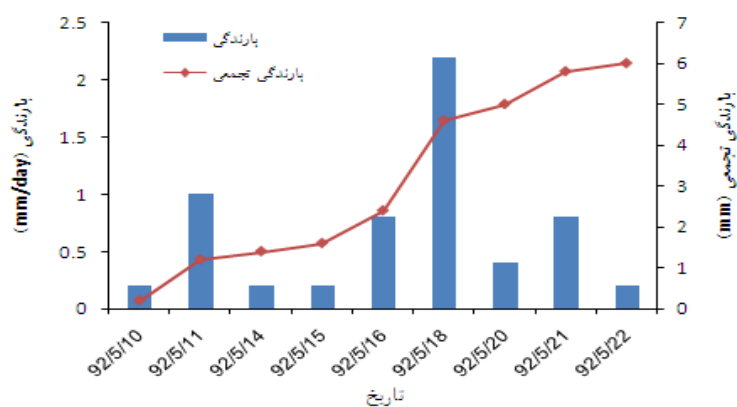
1. Day of the year

سطوح آبیاری استفاده شده است، درحالی که در تحقیق حاضر، مقدار آب آبیاری براساس اندازه‌گیری رطوبت خاک و کمبود آن نسبت به ظرفیت مزرعه در اعماق مختلف

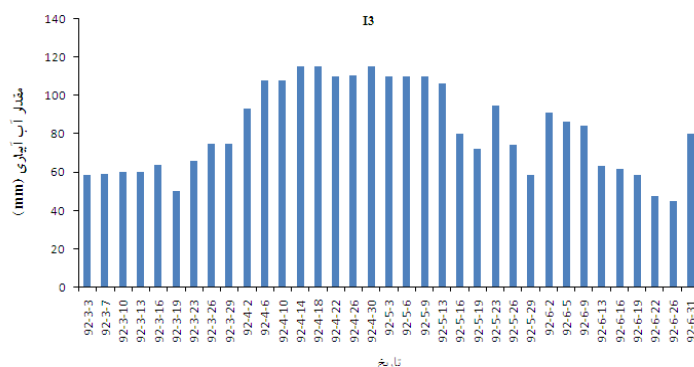
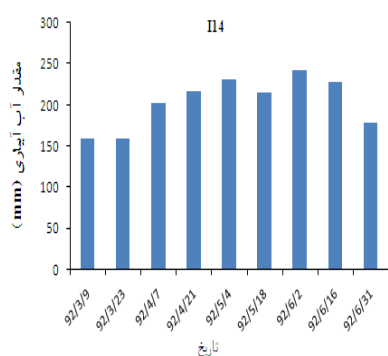
محاسبه شد. مقادیر متفاوت آب آبیاری نسبت به تحقیقات دیگر، به تفاوت در مقدار ET منجر می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳. مشخصات آبیاری تیمارهای بررسی شده در طول دوره پژوهش

تیمار	ماه	دفعات آبیاری	مقدار آب آبیاری (mm)	تبخیر-تعرق گیاهی (mm)
آبیاری با دور سه روز (I ₃)	خرداد	۹	۵۶۸/۳	۲۸۴/۳۷
	تیر	۸	۸۷۶/۲۴	۴۷۵/۸
	مرداد	۹	۸۱۷/۳۹	۴۶۳/۷۴
	شهریور	۹	۶۱۸/۹۹	۲۰۲/۲۸
آبیاری با دور چهارده روز (I ₁₄)	خرداد	۲	۳۱۶/۷	۱۸۴/۷
	تیر	۲	۴۱۸/۸۸	۲۳۸/۷۶
	مرداد	۳	۶۸۶/۸۷	۳۳۹/۱۸
	شهریور	۲	۴۰۵/۰۶	۲۷۶/۶۹



(الف)



(ب)

شکل ۱. مقادیر (الف): بارندگی و (ب): آبیاری تیمارهای بررسی شده

مدیریت آب و آبیاری

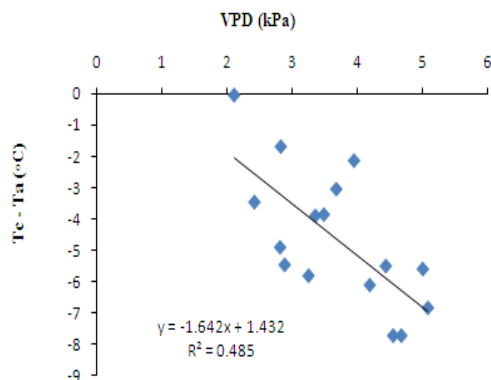
دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا

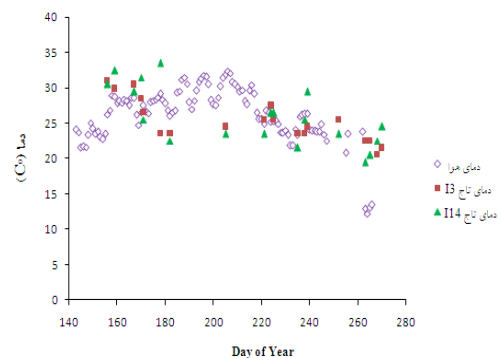
معادلات خط مبنا و شاخص تنش آب گیاه

در شکل ۲ مقادیر دمای هوای اندازه‌گیری شده توسط دماسنج تر و خشک و دمای تاج اندازه‌گیری شده توسط IRT در تیمارهای تحت مطالعه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای تاج در تیمار I₁₄ در اکثر حالت‌ها بیشتر از تیمار I₃ است. در شکل ۳ نمودار تغییرات اختلاف دمای تاج و هوا در برابر VPD در تیمار I₃ به‌عنوان تیمار «خوب آبیاری شده» آورده شده است. براساس این شکل، رابطه خط مبنا یابینی به‌منظور برآورد CWSI، به‌صورت $(T_c - T_a)_{LL} = -1.642 VPD + 1.432$ است. این معادله دارای ضریب تعیین ۰/۴۹ و ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۷ است که در سطح ۹۹ معنادار است. در شکل ۴ نمودار تغییرات اختلاف دمای تاج و هوا در روزهای

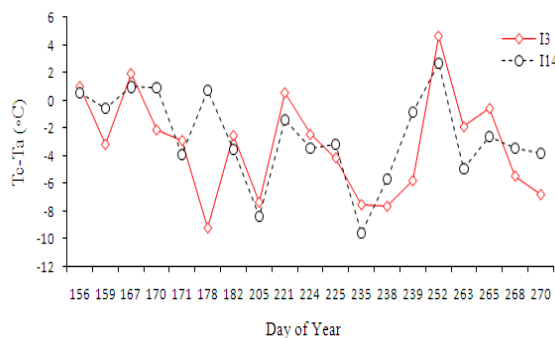
مختلف سال و مقادیر CWSI تیمارهای آبیاری تحت مطالعه ارائه شده است. در روزهای آبیاری تیمار I₁₄، به‌دلیل کاربرد آب بیشتر، مقادیر شاخص تنش کاهش می‌یابد و نزدیک به صفر خواهد بود. اما بعد از آبیاری مقدار اختلاف افزایش می‌یابد و بیشتر از تیمار I₃ خواهد بود. این امر به‌دلیل دسترسی دائم گیاه به رطوبت در تیمار I₃ است. در تیمار I₁₄ به تدریج رطوبت منطقه ریشه کاهش می‌یابد که سبب افزایش دمای گیاه تا آبیاری بعد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، معمولاً در طول روزهای آبیاری تنش آب و در نتیجه CWSI کاهش می‌یابد و سپس به‌طور پیوسته تا حداکثر مقدار قبل از آبیاری بعدی افزایش می‌یابد، زیرا رطوبت خاک در ناحیه ریشه کاهش پیدا می‌کند.



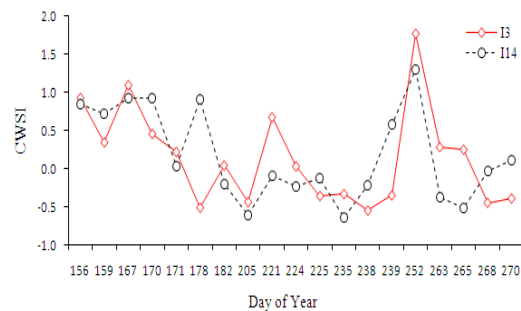
شکل ۳. نمودار تغییرات اختلاف دمای تاج و هوا در برابر کمبود فشار بخار



شکل ۲. مقادیر دمای تاج و دمای هوا در طول دوره مطالعاتی



شکل ۴. نمودار تغییرات اختلاف دمای تاج و دمای هوا و مقادیر CWSI در روزهای مختلف سال



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

تبخیر-تعرق گیاهی در جدول ۴ آورده شده است. تأثیر سطوح آبیاری بر CWSI از نظر آماری و براساس آزمون دانکن در سطح ۹۵ درصد معنادار بود. میانگین مقادیر CWSI دو تیمارهای I₃ و I₁₄ به ترتیب ۰/۵ و ۰/۴۹ بود. همان طور که انتظار می رفت، میانگین مقادیر CWSI به طور موازی با کاهش آب آبیاری، افزایش یافت، درحالی که مقادیر شاخص تنش آب گیاه افزایش پیدا کرد.

رابطه شاخص تنش رطوبتی با تبخیر تعرق گیاه

به منظور تعیین رابطه ET با شاخص CWSI، ابتدا مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به روش بیلان آبی (معادله ۲) محاسبه و میانگین مقادیر شاخص CWSI در تیمارهای مختلف تعیین شد. کل آب مصرفی گیاه (تبخیر-تعرق گیاه) در تیمارهای I₃ و I₁₄ به ترتیب ۱۴۲۹/۱۹ و ۱۰۳۹/۳۳ میلی متر بود. همچنین میانگین CWSI تیمارهای I₃ و I₁₄ به ترتیب ۰/۵ و ۰/۴۹ محاسبه شد. پس از محاسبه ET و متوسط CWSI به صورت ماهانه برای تیمارهای مختلف، رابطه بین مقادیر تبخیر-تعرق واقعی و CWSI ماهانه به صورت رابطه خطی $ET = -804.7 CWSI + 680.1$ با ضریب تعیین ۰/۶ ارائه شد که در سطح ۹۵ درصد معنادار است (شکل ۵). با استفاده از رابطه یادشده می توان با توجه به مقدار CWSI ماهانه، مقدار ET ماهانه (و بر عکس) را برآورد کرد.

مقادیر CWSI براساس سطوح مختلف آبیاری و تنش، بین صفر (حداقل تنش) و دو (حداکثر تنش) تغییر می کنند. هنگامی که گیاه در حد پتانسیل تعرق می کند، دمای برگ کمتر از دمای هوا و در نتیجه $CWSI = 0$ خواهد بود. زمانی که گیاه تحت تنش آبی قرار می گیرد، تعرق کاهش، دمای سطح برگ افزایش و در نتیجه CWSI افزایش می یابد. با کاهش مقدار تعرق گیاه، CWSI افزایش می یابد. مقادیر CWSI دامنه ای از ۰/۰۳ تا حداکثر مقدار ۱/۳ در تیمار I₃ و از ۰/۰۳ تا حداکثر مقدار ۱/۷۷ در تیمار I₁₄ دارند.

معادله خط مبنای پایین به دست آمده در تحقیق حاضر، اندکی با معادله گزارش شده توسط محققان دیگر متفاوت بود. این امر ممکن است ناشی از تفاوت در نوع خاک، شرایط اقلیمی و رقم پسته مورد آزمایش و شاید هم به علت تعداد کم دفعات اندازه گیری دمای پوشش گیاهی باشد. برای مثال، حداکثر مقدار CWSI درختان پسته کالیفرنیا در تیمار خوب آبیاری شده ۰/۲ و در تیمار دچار تنش در حدود ۰/۹ محاسبه شد. رابطه اختلاف دمای تاج و دمای هوا با VPD به صورت $(T_c - T_a)_{LL} = -1.33 VPD + 2.44$ ارائه شد [۳۵].

تأثیر مقادیر مختلف آبیاری بر CWSI

مقادیر میانگین CWSI هر تیمار و مجموع مقادیر آبیاری و

جدول ۴. مقایسه میانگین تیمارها

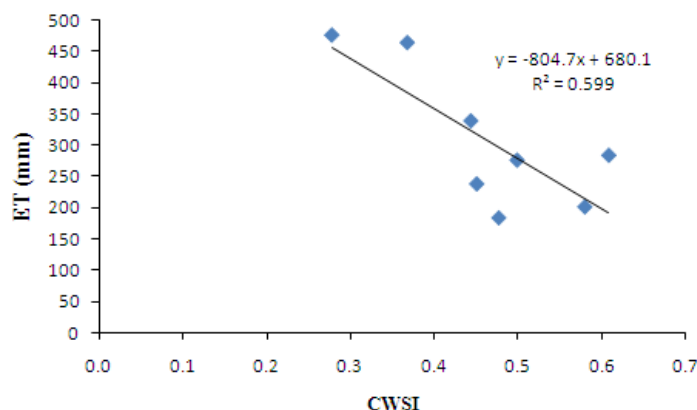
میانگین CWSI	آبیاری (mm)	تیمار
۰/۵ ^a	۲۸۸۰/۹۲	I ₃
۰/۴۹ ^b	۱۸۲۷/۵۱	I ₁₄

اعدادی که حروف متفاوت دارند، دارای اختلاف معنادار در سطح ۹۵ درصد هستند.

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

تعیین شاخص تنش آب برای درختان پسته تحت روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از اختلاف دمای تاج گیاه و هوا



شکل ۵. رابطه میانگین فصلی شاخص CWSI با تبخیر- تعرق گیاهی پسته

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

استفاده از دمای پوشش سبز گیاهان به‌عنوان شاخصی برای برآورد مقدار تنش آبی گیاه، حدود دو دهه قبل با توجه جدی پژوهشگران مواجه شد. شاخص CWSI براساس سه عامل محیطی اصلی شامل دمای پوشش گیاه، دمای هوا و کمبود فشار بخار هوا محاسبه می‌شود. این سه عامل تأثیر زیادی بر آب مصرفی توسط گیاه و در نتیجه نیاز آبیاری دارند. بنابر نتایج به‌دست‌آمده می‌توان از CWSI برای اندازه‌گیری وضعیت آب گیاه و بهبود برنامه‌ریزی آبیاری درخت پسته استفاده کرد. براساس نتایج، برای تنظیم آبیاری می‌توان از مقدار میانگین CWSI برابر با ۰/۴۱ را به‌عنوان مقدار آستانه، و از متوسط CWSI حدود ۰/۲۲ در برنامه‌ریزی آبیاری پیشنهاد داد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های بیشتری برای رسیدن به این نتایج و ارزیابی CWSI تجربی برای کنترل تنش آب درخت پسته در این منطقه و در دیگر مناطق کشت پسته ایران انجام گیرد و مقدار بحرانی CWSI با آزمایش‌های مزرعه‌ای طولانی‌مدت بررسی شود. به‌علاوه، مقادیر CWSI را می‌توان برای برآورد عملکرد استفاده کرد. پیش‌بینی پاسخ عملکرد به تنش آب گیاه در توسعه برنامه‌ها و تصمیم‌گیری‌ها برای استفاده کشاورزان، مشاوران آنها و پژوهشگران به‌منظور

مدیریت آبیاری در وضعیت محدودیت منابع بسیار مهم است.

منابع

- اسلامی ا. و نقوی ه (۱۳۸۹) بررسی امکان استفاده از آب با کیفیت نامتعارف در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در کانال کود باغات پسته. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۷۵ ص.
- برومندنسب س.، کشکولی ح.ع.، ناصری ع.ع. و رشیدزاده ف (۱۳۸۶) تعیین زمان آبیاری با استفاده از شاخص تنش آبی در گیاه نیشکر. پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی. ۱(۷): ۱-۶.
- انجمن پسته ایران (۱۳۹۲) پسته. ماهنامه داخلی انجمن پسته ایران. ۸۹(۵): ۵۶ ص.
- وردی‌نژاد و.، بشارت س.، عبقری ه. و احمدی ح (۱۳۹۰) برآورد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد با استفاده از اختلاف دمای پوشش سبز گیاه و هوا. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵(۶): ۱۳۴۴-۱۳۵۲.

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳

5. Abduljabbar AS, Lugg DG, Sammis TW and Gay LW (1985) Relationships between crop water-stress index and alfalfa yield and evapotranspiration. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 28:454-461.
6. Akkuzu E, Kaya U, Çamoğlu G, Mengü GP and Aşık S (2013) Determination of Crop Water Stress Index and Irrigation Timing on Olive Trees Using a Handheld Infrared Thermometer. Irrigation and drainage, ASCE. 139:728-737.
7. Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M (1998) Crop Evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 299p.
8. Andrews PK, Chalmers DJ, Moremong M (1992) Canopy air temperature differences and soil-water as predictors of water stress of apple-trees grown in a humid, temperate climate. American Society for Horticultural Science. 117:453-458.
9. Ballester C, Castel J, Jiménez-Bello MA, Castel JR and Intrigliolo DS (2013) Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees. Agricultural Water Management. 122: 1-6.
10. Cohen Y, Alchanatis V, Meron M, Saranga Y and Tsipris J (2005) Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. Experimental Botany. 56: 1843-1852.
11. Colaizzi PD, Barnes EM, Clarke TR, Choi CY and Waller PM (2003) Estimating soil moisture under low frequency surface irrigation using crop water stress index. Irrigation and Drainage Engineering. 129(1): 27-35.
12. Drake BG (1976) Estimating water status and biomass of plant communities by remote sensing. Water and plant life. In: Lange OL, Kappen L and Shultze ED (Eds.), Springer, Berlin, 572-575.
13. Erdem Y, Arin L, Erdem T, Polat S, Deveci M, Okursoy H and Gultas HT (2010) Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea L. var. italica*). Agricultural Water Management. 98: 148-156
14. Fernandez JE and Cuevas MV (2010) Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. Agricultural and Forest Meteorology. 150(2), 135-151.
15. Garrot DJ, Kilby MW, Fangmeier DD, Husman SH and Ralowicz AE (1993) Production, growth, and nut quality in pecans under water-stress based on the crop water-stress index. American Society for Horticultural Science. 118:694-698.
16. Glenn D, Worthington J, Welker W and McFarland M (1989) Estimation of peach tree water use using infrared thermometry. American Society for Horticultural Science. 114:737-741.
17. Goldhamer DA (2005) Irrigation Management. In: Ferguson L (Eds.), University of California Pistachio Production. 103-116.
18. Goldhamer DA (2011) Tree water requirements and regulated deficit irrigation [Online]. Available at <http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/files/73693.pdf> (accessed 12 October 2011). University of California, Davis.
19. Idso SB (1982) Non-water-stressed baselines - a key to measuring and interpreting plant water-stress. Agricultural Meteorology. 27:59-70.
20. Idso SB, Jackson RD, Pinter PJ and Hatfield JL (1981) Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agricultural Meteorology. 24: 45-55.

21. Iniesta F, Testi L, Goldhamer DA and Fereres E (2008) Quantifying reductions in consumptive water use under regulated deficit irrigation in pistachio (*Pistaciavera L.*). *Agricultural water management*. 9: 877–886.
22. Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ and Pinter JR (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*. 17(4): 1133–1138.
23. Kanber MR, Steduto P, Aydin Y and Diker K (2005) Effects of Different Water and Nitrogen Levels on the Yield and Periodicity of Pistachio (*Pistaciavera L.*). *Turkish Journal of Agricultural Ferocity*. 29: 39-49.
24. Kent D, Halcrow D, Wyatt T and Shultz S (2004) Detecting stress in southern live oak (*Quercus virginiana*) and sand live oak (*Q. virginiana var. Geminata*). *Arboriculture*. 30(3): 146–153.
25. Leinonen I and Jones HG (2004) Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Experimental Botany*. 55: 1423–1431.
26. Mattson WJ and Haack RA (1987) The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *BioScience*. 37(2): 110–118.
27. Moller M, Alchanatis V, Cohen Y, Meron M, Tsipris J, Naor A, Ostrovsky V, Sprintsin M and Cohen S (2007) Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Experimental Botany*. 58:827–838.
28. Nakayama FS and Bucks DA (1983) Application of a foliage temperature based crop water-stress index to Guayule. *Arid Environment*. 6:269–276.
29. Nielsen DC (1994) Non-water-stressed baselines for sunflowers. *Agricultural Water Management*. 26: 265–276
30. Qiu G, Momii K and Yano T (1996) Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature. I. Theoretical consideration and field verification. *Japanese Society of Irrigation Drainage & Reclamation Engineering*. 64:401–410.
31. Reginato RJ and Howe J (1985) Irrigation scheduling using crop indicators. *Irrigation and Drainage Engineering*. 111(2): 125–133.
32. Sepaskhah AR and Ilampour S (1996) Relationships between yield, crop water stress index (CWSI) and transpiration of cowpea (*Vignasinensis L.*). *Agronomie*. 16: 269-279.
33. Sepaskhah AR and Kashefipour SM (1994) Relationships between leaf water potential, CWSI, yield and fruit-quality of sweet lime under drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 25: 13–22.
34. Taiz L and Zeiger E (2008) *Bitkifizyolojisi*. 1th Ed. Palme Yayincilik, Ankara, Turkey, 720p (in Turkish).
35. Testi L, Goldhamer DA, Iniesta F and Salinas M (2008) Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrigation Science*. 26: 395–405.
36. Tormann H (1986) Canopy temperature as a plant water stress indicator for nectarines. *South African Journal of Plant and Soil*. 3: 110–111.
37. Wanjura DF, Hatfield JL and Upchurch DR (1990) Crop water-stress index relationships with crop productivity. *Irrigation Science*. 11:93–99.
38. White S and Raine SR (2008) A grower guide to plant based sensing for irrigation scheduling [Online]. Available at http://irrigationfutures.org.au/imagesDB/news/PlantBasedSensingForIrrigationScheduling_280508.pdf. National centre for engineering in agriculture publication, 1001574(6). University

- of Southern Queensland, Toowoomba, QLD. Australia.
39. Yazar A, Howell TA, Dusek DA and Copeland KS (1999) Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn. Irrigation Science. 18:171-180.
40. Yuan G, Luo Y, Sun X and Tang D (2004) Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. Agricultural Water Management. 64: 29-40.