

## پایش وضعیت آبی درختان زیتون به روش تصویربرداری حرارتی

پدرام شعاع<sup>۱</sup>، عباس همت<sup>۲\*</sup>، رسول امیرفتاحی<sup>۲</sup>، مهدی قیصری<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۲/۱)

### چکیده

به منظور کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، روش‌هایی با عنوان کم‌آبیاری، با اعمال سطح مشخصی از تنش آبی پیشنهاد می‌شود. مدیریت و کنترل دقیق سطح تنش آبی اعمال‌شده به گیاه، برای جلوگیری از افت شدید محصول، ضروری است. روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تنش آبی، مانند هدایت روزنه‌ای، وقت‌گیر است و به نیروی متخصص و تکرار زیاد نیاز دارد. دمای سطح برگ یا کانوپی می‌تواند شاخصی از هدایت روزنه‌ای یا سطح تنش آبی باشد، ولی عوامل محیطی نیز نقش به‌سزایی در دمای کانوپی دارند. با مقایسه دمای کانوپی با دمای دو مرجع مصنوعی تر و خشک در شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) از تأثیر عوامل محیطی کاسته می‌شود. ترموگرافی روشی نوین در اندازه‌گیری دما به صورت غیرتماسی است که دمای گیاه را بدون دخالت در فعالیت برگ‌ها خارج می‌کند. هدف اصلی این پژوهش استخراج شاخص تنش آبی گیاه با تصاویر ترموگرافی و بررسی توانایی آن در پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای است. بدین منظور از درختان زیتون در پنج سطح کم‌آبیاری و از هر سطح سه درخت، تصویربرداری شد. مراجع تر و خشک نیز برای این منظور طراحی و در میدان دید دوربین قرار داده شد. نتایج نشان داد که این شاخص به‌خوبی قادر به پیش‌بینی هدایت روزنه‌ای ( $R^2=0/83$ ) درخت زیتون است.

**کلیدواژگان:** ترموگرافی، تنش آبی، دمای کانوپی، شاخص تنش آبی گیاه، هدایت روزنه‌ای.

### مقدمه

کمبود آب شیرین از بزرگترین چالش‌هایی است که بشر در سال‌های اخیر با آن روبرو شده است. کشاورزی بزرگترین مصرف‌کننده آب شیرین است. به عبارت دیگر این بخش حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد آب شیرین استحصال‌پذیر را استفاده می‌کند، ولی در بهترین شرایط نیز به راندمان بالایی نخواهد رسید (Hamdi et al., 2003). از جدیدترین راهکارهای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، استفاده از روش‌های کم‌آبیاری است. هنگامی که آب انتقالی به گیاه کمتر از نیاز آبی گیاه (تبخیر-تعرق روزانه، ET) باشد، گیاه دچار سطحی از تنش آبی خواهد شد. با اعمال سطوح مشخص و دقیقی از تنش آبی، می‌توان کاهش بسیار کمی در تولید محصول و در پی آن، افزایش راندمان مصرف آب (نسبت مقدار عملکرد محصول به آب مصرفی) یا به اختصار WUE را انتظار داشت (Costa et al.,

2007). زیتون از گیاهان مقاوم به خشکی است که اخیراً با افزایش نیاز بازار با توجه به تأثیر زیتون در افزایش سلامت و امکان رشد در مناطق خشک و نیمه‌خشک و شرایط سخت جوی، با استقبال زیادی در جهان روبرو شده است (Caruso et al., 2013). علاوه بر این، اعمال سطوح مشخصی از تنش قبل از برداشت میوه موجب افزایش کیفیت روغن زیتون می‌شود (Agam et al., 2013). بنابراین پایش وضعیت آبی گیاه برای اعمال سطوح مشخصی از تنش آبی، کمک شایانی به مدیریت هرچه بهتر آبیاری و افزایش کیفیت محصول می‌کند.

روش‌های مرسوم پایش وضعیت آبی گیاهان را می‌توان به روش‌های خاک‌مبنا، با اندازه‌گیری پتانسیل یا محتوای آبی خاک، روش‌های گیاه‌مبنا مانند پتانسیل یا محتوای رطوبتی برگ، و روش‌های فیزیولوژیکی از قبیل هدایت روزنه‌ای و جریان شیره گیاهی تقسیم کرد. از مشکلات این روش‌ها می‌توان به زمان و هزینه بالای لازم برای نمونه‌گیری کافی و در نتیجه دستیابی به وضعیت کلی گیاه به دلیل زمان‌بر بودن این آزمایش‌ها اشاره کرد (Jackson et al., 1981; Jones, 2004).

\* نویسنده مسئول: ahemmat@cc.iut.ac.ir

بخار هوا، و سرعت باد نیز باعث تغییر در دمای برگ خواهند شد (Maes and steppe, 2012). برای پایش وضعیت آبی گیاه به وسیله دمای گیاه نرمال سازی دمای گیاه با چهار عامل ذکر شده لازم است (Jones et al., 2009). برای حل این مشکل شاخص‌های تنش زیادی ارائه شده است که براساس هدف آزمایش می‌توان از آنها استفاده کرد (Maes and steppe, 2012).

قوی‌ترین روش در ارزیابی تنش رطوبتی شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)<sup>۲</sup> است. شاخص تنش آبی گیاه بر مقایسه دمای گیاه مورد نظر با دو دمای فرضی گیاه پتانسیل و گیاه خشک استوار است. گیاه پتانسیل همان گیاه مورد نظر در شرایطی است که با نرخ بیشینه خود تعرق ( $\lambda E_{pot}$ ) می‌کند. این گیاه هیچ‌گونه تنش رطوبتی ندارد. گیاه خشک دارای نرخ تعرق صفر است. این گیاه فرضی را می‌توان با سطوح مرجع مصنوعی شبیه‌سازی کرد. بنابراین، این گیاه در بیشینه تنش آبی قرار دارد. این شاخص به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$CWSI = 1 - \frac{E}{E_{pot}} = \frac{(T_c - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه:  $T_c$  دمای کانوپی،  $T_{wet}$  دمای مرجع تر، و  $T_{dry}$  دمای مرجع خشک است. جنس این مراجع عموماً از لایه‌های بدون بافت پنبه و یا ویسکوز استفاده می‌شود و شکل این مراجع نیز متفاوت است و برای شرایط گوناگون اندازه‌گیری طراحی و ساخته می‌شود. (Meron et al., 2010) گزارش داده‌اند که با به‌کاربردن سطوح مرجع یادشده، CWSI با پتانسیل آب برگ در مزارع پنبه و سویا رابطه بهتری پیدا کرد. از شاخص CWSI برای تعیین سطح تنش رطوبتی در باغات انگور نیز با موفقیت استفاده شده است (Möller et al., 2007). با توجه به سادگی روش اندازه‌گیری، در صورت وجود دوربین‌های ترموگرافی، می‌توان از این روش برای تهیه نقشه تغییرپذیری تنش آبی در باغات استفاده کرد.

محققان در شرایط آب‌وهوایی گوناگون رابطه میان شاخص تنش آبی گیاه و هدایت روزه‌ای را بررسی کردند و دریافتند که رابطه میان CWSI و هدایت روزه‌ای خطی نیست ولی مستقل از تشعشعات خورشیدی و فشار بخار هوا است (Maes et al., 2011). اگر فقط خطاهای اندازه‌گیری را به حساب آوریم توان تفکیک‌پذیری این شاخص میان تیمارهای متفاوت تنش آبی با افزایش تشعشعات خورشیدی، دمای هوا، افت فشار بخار هوا، و کاهش سرعت باد که بیشتر در اواسط

با کمبود آب در منطقه ریشه، گیاه برای ازدست‌ن دادن رطوبت خود از طریق تعرق، روزه‌های خود را می‌بندد. این امر از اتلاف انرژی ورودی به برگ از طریق تابش خورشیدی جلوگیری می‌کند. اتلاف‌نشدن انرژی از طریق تعرق موجب افزایش دمای برگ خواهد شد. بنابراین دمای برگ یا کانوپی شاخصی از وضعیت آبی گیاه خواهد بود (Jones et al., 2009).

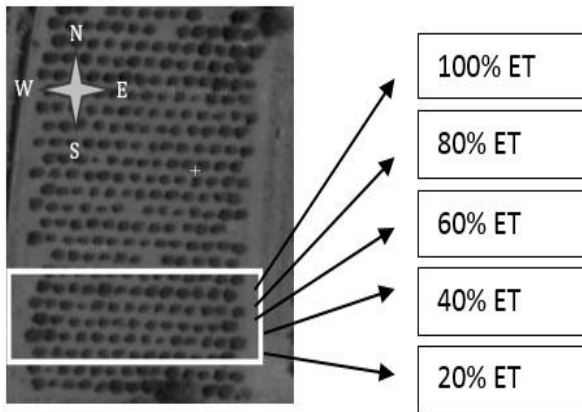
با گسترش روزافزون فناوری‌های غیرتماسی، امکان اندازه‌گیری دمای کانوپی گیاه به صورت سنجش از دور و بدون دخالت در فعالیت برگ‌ها امکان‌پذیر شده است. روش‌های غیرتماسی را می‌توان به دو دسته: ۱. تصویربرداری (دوربین‌های ترموگرافی)، و ۲. ترمومتری تقسیم کرد. با نصب ترمومتر فرسوخ در قسمتی از مزرعه، این وسیله دمای میانگین میدان دید خود را اندازه‌گیری می‌کند. عیب اساسی این‌گونه وسایل ارائه دمای متأثر از تابش حرارتی گیاه و پس‌زمینه مانند خاک و احتمالاً آسمان است. این اختلاط استخراج دمای کانوپی را بسیار سخت می‌کند و خطای تخمین را بالا می‌برد (Jackson et al., 1981; Moran et al., 1994). به وسایلی که تصویر حرارتی ارائه می‌کنند، دوربین ترموگرافی گفته می‌شود.

این دوربین‌ها بسیار دقیق‌اند و قابلیت ارائه دمای دقیق سطح ( $T_s$ )، به‌جای دمای تابشی ( $T_{br}$ ) را دارند، اما دمای پس‌زمینه و ضریب گسیلندگی باید توسط کاربر به دوربین داده شود (Jones et al., 2009; Maes and steppe, 2012). مزیت اصلی روش تصویربرداری امکان انتخاب کانوپی گیاه با نرم‌افزار دوربین ترموگرافی است که با کشیدن اشکالی روی مناطق مورد نظر (ROI)<sup>۱</sup> و استخراج دمای میانگین این قسمت‌ها صورت می‌پذیرد (Pou et al., 2014). بیان انرژی برای برگ با رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$R_n = H + E \quad (\text{رابطه ۱})$$

$R_n$  میزان تشعشعات خالص،  $H$  شار گرمایی محسوس،  $\lambda E$  شار گرمای نهان است و هر دو برحسب وات بر مترمربع بیان می‌شوند. شار گرمایی محسوس، انتقال گرما یا انرژی به صورت همرفت از سطح برگ به محیط پیرامون است که تابع سرعت باد، دمای هوا، و همچنین دمای برگ است. شار گرمای نهان که به تعرق برگ مرتبط می‌شود نیز تابعی از فشار بخار هوا و همچنین میزان هدایت روزه‌ای برگ به بخار آب است که شاخص تنش آبی محسوب می‌شود. پس علاوه بر تغییرات هدایت روزه‌ای، تشعشعات خالص خورشیدی، دمای هوا، فشار

بود. هر ردیف از درختان به یک سطح تنش اختصاص داده شده بود. از هر سطح تنش به صورت تصادفی سه درخت انتخاب شد. آزمایش در روزهای سی‌ام و سی‌ویکم تیرماه ۱۳۹۳ انجام شد و در حوالی روزهای آزمایش هیچ بارندگی رخ نداد. به منظور حصول بهترین نتایج و استفاده از نتایج برای پیش‌بینی زمان آبیاری، این آزمایش‌ها در روز قبل از آبیاری انجام گرفت.



شکل ۱. نقشه هوایی باغ پژوهشی زیتون (نقشه گوگل) و تیمارهای آبی برحسب تبخیر تعرق روزانه

تصاویر گرمایی در این تحقیق با یک دوربین ترموگرافی غیرخنک‌شونده (شکل ۲)، مدل SAT G90 ساخت شرکت مادون قرمز گوانگژو فراهم شد. این دوربین به فناوری سنسورهای میکروبولومتر، حساس به باند طول موج ۸ تا ۱۴ میکرومتر مجهز است و قدرت تفکیک ۳۲۰ در ۲۴۰ پیکسل در میدان دید ۲۴ در ۱۸ درجه را دارد. این دوربین دارای قدرت تفکیک دمایی ۰/۰۸ درجه سلسیوس است. دوربین قابلیت ارائه تصاویر مرئی نیز داشت. یک حسگر CCD در بالای لنز ترموگرافی تعبیه شده بود که تصاویر مرئی را فراهم می‌آورد. برای کارایی بهتر دوربین، دمای ارائه‌شده با دمای محیط، رطوبت نسبی، و همچنین فاصله کانوپی از لنز کالیبره شد. این موارد با یک دستگاه هواشناسی قابل حمل (Weather meter, AZCO) اندازه‌گیری و وارد نرم‌افزار دوربین شد. مورد بعدی برای اندازه‌گیری دما ضریب گسیلندگی است که براساس مطالعات پیشین مقدار ۰/۹۸ برای درخت زیتون پیشنهاد شده است (Agam et al., 2013).

با توجه به الگوی کشت درختان، دوربین ترموگرافی در فاصله ۴ متری از هر درخت و توسط سه پایه برای تصویربرداری ثابت می‌شد. با این شرایط تصویربرداری دارای قدرت تفکیک مکانی ۰/۵۳ سانتی‌متر (هر پیکسل ۰/۲۸ سانتی‌متر مربع) بود.

تابستان مناطق گرم‌وخشک مانند مرکز ایران رخ می‌دهد، افزایش می‌یابد.

موضوع شایان توجه دیگری که در اندازه‌گیری دمای کانوپی وجود دارد، زاویه و جهت بهینه تصویربرداری است. فقط در جهتی خاص که به ساختار کانوپی، زاویه تصویربرداری نسبت به سمت‌الرأس<sup>۱</sup> (خط عمود بر صفحه کانوپی در دید از بالا)، و بسیاری دیگر از شرایط اندازه‌گیری بستگی دارد، دمای کانوپی به دست آمده از تصویر گرمایی درکی درست از وضعیت آبی گیاه ارائه خواهد داد. به این دما، دمای برگ بزرگ گفته می‌شود (Matsushima, 2005). وقتی تصویربرداری دید از بالا انجام می‌شود درحقیقت از لایه بیرونی کانوپی تصویر برداشته شده و این لایه چون تحت تابش مستقیم خورشید قرار گرفته است، دمایی بالاتر از دمای برگ بزرگ را نشان می‌دهد. تصویربرداری دید از کنار کانوپی، بهترین شرایط برای استخراج دمای برگ بزرگ است (Blonquist et al., 2009). جهت‌های تصویربرداری بستگی زیادی به جهت تابش خورشید دارد که بنابر شرایط آزمایش می‌بایست تعیین شود (Maes and steppe, 2012).

هدف از این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از دمای کانوپی درخت زیتون مستخرج از تصاویر ترموگرافی فروسرخ به منظور پایش وضعیت آبی و همچنین بررسی استفاده از شاخص تنش آبی گیاه با استفاده از مراجع مصنوعی طراحی شده بود. امکان‌سنجی این روش در پیش‌بینی وضعیت آبی گیاه در شرایط ایران کمک شایانی به افزایش راندمان مصرف آب در بخش کشاورزی خواهد کرد.

## مواد و روش‌ها

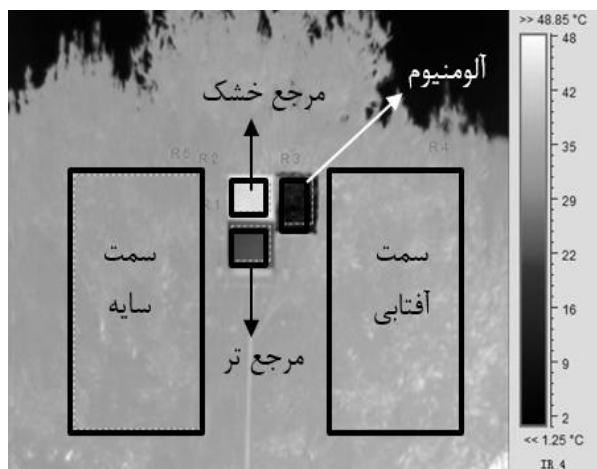
این طرح در باغ پژوهشی زیتون واقع در اصفهان انجام گرفت. میانگین سالانه بارش در این باغ ۱۸۵ میلی‌متر است و گرم‌ترین ماه سال تیرماه گزارش شده است. این باغ دارای درختان زیتون ۸ساله با آرایش کشت ۴×۴ متر و ارقام زرد، بلیدی، و روغنی است که در این طرح برای یکسان‌بودن نتایج فقط از درختان رقم زرد استفاده شد. آزمایش در پنج سطح کم‌آبیاری (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) محاسبه‌شده با روش پنمن - مونتیس<sup>۲</sup> انجام شد (شکل ۱).

روش آبیاری از نوع آبیاری تحت فشار زیرسطحی است که به صورت لوله‌های سوراخ‌دار و پوشش‌داده‌شده با الیاف نرم و توری‌دار، در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متری خاک قرار داده شده

1. Zenithal angel  
2. Pennman-Monteith

خشک در بالا و مرجع تر در پایین در نظر گرفته شد. در اکثر مطالعات برای دمای مرجع خشک، دمای هوای مثبت پنج درجه پیشنهاد شده است و در این پژوهش نیز استفاده و کارایی دو روش ارزیابی شد (Irmak et al., 2000).

با توجه به رابطه ۲ برای به دست آوردن شاخص تنش آبی گیاه به سه دمای کانوپی، مرجع تر، و مرجع خشک نیاز است. با توجه به شکل ۳، دمای قسمت‌های گوناگون از تصویر ترموگرافی استخراج شد. برای استخراج دمای کانوپی از اشکال مستطیلی در نرم‌افزار دوربین استفاده شد. در این جهت از تصویربرداری، سمت راست کانوپی تحت تابش مستقیم نور خورشید بود که اکثر برگ‌ها در حالت آفتابی کامل بودند، این سمت آفتابی نامیده شد. سمت چپ کانوپی در تصویر بیشتر در سایه بود، به طوری که برگ‌های سایه بسیار بیشتر از برگ‌های آفتابی بودند. به این سمت نیز سمت سایه اطلاق می‌شود. در قسمت بعدی در زمینه استفاده از دمای قسمت‌های یادشده در شاخص تنش بحث خواهد شد. تصویربرداری در دو جهت جنوبی شمالی (جهت اول) و شرقی غربی (جهت دوم) و در ساعت ۱۲ ظهر انجام گرفت (Meron et al., 2010).



شکل ۳. استخراج دماهای گوناگون از تصویر حرارتی

برای بررسی توانایی این روش در پیش‌بینی وضعیت آبی گیاه، رابطه میان شاخص تنش آبی گیاه با هدایت روزنه‌ای بررسی شد.

هدایت روزنه‌ای برگ‌ها با یک دستگاه پرومتر برگ<sup>۱</sup> ساخت شرکت دکاگون<sup>۲</sup> ایالات متحده (شکل ۴)، بدون درنگ پس از تصویربرداری، اندازه‌گیری شد.



شکل ۲. دوربین ترموگرافی

به منظور بازسازی شرایط گیاه پتانسیل و خشک، مراجع تر و خشک روی یک پایه در کمترین فاصله ممکن از درخت در زاویه دید دوربین قرار داده شد. یک قطعه آلومینیوم چروکیده شده نیز برای محاسبه تابش پس‌زمینه به منظور استخراج هرچه دقیق‌تر دمای کانوپی در نزدیکی مراجع تر و خشک قرار داده شد (Jones et al., 2003). دمای سطح کانوپی از رابطه ۳ محاسبه شد:

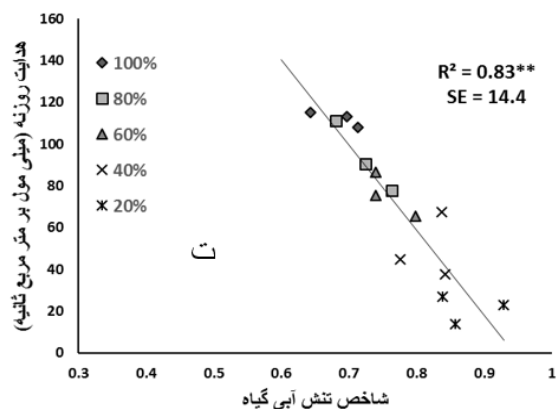
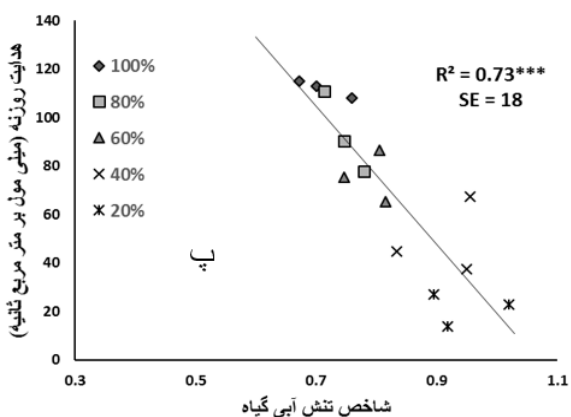
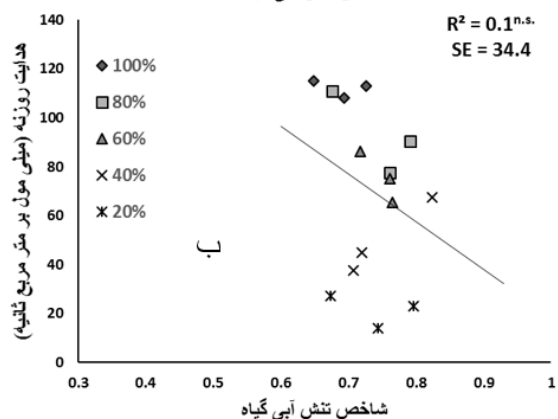
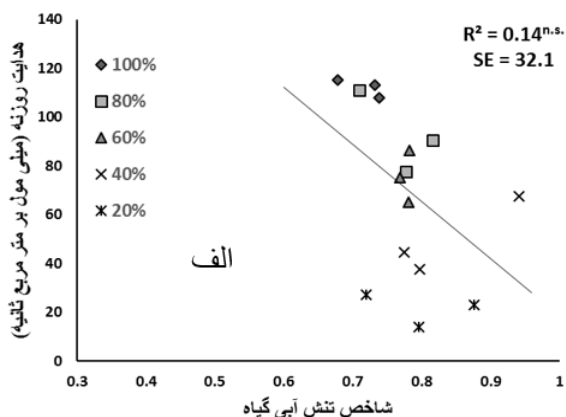
$$T_c = \sqrt[4]{\frac{(T_{br}^4 - (1 - \varepsilon)T_{bg}^4)}{\varepsilon}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$T_c$  دمای اصلاح‌شده کانوپی،  $T_{br}$  دمای تابشی کانوپی مستخرج از تصویر ترموگرافی،  $T_{bg}$  دمای پس‌زمینه به دست آمده از قطعه آلومینیوم چروکیده، و  $\varepsilon$  نیز ضریب گسیلندگی است (Maes and steppe, 2012).

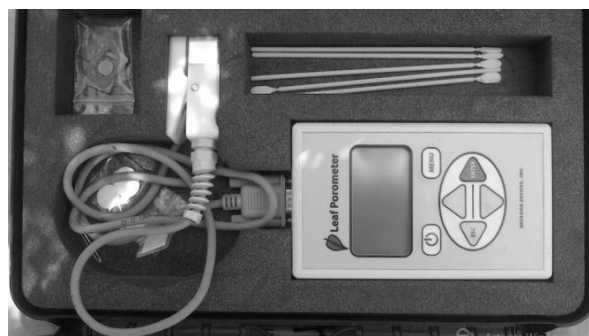
از آنجا که گیاه در درون خود آب را نگهداری می‌کند جنس مراجع نیز باید به صورت بدون بافت باشد تا آب را در میان الیاف خود نگهدارد و به صورت غیرمستقیم در جهت تقلید شرایط برگ تبخیر کند. الیاف ویسکوز بهترین جاذب آب‌اند ولی نمی‌توانند فرم خوبی برای ایجاد شرایط برگ به خود بگیرند، در نتیجه از الیاف بدون بافت که مخلوطی از ویسکوز و کمی پلی استر بود استفاده شد (Agam et al., 2013). نام تجاری این منسوجات بی‌بافت متفاوت است و به لای یا پارچه‌های ویسکوز-پلی‌استر معروف هستند. برای ایجاد شرایط جذب یا بازتاب نوری یکسان با برگ، سطوح به رنگ سبز زیتونی انتخاب شد. این الیاف دارای گسیلندگی برابر با برگ یعنی ۰/۹۸ است. از این الیاف مخصوص در دو قسمت بالا و پایین قاب فلزی استفاده شد. قسمت بالایی خشک بود و تبخیر نداشت و مسلماً با دریافت نور خورشید، دمای بالایی داشت. ولی قسمت پایینی که بخشی از آن داخل مخزن ذخیره آب است، با تبخیر آب از سطح مرجع، با توجه به خاصیت فتیله‌ای، آب را دوباره بالا کشید و بنابراین همیشه مرطوب بود. هر دو قسمت دارای ابعاد یکسان بودند و به دلیل تأثیرنداشتن این دو مرجع بر یکدیگر، مرجع

1. Leaf porometer

2. Decagon



شکل ۵. رابطه شاخص تنش آبی گیاه با هدایت روزنه‌ای در جهت اول تصویربرداری با مرجع گرم مصنوعی به ترتیب برای برگ‌های: الف) آفتابی، و ب) سایه؛ و استفاده از دمای هوای مثبت پنج درجه به ترتیب برای برگ‌های: پ) آفتابی، و ت) سایه



شکل ۴. پرومتر برگ

برای هر درخت تعداد چهار برگ بالغ و در معرض آفتاب انتخاب شد. هدایت روزنه‌ای برای هر درخت به صورت میانگین این چهار مقدار محاسبه شد. رابطه بین شاخص تنش آبی گیاه با هدایت روزنه‌ای با مدل رگرسیون خطی تعیین شد. ضریب تبیین تنظیم شد و همچنین خطای استاندارد به عنوان معیارهای انتخاب بهترین روش از میان روش‌های ذکر شده برای محاسبه شاخص تنش، استفاده شدند.

## نتایج و بحث

تصویربرداری در دو جهت متفاوت نسبت به تابش خورشیدی انجام شد. در انتخاب مراجع، مرجع تر همواره در محاسبه شاخص‌ها استفاده شد ولی مرجع خشک به دو صورت: ۱. مرجع مصنوعی موجود در تصویر، و ۲. دمای هوای مثبت پنج درجه، که در مطالعات قبلی نیز به کار برده شده بود (Meron *et al.*, 2013)، در محاسبه شاخص تنش آبی گیاه استفاده شد. جهت دوم (شرقی-غربی) بیانگر سمت شرقی کانوپی بود و تحت تابش خورشیدی بیشتری قرار می‌گرفت بنابراین اکثر برگ‌ها به صورت آفتابی بودند. ولی در جهت اول که رو به شمال تصویربرداری می‌شد، و می‌توان آن را جهت عمود بر حرکت خورشید دانست، برگ‌ها در وضعیت متعادل تری نسبت به تابش خورشیدی بودند و تعادلی میان برگ‌های سایه و آفتابی برقرار بود.

نتایج نشان داد که استفاده از مرجع مصنوعی خشک در محاسبه شاخص تنش آبی گیاه کارایی کمتری داشت و به جای آن باید از دمای هوای مثبت پنج درجه، استفاده شود (مقایسه نمودار شکل‌های ۵ و ۶). این امر به دلیل یکسان نبودن خصوصیات آیرودینامیکی مرجع مصنوعی با برگ‌های زیتون است. یکی از علل اصلی ناتوانی در تهیه سطوح مرجع مصنوعی با خصوصیات یکسان آیرودینامیکی با برگ‌های زیتون، ابعاد بسیار کوچک برگ‌ها است که مرجع مصنوعی با این ابعاد امکان استخراج دما به روش ترموگرافی را به دلیل ایجاد نشدن تعداد پیکسل لازم برای شناسایی سلب می‌کند.

با توجه به تابش خورشیدی ( $R_H$ ) بیشتر در جهت دوم تصویربرداری و طبق معادله بالانس انرژی (رابطه ۱)، سهم شار گرمایی محسوس در تغییر دمای مرجع مصنوعی خشک کاهش می‌یابد و عامل اصلی تغییر دمای این سطح، تابش خورشیدی خواهد بود. همین امر موجب افزایش ضریب تبیین و کاهش خطای استاندارد در روش استفاده از مرجع مصنوعی خشک در جهت دوم اندازه‌گیری به نسبت جهت اول بود (شکل ۶، الف و ب).

استفاده از دمای برگ‌های سایه به‌عنوان دمای کانوپی در مقایسه با دمای قسمت‌های آفتابی در محاسبه شاخص تنش آبی نتایج بهتری را ارائه کرد. استفاده از دمای قسمت‌های آفتابی باعث ایجاد بیش‌تخمینی در محاسبه شاخص تنش آبی گیاه شد. دمای برگ بزرگ که در بخش اول شرح داده شد، مربوط به برگ‌هایی در میان کانوپی است که در معرض تابش مستقیم خورشید نیستند. بسیاری از پژوهشگران، دمای قسمت‌های سایه کانوپی را به‌عنوان دمای برگ بزرگ استفاده کرده‌اند (Maes and steppe, 2012; colaizzi *et al.*, 2004).

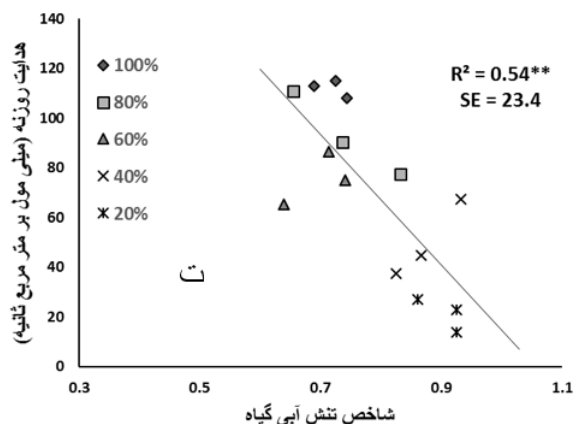
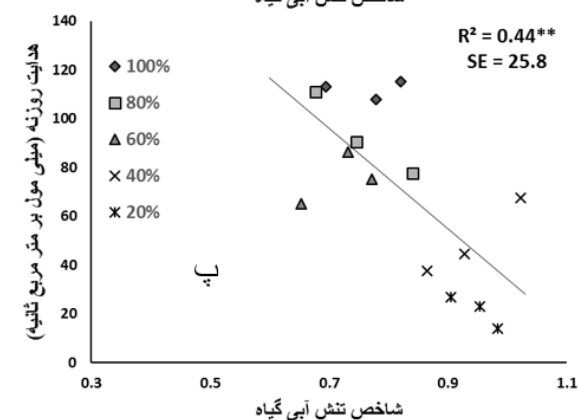
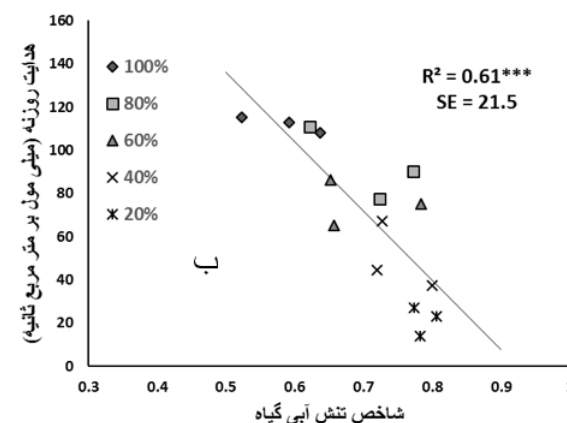
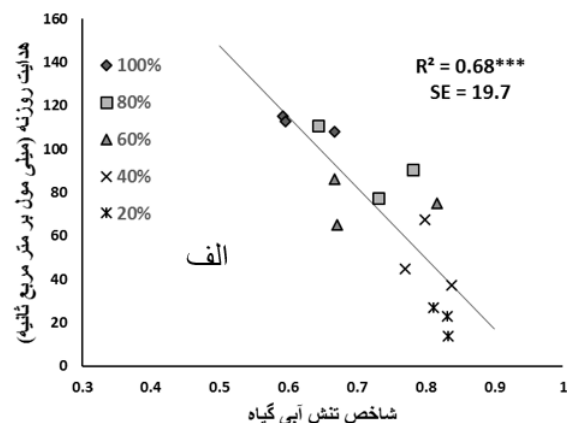
برای اندازه‌گیری دمای کانوپی پیشنهاد می‌شود که از جهت جغرافیایی عمود بر حرکت خورشید (حرکت خورشید از شرق به غرب) استفاده شود. زیرا در این جهت برگ‌ها در معرض تابش مستقیم خورشید نیست و دمای برگ‌های سایه می‌توانند ارائه‌کننده دمای برگ بزرگ تئوری باشد.

### نتیجه‌گیری

استفاده از دمای کانوپی به‌خوبی قادر به پیش‌بینی وضعیت آبی درختان در باغ زیتون بود و از این روش می‌توان به‌عنوان روش جایگزینی برای روش‌های مرسوم اندازه‌گیری تنش آبی، مانند روش‌های فیزیولوژیکی (پرومتری) که بسیار وقت‌گیر و هزینه‌برند، استفاده کرد.

با استفاده از این روش می‌توان سطوح کم‌آبایی را با دقت مطلوبی از طریق گزارش زمان مناسب برای شروع آبیاری بعدی را بدون نیاز به داده‌های هواشناسی (داده‌های هواشناسی معمولاً داده‌های سال قبل یا روزهای قبل است، بنابراین دقت بالایی ندارند) به‌دست آورد.

استخراج دما به روش ترموگرافی به‌دلیل عدم تماس با برگ و اختلال در کارکرد برگ و همچنین ایجاد تصویر دمایی برای کل کانوپی و ایجاد امکان محاسبه دمای میانگین همه برگ‌ها (تعداد نمونه‌برداری بسیار بیشتر از روش پرومتری) و از همه مهم‌تر ایجاد امکان پردازش و تحلیل خودکار کامپیوتری به عنوان روشی بسیار کارآمد و دقیق در بررسی وضعیت آبی درختان با کمترین هزینه کارگری و صرف وقت شناسایی شد.



شکل ۶. رابطه شاخص تنش آبی گیاه با هدایت روزانه در جهت دوم تصویربرداری با استفاده از مرجع گرم مصنوعی به‌ترتیب برای برگ‌های (الف) آفتابی، (ب) سایه؛ و استفاده از دمای هوای مثبت پنج درجه به‌ترتیب برای برگ‌های: (پ) آفتابی، و ت. سایه

استفاده از مرجع خشک مصنوعی بنا به دلایل ذکرشده در قسمت نتایج و بحث توصیه نمی‌شود و پیشنهاد می‌شود از داده‌های یک حسگر دمای هوا در ارتفاعی برابر با ارتفاع میانگین درختان باغ استفاده شود.

بهترین جهت برای استفاده از این روش، جهتی است که لنز دوربین رو به شمال باشد و در این جهت تصویربرداری، دمای به‌دست‌آمده با دقت بالایی گویای وضعیت آبی درخت است.

## REFERENCES

- Agam, N., Cohen, Y., Berni, J.A.J., Alchanatis, V., Cool, D., Dag, A., Yermiyahu, U. & Ben-Gal, A. (2013). An insight to the performance of crop water stress index for olive trees. *Agricultural Water Management*, 118, 79-86.
- Blonquist, J. M., Norman, J. M. & Bugbee, B. (2009). Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. *Agricultural and forest Meteorology*, 149, 2183-2197.
- Caruso, G., Rapoport, H. F. & Gucci, R. (2013). Long-term evaluation of yield components of young olive trees during the onset of fruit production under different irrigation regimes. *Irrigation science*, 31, 37-47.
- Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A. & Tolk, J. A. (2004). Comparison of aerodynamic and radiometric surface temperature using precision weighing lysimeters. *Remote Sensing and modelling of ecosystems for Sustainability*, 55 (44), 215-229.
- Costa, J. M., Ortuno, M. F. & Chaves, M. M. (2007). Deficit Irrigation as a Strategy to Save Water: Physiology and Potential Application to Horticulture. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49 (10), 1421-1434.
- Hamdi, A., Ragheb, R. & Scarascia-Mungonza, E. (2003). Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage*, 52, 3-20.
- Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. *Agronomy Journal*, 92, 1221-1227.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J. & P. J. Pinter. (1981). Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resource Research*, 17, 1133-1138.
- Jones HG. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2427-2436.
- Jones, H. G., Archer, N., Rotenberg, E. & Casa, R. (2003). Radiation measurement for plant eco-physiology. *Journal of Experimental Botany*, 54, 879-889.
- Jones, H. G., Serraj, Loveys, R. B. R., Xiong, L. Z., Wheaton, A. & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology*, 36, 978-989.
- Maes, W. H., Achten, W. M. J., Reubens, B. & Muys, B. (2011). Monitoring stomatal conductance of *Jatropha curcas* seedlings under different levels of water shortage with infrared thermography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 15, 554-564.
- Maes, W. H. & Steppe K. (2012). Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63, 4671-4712.
- Matsushima, D. (2005). Relations between aerodynamic parameters of heat transfer and thermal-infrared thermometry in the bulk surface formulation. *Journal of meteorological society of japan*, 83, 373-389.
- Meron, M., Sprinstin, M., Tsipris, J., Alchanatis, V. & Cohen, Y. (2013). Foliage temperature extraction from thermal imagery for crop water stress determination. *Precision Agriculture*, 14, 467-477.
- Meron M., Tsipris, J., Orlov, V., Alchanatis, V. & Cohen, Y. (2010). Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture*, 11, 148-162.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M. & Cohen, S. (2007). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 58, 827-838.
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y. & Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246-263.
- Pou, A., Diago, M.P., Medrano, H., Baluja, J. & Tardaguila, J. (2014). Validation of thermal indices for water status identification in grapevine. *Agricultural Water Management*, 134, 60-72.