پیشرفت‌های اخیر در تشخیص تنش آبی محصولات

فائزه بهزادی‌پور [*۱]، محمود قاسمی‌نژاد رائینی [۲]، سامان آبدانان مهدی‌زاده[۳]، مرتضی تاکی[۴]

۱. دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان (faeze_behzadeepour@yahoo.com)
۲. استادیار مکانیزاسیون کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان (ghasemi.n.m@gmail.com)
۳. استادیار مکانیک بیوسیستم و مکاترونیک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان (saman.abdanan@gmail.com)
۴. استادیار مکانیزاسیون کشاورزی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان (mortezataaki@gmail.com)

چکیده

به‌منظور پاسخگویی تقاضا برای افزایش تولیدات جهانی مواد غذایی تحت محدودیت منابع آبی، اجرای تکنیک زمان‌بندی مناسب جهت آبیاری خصوصاً در حوضه‌هایی با تنش آبی، بسیار مهم است. بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی نیازمند نوآوری در تشخیص تنش آبی گیاه، کاهش آسیب فیزیولوژیکی محصول در مراحل مختلف رشد و کاهش عملکرد است. کنترل از راه دور شاخص‌های تنشی گیاه، بر اساس ناحیه طیفی مرئی و مادون‌قرمز نزدیک، دارای مزایای تفکیک‌پذیری بالای فضایی و طیفی، هزینه کم و سرعت پاسخ بالا می‌باشد. این مقاله تحولات اخیر در پایش تنش‌های آبی محصول برای برنامه زمان‌بندی آبیاری، برخی محدودیت‌های تجربه‌شده و احتیاجات تحقیقاتی آینده را بررسی می‌کند.

کلمات کلیدی: *تنش آبی، آبیاری، مصرف آب*

[*]نویسنده مسئول: faeze_behzadeepour@yahoo.com

پیشرفت‌های اخیر در تشخیص تنش آبی محصولات:

مقدمه

به‌منظور تولید و تأمین ایمن غذای جهانی آبیاری امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. بااین‌حال، تغییرات آب و هوایی، افزایش کم‌آبی در جهان، خشک‌سالی‌های مکرر و گرمایش جهانی اطمینان از پایایی منابع آب آبیاری را تهدید می‌کند [۵۲]. درحالی‌که جمعیت انسانی و تقاضا برای منابع آب شیرین افزایش می‌یابند، خشک‌سالی مکرر و کمبود آب امنیت غذای جهان را از طریق ایجاد اختلال شدید در تولیدات کشاورزی در معرض خطر قرار داده است [۶۱].

چالش روبه‌رو در سال‌های اخیر در این حوزه، بهبود روش‌های مدیریتی مصرف نهاده‌های کشاورزی (بخصوص آب) و متناسب با آن، افزایش بهره‌وری تقاضا است که این امر نیازمند درک عمیقی از پاسخ‌های گیاه به تنش‌های غیر زیستی دارد [۱۰]. روش‌های متداول برای پایش تنش آبی محصول، به اندازه‌گیری‌های رطوبت مناسب خاک و متغیرهای هواشناسی برای تخمین مقدار آب ازدست‌رفته از سیستم خاک- گیاه طی دوره‌ای معین، وابسته است [۴۶]. در نمونه‌برداری منظم خاک برای ارزیابی میزان تخلیه آب از منطقه ریشه گیاهی علاوه بر زمان‌بر بودن، ظرفیت نگهداری آب در سرتاسر خاک، تراکم گیاهی و نرخ تعرق در سرتاسر زمین یکنواخت فرض می‌شود؛ بنابراین فقط اندازه‌گیری از نقاط محدودی برای ثبت ویژگی‌های حفظ آب در خاک استفاده‌شده لذا اطلاعات نقطه‌ای به‌دست‌آمده شاخص‌های ضعیفی از وضعیت کلی مزرعه را ارائه می‌نمایند [۲۰]. روش‌های دیگر، شامل اطلاعات محتوای آبی گیاه است که شامل محاسبات تعادل آب خاک، اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم محتوای آب گیاه از طریق هدایت روزنه‌ای و پتانسیل آب برگ می‌شود. این رویکردها هرچند قابل‌اطمینان هستند، اما مخرب و به دلیل ناهمگونی بین خاک و تاج‌پوششی محصول، برای کنترل اتوماتیک نامناسب هستند. ازجمله روش‌های افزایش صرفه‌جویی در مصرف آب و ایجاد پایداری در کشاورزی، اجرای روش‌های زمان‌بندی مناسب جهت آبیاری و نیز تشخیص زودهنگام تنش آبی در محصولات قبل از ایجاد آسیب‌های برگشت‌ناپذیر و کاهش عملکرد را می‌توان نام برد[۷۴]. مطالعات اخیر، بر داده‌های کنترل از راه دور به‌عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری‌های سنتی پارامترهای تنش گیاهی تمرکز کرده‌اند، زیرا اطلاعات مفیدی درباره تغییرات مکانی و زمانی محصول زراعی و خاک فراهم می‌کند [۲۵، ۶۲، ۷۷، ۸۷، ۱۰۴ و ۱۰۸].

شاخص‌های بازتابی طیفی به‌دست‌آمده از سنسورهای با تفکیک طیفی بالا و سیستم‌های هواپیمایی بدون سرنشین کوچک (پهپادها)[1] (SUAS) می‌توانند در کشاورزی دقیق برای کنترل وضعیت آبی محصول و برنامه زمان‌بندی آبیاری استفاده شوند [۳۷]. بااین‌حال، با توجه به عوامل متعدد تأثیرگذار بر شاخص‌های گیاهی[2] (VIS) در مقیاس تاج‌پوششی گیاه و آستانه تشخیص تنش‌های آبی در محصولات مختلف ، هنوز یک توافق کلی برای استفاده آن‌ها به‌عنوان یک شاخص بصری تنش آبی، هنوز حاصل نشده است. در این مطالعه، پیشرفت‌های اخیر در تشخیص تنش آبی محصول موردبررسی قرار می‌گیرد که به‌طور بالقوه توانایی بهبود برنامه‌های زمان‌بندی آبیاری محصولات گیاهی را دربر دارد و هدف آن شناسایی رویکردهای نویدبخش جهت اعمال در مقیاس‌های بزرگ است.

پاسخ‌های گیاهی به تنش‌های آبی

تنش آبی محصول، نقصی در تأمین آب است که به‌عنوان کمبودی در محتوای آب خاک یا پاسخی فیزیولوژیکی از گیاه به کمبود آب، شناسایی‌شده است. گیاهان، آب موجود در خاک منطقه ریشه را برای رفع احتیاجات تبخیر و تعرق خود، جذب کرده که این امر باعث تهی گشتن آب در دسترس خاک می‌گردد. تحت شرایط محدودیت رطوبتی خاک، سیگنال‌های هیدرولیکی و شیمیایی از طریق

1 - small Unmanned Aircraft Systems
2 - The Vegetation Indices

آوندهای چوبی به برگ گیاه مخابره می‌شوند که منجر به پاسخ‌های فیزیولوژیکی مانند بستن روزنه و کاهش میزان فتوسنتز می‌شود[۶۳]. [۹۸] نشان دادند که تنش آبی محصول، تبخیر و تعرق را کاهش داده و علائم دیگری همچون پژمردگی برگ، عقب‌ماندگی رشد و کاهش سطح برگ را نمایان می‌سازد. همچنین تنش آبی تأثیرات مخربی بر توسعه غذایی و فیزیولوژیکی محصولات گذاشته که منجر به کاهش بیوماس، عملکرد و کیفیت محصول می‌شود [۲، ۱۰۶، ۱۰۷]. محتوای آب گیاه بیانگر واکنش گیاه به اثرات ترکیبی رطوبت در دسترس خاک، میزان تبخیر، مقاومت هیدرولیکی داخلی و ظرفیت جذب توسط رابط ریشه- گیاه است که این شاخص تنش حساس به رطوبت خاک است [۵۷]. واکنش گیاه به تنش آبی وابسته به شرایط زیست‌محیطی و احتیاجات تبخیر و تعرق محصول است؛ چنانکه آبیاری باید کمبود رطوبت خاک ناشی از تلفات تبخیر و تعرق را جبران کند.

اندازه‌گیری‌های محتوای آب گیاهی نیازمند درک مکانیزم‌های واکنش گیاه و سازگاری آن با تنش‌های آبی و همچین بهینه‌سازی تولیدات محصول از طریق آبیاری دقیق، اس[۷۳]. بعلاوه، در مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق [۳] (ET) چگونگی تغییرات پارامترهای آب و هوایی نیز به طور مؤثر وارد می‌شوند، زیرا این پارامترها می‌توانند شرایط آبی گیاه را تحت تأثیر قرار دهند [۷۵]. غالباً مدل‌های ET مورداستفاده، مدل‌های پنمن- مونتیت [۴] (PM) [۴] و هارگریوز [۵] [۵۱] هستند. مدل هارگریوز به داده‌های کمتری نسبت به مدل پنمن- مونتیت نیاز داشته و قابلیت تخمین مدل تبخیر و تعرق را با استفاده از دمای هوا به‌عنوان تنها داده ورودی دارد. محققان دیگر از کراپ وات-۸ [۶] که بر اساس مدل پنمن- مونتیت است برای ارزیابی تبخیر و تعرق مرجع [۷] (ET_O)، تبخیر و تعرق محصول [۸] (ET_C) و آب موردنیاز آبیاری استفاده کردند [۱۵، ۷۸، ۹۶].

رایج‌ترین و کاربردی‌ترین رویکردی که برای تخمین نیاز آبی محصول و نیز پایش مؤثر تعادل آب گیاه- خاک استفاده می‌شود، روش FAO-56 است. در رویکرد FAO-56 تبخیر و تعرق محصول توسط ترکیبی از تبخیر و تعرق مرجع (ET_O) و ضریب گیاهی تخمین زده می‌شود. در برآورد میزان تبخیر و تعرق در روش FAO-56 دو رویکرد متفاوت ضرایب گیاهی یگانه و دوگانه [۹] محصول موردبررسی قرار می‌گیرد. در رویکرد ضریب گیاهی یگانه، تعامل بین تبخیر و تعرق گیاه و تبخیر خاک را در ترکیب با ضریب گیاهی [۱۰] یگانه نشان می‌دهد. درحالی‌که در رویکرد ضریب گیاهی دوگانه از دو ضریب برای جداسازی سهم نسبی تعرق گیاه [۱۱] و تبخیر خاک [۱۲] (Ke)، هرکدام با مقادیر منحصر بفرد، استفاده می‌شود [۵] .ضریب تعرق گیاه توسط ضریب تنش آبی [۱۳] (ks)، چند برابر می‌گردد (محدوده ۱۰-۰) تا بتواند کاهش تبخیر و تعرق (ET) را به دلیل کاهش رطوبت خاک، پوشش دهد. ارتباط ضریب تنش آبی (ks) با شاخص تنش آبی محصول [۱۴] (CWSI) در رابطه (۱) آمده است:

$$K_S = 1 - CWSI \qquad (1)$$

چندین محقق، دقت روش‌های ضریب تنش آبی برای تخمین تبخیر و تعرق محصول (ETc) تحت شرایط مختلف کمبود آبیاری را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. بوش [۱۵] و همکاران [۹] نسبت دمای تاج‌پوششی گیاه [۱۶] (Tc) را به‌عنوان جایگزینی برای رطوبت خاک بر اساس ضریب تنش آبی (Ks) استفاده کردند. کولبرگ [۱۷] و همکاران [۶۰] مشاهده نمودند که به‌کارگیری مناسب روش ضریب تنش آبی (Ks)،

3 - evapotranspiration
4 - Penman-Monteith (PM)
5 - Hargreaves
6 - CROPWAT-8
7 - reference evapotranspiration
8 - crop evapotranspiration
9 - single and dual crop coefficients
10 - crop coefficient (Kc)
11 - The contribution of plant transpiration
12 - The contribution of soil evaporation (Ke)
13 - water stress coefficient (Ks)
14 - crop water stress index
15 - Bousch
16 - canopy temperature
17 - Kullberg

پتانسیل بهبود برنامه زمان‌بندی آبیاری جهت مدیریت صحیح تنش و اطمینان از عملکرد بهینه محصول را تحت تأمین آب آبیاری در زمان کمبود آب را دارد. روش‌های اصلی مورداستفاده برای پایش تنش آبی گیاه، در جدول (۱) خلاصه‌شده و در ادامه مورد بحث قرارگرفته‌اند.

رویکردهای گیاهی

تعریف تنش از رویکردهای گیاهی شامل اندازه‌گیری مستقیم پتانسیل آب برگ با محفظه فشار است [۹۰]. پتانسیل آب برگ به‌عنوان نشان‌دهنده میانگین پتانسیل آب خاک در کنار ریشه‌های گیاه فرض می‌شود [۷] و شاخص خوبی از محتوای آبی برگ را فراهم کرده و به‌طور گسترده برای برنامه زمان‌بندی آبیاری در محصولات مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرد [۳، ۱۱، ۱۰۳]. بااین‌حال، این رویکرد، آهسته و مخرب، با محدودیت تفکیک زمانی و مکانی است؛ بعلاوه، برای محصولات ایزوهیدریک[18] که محتوای آبی پایداری در سرتاسر برگ در گستره وسیعی از احتیاجات تبخیری یا تأمین آب خاک حفظ می‌کنند، مناسب نیست [۶۳]. مقدار آب در برگ‌های گیاه می‌تواند با تجزیه‌وتحلیل آزمایشگاهی، استفاده از محتوای نسبی آب[19] (RWC) و غلظت معادل آب[20] (EWT) اندازه‌گیری شود [۲۳]. غلظت معادل آب (EWT)، غلظت فرضی یک لایه آب به‌طور متوسط در کل سطح برگ است و می‌تواند در آزمایشگاه با اندازه‌گیری وزن‌های تازه[21] (FW) و خشک[22] (DW) و سطح برگ[23] (A) مطابق رابطه (۲) محاسبه گردد:

$$ETW = \frac{FW - DW}{A} \quad (۲)$$

جدول (۱). خلاصه‌ای از روش‌های پایش تنش آبی گیاه، نشان‌دهنده مزایا و معایب اصلی آن‌ها

	روش‌ها		توضیحات	مزایا	معایب
1. **اندازه‌گیری آب خاک**	A.روش Gravimetric		نمونه‌ای از خاک، وزن شده، در آون خشک‌شده، و دوباره وزن می‌شود به‌منظور تخمین آب ازدست‌رفته از سیستم خاک-گیاه	این روش، قابل‌اطمینان بوده و به‌عنوان راهنمایی بر مقدار آب موردنیاز در طول آبیاری است	متمرکز بر نیروی کار، مخرب و زمان‌بر است
	B. سنسور رطوبت خاک	(i) پراب نوترونی	بر اساس انتشار انرژی بالای نوترون‌ها توسط یک منبع رادیواکتیو به خاک	سریع، غیر مخرب و دارای تکرار (به‌صورت مکرر)	نیاز به آموزش مناسب کاربر، نگهداری، صدور مجوز و بازرسی به دلیل منبع رادیواکتیو دارد
		(ii) TDR and FDR	بر اساس تفاوت بین ثابت دی‌الکتریک آب‌وخاک	کار با آن دقیق و آسان است. برآورد میزان آب خاک در عمق‌های مختلف در امتداد پروفیل خاک.	چندین سنسور برای کل زمین نیاز است. هزینه بالای نصب سنسورها

18 - isohydric crops
19 - Relative Water Content
20 - Equivalent Water Thickness
21 - Fresh Weights
22 - Dry weights
23 - one-sided leaf Area

				قرائت به‌صورت اتوماتیک است.	
		(iii) کشش سنج Tensiometers	اندازه‌گیری پتانسیل آب خاک	کاربرد آسان در برنامه زمان‌بندی آبیاری	در خاک‌های درشت بافت یا فقط در آبیاری‌های با تکرار فراوان، مفید است. برای محدوده کمی از آب خاک در دسترس استفاده می‌شود
2	**رویکرد تعادل آب خاک**		تخمین غیرمستقیم محتوای رطوبتی خاک بر اساس محاسبه تعادل آب خاک	شاخص خوبی برای مقدار آب آبیاری و کاربرد آسان	دقیق نیست و احتیاج به کالیبره با اندازه‌گیری‌های واقعی خاک دارد. نیاز به تخمین تبخیر، بارندگی و آبیاری دارد
3. رویکرد گیاهی	A	هدایت روزنه‌ای	شاخص غیرمستقیم تنش آبی گیاه با اندازه‌گیری باز شدن روزنه	معیار خوبی از محتوای آبی گیاه. معیاری برای بسیاری از مطالعات تحقیقاتی	متمرکز بر نیروی کارگری، و نامناسب برای کاربردهای تجاری و اتوماتیک و محصولات غیرایزوهیدریک
	B	پتانسیل آب برگ	اندازه‌گیری مستقیم محتوای آب برگ	پذیرش گسترده به‌عنوان تکنیک مرجع	آهسته، مخرب و نامناسب برای محصولات ایزوهیدریک
	C	محتوای آب نسبی	اندازه‌گیری مستقیم وضعیت آب برگ	شاخصی خوب برای وضعیت آب گیاه، نیاز به تجهیزات پیچیده کمتر	مخرب، زمان‌بر
	D	اندازه‌گیری جریان عصاره گیاهی	اندازه‌گیری نرخ تعرق از طریق پالس گرمایی	حساس به بستن روزنه و کمبود آب. سازگار برای ثبت خودکار و کنترل سیستم‌های آبیاری	نیاز به کالیبره برای هر درخت و دشواری در تکرار. احتیاج به تجهیزات پیچیده و تخصص
	E	قطر ساقه و میوه	نوسانات اندازه‌گیری در قطرهای میوه و ساقه در پاسخ به تغییرات محتوای آبی	اندازه‌گیری حساس تنش آبی گیاه	نامناسب برای سیستم‌های آبیاری با تکرار بالا

4. روش کنترل از راه دور	A	گرماسنجی مادون‌قرمز	اندازه‌گیری دمای تاج‌پوششی گیاه که درنتیجه تنش آبی افزایش می‌یابد	قابل‌اعتماد و غیر مخرب	تنها بر اساس چند اندازه‌گیری نقطه‌ای. برای ناهمگونی خاک و محصول محاسبه نمی‌گردد
		CWSI (i)	استفاده از تفاوت بین دمای هوا و تاج‌پوششی گیاه برای اندازه‌گیری تنش آبی محصول	حساس به بسته شدن روزنه و کمبود آب محصول	تحت تأثیر پوشش ابر، نیاز به خطوط اصلی متفاوت برای محصولات مختلف
		(II) نسبت DANS, DACT, and Tc	اندازه‌گیری دمای یک تاج گیاه برای بیان تنش آبی	احتیاج به داده‌های کمتر نسبت به CWSI برای بیان تنش آبی. نسبت Tc، مقدار ضریب تنش آبی (Ks) برای محاسبه ET محصول را می‌دهد	مشکل در زمین‌های با مقیاس بزرگ محصول
	B. شاخص‌های پوشش‌های گیاهی	(I) شاخص‌های ساختاری	اندازه‌گیری شاخص‌های بازتاب در محدوده طیفی (NDVI, RDVI, OSAVI, VIS, NIR, TCARI) برای نمایش تغییرات تاج گیاه به دلیل تنش آبی	غیر مخرب با تفکیک زمانی و طیفی بالا	تجزیه و تحلیل تصویر موردنیاز، هنوز هم کاری چالش‌برانگیز است. کاهش دقت از مقیاس برگ به مقیاس تاج گیاه
		(II) شاخص Xanthophyll (ترکیبی است به رنگ سیاه مایل به قهوه‌ای که معمولاً در گیاهان با کلروفیل و کاروتن همراه است و برحسب غلظت آن موجب ایجاد رنگ طلائی مایل به زرد تا عاجی می‌شود.)	اندازه‌گیری PRI و PRInorm که به حالت اپوکسی شدن رنگ‌دانه‌های چرخه xanthophyll حساس است	برای تغییرات فیزیولوژیکی در تغییرات رنگدانه فتوسنتز به دلیل تنش آبی محاسبه می‌شود	برای تبدیل تصاویر خام به برنامه آبیاری کاربرپسند، نیاز به کار بیشتر دارد
		(III) شاخص‌های آبی	اندازه‌گیری بازتاب در محدوده نزدیک به مادون‌قرمز برای (WI, SRWI, and NDWI) برای نشان دادن محتوای رطوبت تاج گیاه	اندازه‌گیری سریع و غیر مخرب محتوای آبی برگ	مشکل در مقیاس بالای سطح تاج گیاه

ضریب معادل آب در سطح تاج گیاه (EWT_{canopy}) مطابق رابطه (۳) از حاصل‌ضرب EWT و شاخص سطح برگ[۲۴] (LAI) به دست می‌آید، که به‌عنوان سطح سبز یک رویه برگ در واحد سطح زمین تعریف می‌شود:

24 - Leaf Area Index

$$EWT_{canopy} = LAI * EWT \quad (۳)$$

RWC محتوای آبی برگ را با بیشترین محتوای آبی در حالت آماسیدگی مقایسه می‌کند و به‌عنوان شاخص وضعیت گیاهی کاربرد دارد. این مقدار، از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی وزن برگ و وزن برگ آماسیده[۲۵] (TW) مطابق با رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$RWC = \frac{FW - DW}{TW - DW} * 100\ (\%) \quad (۴)$$

هر دو شاخص RWC و EWT، شاخص‌های خوبی برای وضعیت آب گیاه هستند و برای برنامه زمان‌بندی آبیاری در محصولات مختلف به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده می‌شوند [۵۹، ۷۷، ۹۸]. این رویکردها نیاز به تجهیزات پیچیده‌تر کمتری دارند اما مخرب و زمان‌بر هستند. از دیگر روش‌های تشخیص تنش می‌توان به بررسی علائم غیرمستقیم آن مانند اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای [۱، ۸]، اندازه‌گیری قطر ساقه و میوه [۳۸] و اندازه‌گیری جریان عصاره گیاهی [۴۵، ۹۱] اشاره نمود.

اکثر گیاهان هنگام بروز تنش خشکی و تغییرات کوچکی در محتوای آبی برگ، از طریق بستن روزنه‌ها کنترل می‌کنند. بنابراین، هدایت روزنه‌ای بسیار حساس به واکنش گیاه به کمبود آب خاک است [۵۹]. البته برای گونه‌های غیرایزوهیدریک، میان محتوای آبی برگ تناسب کمتری با کمبود وضعیت رطوبت خاک وجود دارد، لذا هدایت روزنه‌ای نمی‌تواند معیار مناسبی برای تشخیص تنش در این گونه خاص باشد. شناخت گیاهان حساس به آب که تمایل به بستن روزنه‌های خود را دارند علائم خوبی را برای شناسایی احتیاجات آبیاری در محصولات مختلف فراهم می‌کند. بااین‌حال، اندازه‌گیری بسته شدن روزنه‌ها، کاری خسته‌کننده است و تغییرات زیاد برگ به برگ تاج گیاه نیاز به تکرار زیادی جهت دستیابی به داده‌های قابل‌اطمینان به‌منظور برنامه‌ریزی زمان‌بندی آبیاری دارد. اما از طرف دیگر، بسته شدن روزنه‌ها در گیاهان منجر به افزایش دمای برگ شده که این مسئله می‌تواند به‌عنوان معیاری ، برای توسعه روش‌های سنجش حرارتی جهت شناسایی تنش‌های گیاهی استفاده می‌شود [۵۴].

در روش جریان عصاره گیاهی برای ارزیابی میزان تعرق گیاهان میزان بالا رفتن عصاره گیاهی در ساقه توسط پالس‌های حرارتی اندازه‌گیری می‌گردد. در این رویکرد، پالس‌های کوتاه حرارتی در ساقه اعمال‌شده و جرم عصاره جریان یافته از طریق سرعت پالس‌های حرارتی جابجا شده در میان ساقه، تعیین می‌شود. تغییرات در نرخ تعرق نشان داده‌شده توسط جریان عصاره، به‌طور عمده توسط تغییرات در باز شدن رسانه‌ها تعیین می‌شود. سینگ[۲۶] و همکاران [۹۱] از سنسورهای جریان عصاره گیاهی برای برنامه‌ریزی آبیاری در مزرعه ذرت استفاده کردند. بر اساس گزارش آن‌ها این روش به‌صورت غیرمستقیم تخمینی از تغییرات در هدایت جریان عصاره را ارائه می‌دهد. در مطالعات دیگر، از اندازه‌گیری جریان عصاره گیاهی برای برنامه‌ریزی آبیاری و کنترل طیف وسیعی از محصولات شامل انگور [۲۹]، درختان میوه و زیتون [۴۵، ۷] و حتی محصولات گلخانه‌ای [۳۱] با درجات موفقیت مختلف، استفاده‌شده است. بااین‌حال، جونز[۲۷] [۵۸] اظهار داشت که روش جریان عصاره گیاهی نیاز به منبع گرما، ابزار پیچیده، تخصص فنی و کالیبراسیون برای هر محصول به‌منظور تعیین آستانه‌های کنترل آبیاری دارد.

استفاده از شاخص‌های گیاهی نیازمند تعریف مقادیر آستانه به‌منظور برنامه‌ریزی آبیاری است. بنابراین نیاز به بررسی منظم محتوای آب گیاه جهت اجتناب از زیاده‌روی نسبت به مقادیر مرجع، است [۸]. یکی دیگر از محدودیت‌های روش‌های گیاهی، عدم فراهم آوردن اطلاعات کافی درباره میزان آب آبیاری در هر زمان است، بلکه فقط نیاز به آبیاری را نشان می‌دهند. این بدان معنی است که به

25 - Turgid Weight
26 - Singh
27 - Jones

اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک یا ویژگی‌های دیگر برای تعیین میزان آب نیاز است [۹۳]. لذا از معایب دو روش اندازه‌گیری مستقیم محتوای آب خاک و روش‌های گیاهی، می‌توان به هزینه نصب سنسورها، تعیین آستانه مناسب و نمونه‌برداری تک نقطه‌ای را اشاره نمود [۸، ۵۸].

سنجش زیست‌محیطی تاج گیاه

تصاویر گرماسنجی مادون‌قرمز و حرارتی همراه با اندازه‌گیری‌های زیست‌محیطی، به‌عنوان رویکردی جایگزین برای رطوبت خاک بر اساس روش‌های تعیین تنش آبی گیاه شناخته‌شده‌اند [۵۷، ۷۴، ۱۲]. تشخیص تنش‌های آبی بر اساس اندازه‌گیری دمای تاج گیاه یکی از گسترده‌ترین رویکردهای گیاهی برای سامانه‌های سنجش از راه دور است که قابل پیاده‌سازی برای آبیاری چندین محصول می‌باشد.

گیاهان تحت تنش‌های آبی، تبخیر و تعرق کمتر و دمای سطح برگ بالاتری در مقایسه با محصولات بدون تنش دارند. گونزالس-دوگو[28] و همکاران [۴۶] از دماهای مختلف تاج گیاه برای نمایش سطوح مختلف تنش آبی استفاده کردند. کولایزی[29] و همکاران [۲۲] نشان دادند که الگوریتم‌های مبتنی بر دمای تاج گیاه با خروجی‌های محصولات مانند عملکرد، بهره‌وری مصرف آب، میزان آبیاری، تبخیر و تعرق فصلی و پتانسیل آب برگ در نیم روز همبستگی قوی‌تری دارد. از روش اندازه‌گیری دمای تاج گیاه در پژوهش‌های مختلفی استفاده‌شده است [۵۹، ۷۲، ۷۴، ۷۹]. این روش به تنش‌های کوچک، حساس بوده و به بسته شدن روزنه‌ها به‌عنوان شاخص اولیه کمبود آب وابسته می‌باشد.

شاخص تنش آبی محصول بر اساس دمای تاج گیاه (CWSI)

CWSI مشتق شده از دمای تاج گیاه است و تا حد زیادی به‌عنوان ابزاری برای نشان دادن محتوای آب گیاه و برنامه‌ریزی آبیاری در بسیاری از محصولات مورد بهره‌وری قرار گرفته است [۲، ۳، ۱۱، ۱۰۴]. تئوری CWSI بر اساس این اصل است که تعرق، سطح برگ را خنک نموده و زمانی که رطوبت خاک ناحیه ریشه کم باشد ، هدایت روزنه‌ای و تعرق نیز کاهش‌یافته و دمای برگ افزایش می‌یابد. مفهوم استفاده از CWSI برای بهبود برنامه‌ریزی آبیاری وقتی عمومیت پیدا کرد که آیدسو[30] و همکاران [۵۴] یک رابطه خطی بین دمای اندازه‌گیری شده تاج گیاه با استفاده از گرماسنجی مادون‌قرمز و دمای هوا و کمبود فشار بخار مشاهده کرد و یک روش تجربی را برای اندازه‌گیری میزان تنش آبی محصول توسعه داد (رابطه ۵).

$$CWSI = \frac{[(T_C - T_a)] - [T_{nws} - T_a]}{[(T_{dry} - T_a) - (T_{nws} - T_a)]} \quad (۵)$$

T_C: دمای تاج گیاه (درجه سلسیوس)، T_a: دمای هوا (درجه سلسیوس)، T_{nws}: دمای تاج گیاه بدون تنش آبی (درجه سلسیوس)، T_{dry}: دمای تاج گیاه تحت تنش آبی (درجه سلسیوس)

طی چند سال گذشته، استفاده از CWSI برای پایش تنش آبی و برنامه‌ریزی آبیاری در محصولات مختلف نیز توسعه‌یافته است [۴۷، ۱۲، ۱۳، ۷۶، ۷۲]. اشاقنسی[31] و همکاران [۷۲] یک آستانه دمایی-زمانی[32] (TTT) را در شاخص تئوری CWSI ترکیب و از آن برای آبیاری خودکار سورگوم دانه‌ای به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده نمودند. اسروش[33] و همکاران [۷۴] یک الگوریتم برنامه‌ریزی آبیاری قابل

28 - González-Dugo
29 - Collaizzi
30 - Idso
31 - O'Shaughnessy
32 - Time-Temperature Threshold (TTT)
33 - Osroosh

انطباق را بر اساس تئوری CWSI توسعه دادند؛ برخلاف الگوریتم تئوری CWSI که آستانه دارای مقدار ثابتی است، در روش پیشنهادشده آن‌ها یک آستانه پویا با پیروی کردن از روند CWSI تعیین گردید. بااین‌حال، اختلاف بزرگ در قرائت‌های حرارتی آن‌ها به نسبت اندازه‌گیری‌های حرارتی مادون‌قرمز گزارش شد.

مطالعات اخیر، شاخص‌های بیشتری را بر اساس گرماسنجی مادون‌قرمز که نیاز به اطلاعات کمتری نسبت به CWSI برای تشخیص تنش آبی دارد، ارائه و ارزیابی نموده‌اند. بوش[۳۴] و همکاران [۹] استفاده از نسبت دمای تاج گیاه[۳۵] (T_C ratio) اندازه‌گیری شده در مزرعه ذرت با آبیاری کامل و تنش آبی را به‌عنوان جایگزینی برای Ks که در حال حاضر برای ضریب تبخیر و تعرق (ET) محصول مرجع استفاده می‌شود، بررسی کردند. نتایج نشان داد نسبت Tc به‌طور مناسب، Ks را برای محاسبه ET محصول تحت شرایط تنش آبی، تخمین می‌زند و این نسبت، کاربرد روش ضریب محصول برنامه‌ریزی کمبود آبیاری را امکان‌پذیر می‌کند. تقوابیان[۳۶] و همکاران [۹۷] نشان دادند درجات بالاتری از عدم تنش[۳۷] (DANS)، که فقط برپایه دمای تاج گیاه است، در پایش تنش آبی و برنامه‌ریزی آبیاری برای آفتابگردان کم آبیاری شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک مؤثر بود. دیجانگ[۳۸] و همکاران [۲۸] درجات بالاتری از آستانه تاج گیاه[۳۹] (DACT) را به‌عنوان شاخصی مناسب برای برآورد تنش آبی در ذرت معرفی کردند. کولبرگ[۴۰] و همکاران [۶۰] چهار شاخص حرارتی سنجش از راه دور را برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مقایسه کردند: CWSI، DACT، DANS و نسبت Tc. بر اساس مشاهدات شاخص‌های حرارتی DANS و DACT حساسیت بیشتری به تنش آبی محصول واکنش نسبت به روش‌های دیگر مثل CWSI داشتند. در کل اندازه‌گیری‌های دمای تاج گیاه با استفاده از د حسگر مادون‌قرمز، قابل‌اطمینان و غیرتهاجمی است [۲۱]، اما فقط بر اساس اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای هستند. بنابراین در مناطق بزرگ، با این فرض عمل می‌کنند که یکنواختی محتوای آب خاک و تاج گیاه وجود دارد.

روش‌های کنترل از راه دور

اگرچه دمای مفید تاج گیاه که از گرماسنج مادون‌قرمز اندازه‌گیری شده، در مطالعات متعددی جهت پایش تنش آبی کاربرد دارد، اما از منظر فیزیولوژیکی و عملیاتی ملاحظاتی مدنظر است که از توسعه معیارهایی بر اساس طیف‌سنجی (ناحیه باریک طیفی: بین ناحیه مرئی و لبه قرمز) پشتیبانی می‌کند [۱۳، ۲۵، ۷۷، ۸۷، ۹۸، ۱۰۴، ۱۰۸]. در برخی گیاهان، نوسانات روزانه در هدایت روزنه‌ای چنین است که رابطه بین دمای تاج گیاه و سطوح تنش، مشخص نیست و حتی زمانی که محصولات به خوبی آبیاری می‌شوند، افزایش تبخیر به دلیل کمبود فشار بخار بالا موجب کاهش ثابتی در رسانایی برگ می‌گردد [۱۰۳].مجدداً، پایش زمین‌های کشت‌شده بزرگ مستلزم تصاویر مناسب با وضوح طیفی و مکانی بالا و همچنین دوره‌های بازنگری کوتاه‌مدت است [۱۳]. اگرچه کاربرد سنجش از راه دور در کشاورزی در چند دهه گذشته پیشنهادشده است، اما تابه‌حال به‌طور گسترده‌ای مورداستفاده قرار نگرفته است؛ ازجمله تکنولوژی‌های نوظهور که با ترکیب دوربین‌های حرارتی با وضوح بالا بسیار موردتوجه محققان مختلف قرار گرفته است می‌توان به پهپادها اشاره نمود [۱۲، ۳۳، ۹۴، ۱۰۴]. کاربردهای بالقوه پهپادها در کشاورزی شامل موارد زیر است: دیده‌بانی محصول، نقشه‌برداری از پوشش‌های تاج گیاهی، تعیین تنش‌های گیاهی، اندازه‌گیری رطوبت خاک، مدیریت آبیاری نرخ متغیر و ارزیابی عملکرد محصول [۳۲]. بنابراین، پهپاد به‌زودی به ابزاری حیاتی برای کشاورزان تبدیل می‌گردد زیرا توانایی پوشش مناطق وسیعی را داشته و از تکنولوژی جدید سنجش، نقشه‌برداری و تحلیل داده‌ها استفاده می‌کند. بعلاوه وضوح تصاویر بهبودیافته و هزینه‌ها نیز طی زمان کاهش‌یافته است. این مسئله امکان نقشه‌برداری بی‌وقفه و آنالیز

34 - Bausch
35 - ratio of canopy temperature (Tc ratio)
36 - Taghvaeiana
37 - Degrees Above Non- Stressed (DANS)
38 - DeJonge
39 - the Degrees Above Canopy Threshold (DACT)
40 - Kullberg

سریع تصاویر برای شناسایی زودهنگام تنش آبی گیاه جهت برنامه‌ریزی آبیاری به‌موقع فراهم می‌نماید [۳۷]. محققان اخیراً ادغام داده‌های کنترل از راه دور با روش تعادل آب خاک جهت بهبود مدیریت آب آبیاری را پیشنهاد کرده‌اند. به‌عنوان‌مثال، کامپوز[41] و همکاران [۱۷]کل آب موجود در خاک را توسط تلفیق داده‌های تبخیر و تعرق و تصاویر چند بعدی برآورد کرده‌اند. فیلیون[42] و همکاران [۳۵] تصویر سنجش از راه دور را برای نقشه خاک در مناطق مدیترانه جهت مدیریت آب و فعالیت‌های کشاورزی، مورداستفاده قراردادند. ژانگ[43] و همکاران [۱۰۶، ۱۰۷] داده‌های تصاویر هوایی را در مدل تعادل آب خاک جهت بهبود تخمین کمبود آب خاک برای رشد آفتابگردان و ذرت تحت تیمارهای با آبیاری کامل و با کمبود آبیاری، ادغام کردند.

شاخص‌های طیفی:

ازآنجایی‌که دمای برگ، اگرچه شاخصی مستقیم از تعرق گیاه است، اما به‌طور مستقیم توانایی بررسی تغییرات فیزیولوژیکی چون تغییرات رنگدانه‌ای فتوسنتز یا کاهش غیر روزنه‌ای فتوسنتز تحت شرایط تنش آبی را ندارد؛ لذا در سال‌های اخیر، تمرکز محققین به توسعه شاخص‌هایی به‌جز شاخص‌های حرارتی برای پایش تنش‌های آبی بوده است [۱۰۴] . شاخص‌های طیفی گیاه که با تنش آبی گیاه ارتباط دارند، در جدول (۲) آمده است. شاخص تصاویر شیمیایی بازتابی[44] (PRI) [۴۱] و انتشار فلورسانی کلروفیل ناشی از خورشید [۳۶، ۶۹] شاخص‌های بصری تنش آبی هستند که ابزاری غیرمستقیم برای تشخیص تنش آبی به شمار می‌روند [۹۴،۱۳].

شاخص بازتابی تصاویر شیمیایی (PRI) به حالت اپوکسی شدن رنگدانه‌ها در چرخه اگزانتوفیل[45] (نوعی ترکیب سیاه مایل به قهوه‌ای که معمولاً در گیاهان با کلروفیل و کاروتن همراه است و برحسب غلظت آن موجب ایجاد رنگ طلائی مایل به زرد تا عاجی می‌شود. در اندام‌های سبز گیاه به علت غالب بودن رنگ سبز کلروفیل، رنگ زرد گزانتوفیل و نارنجی کاروتن ظاهر نمی‌شود) و بازده فتوسنتزی حساس است [۹۴، ۴۰] . مبنای عملکرد PRI بستگی به حساسیت آن به تغییرات سریع در کاروتنوئیدها از طریق اکسیداسیون عمیق رنگ‌دانه‌های اگزانتوفیل [۶۶] و افزایش پراکندگی گرمایی تحت شرایط تنش آبی دارد [۷۷]. هنگامی‌که نور جذب‌شده توسط گیاهان از میزان تقاضای موردنیاز برای فتوسنتز تجاوز کرد، اتلاف انرژی جهت جلوگیری از آسیب به بافت‌ها، رخ می‌دهد [۸۸].. گیاهان، این انرژی اضافی را به‌صورت غیر مخرب از طریق انتشار مجدد فوتون‌ها به‌صورت فلورسانس (انتشار تابشی) و به‌وسیله تبدیل انرژی نور به گرما در بستر رنگدانه‌ای (انتشار گرمایی)، پراکنده می‌کنند.

جدول ۲. شاخص‌های طیفی گیاهی مرتبط با تنش آبی گیاه

شاخص‌های بازتابی		نماد	فرمول	منابع	شاخص‌های تنش آبی گیاه
شاخص‌های گزانتوفیل	شاخص تصاویر شیمیایی بازتابی[46]	PRI	$\frac{(R_{570}-R_{531})}{(R_{570}+R_{531})}$	Gamon et al. (1992)	فلورسانس کلروفیل و هدایت روزنه‌ای[47]

41 - Campos
42 - Filion
43 - Zhang
44 - The Photochemical Reflectance Index (PRI)
45 - xanthophyll
46 -Photochemical Reflectance Index
47 -Chlorophyll flouresence and Stomatal conductance

		PRInorm	$\frac{PRI}{(RDVI * (R_{700}/R_{670}))}$	Berni et al. (2009a, 2009b)	فلورسانس کلروفیل و هدایت روزنه‌ای
شاخص‌های ساختاری	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی[48]	NDVI	$\frac{R_{800}-R_{670}}{R_{800}+R_{670}}$	Rouse et al. (1974)	پتانسیل آب برگ و هدایت روزنه‌ای[49]
	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی	RDVI	$\frac{R_{800}-R_{670}}{\sqrt{R_{800}+R_{670}}}$	Rougean and Breon (1995)	پتانسیل آب برگ، هدایت روزنه‌ای
	جذب کلروفیل انتقال‌یافته در شاخص بازتاب[50]	TCARI	$3\left[(R_{700}-R_{670})-0.2(R_{700}-R_{550})*(\frac{R_{700}}{R_{670}})\right]$	Haboudane et al. (2002)	پتانسیل آب برگ و هدایت روزنه‌ای
	شاخص گیاهی تعدیل بهینه خاک[51]	OSAVI	$\frac{(1+0.16)(R_{800}-R_{670})}{(R_{800}+R_{670})+0.16}$	Haboudane et al. (2002)	پتانسیل آب برگ و هدایت روزنه‌ای
		TCARI/OSAVI	$\frac{3\left[(R_{700}-R_{670})-0.2(R_{700}-R_{550})*(\frac{R_{700}}{R_{670}})\right]}{\frac{(1+0.16)(R_{800}-R_{670})}{(R_{800}+R_{670})+0.16}}$	Haboudane et al., 2002	پتانسیل آب برگ، هدایت روزنه‌ای
شاخص‌های آبی	شاخص تفاضل آبی نرمال شده[52]	NDWI	$\frac{(R_{860}-R_{1240})}{R_{860}+R_{1240}}$	Gao et al. (1996)	پتانسیل آب برگ
	نسبت ساده شاخص آبی[53]	SRWI	$\frac{R_{860}}{R_{1240}}$	Zarco-Tejada et al. (2003)	پتانسیل آب برگ
	شاخص آبی	WI	$\frac{R_{900}}{R_{970}}$	Zarco-Tejada et al. (2003)	پتانسیل آب برگ

48 -Normalized Difference Vegetation Index
49 -Stomatal Conductance, Leaf water potential
50 -Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index
51 - Optimized Soil Adjusted Vegetation Index
52 - Normalized Difference Water Index
53 - Simple Ratio Water Index

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که تبدیل رنگ‌دانه‌های چرخه اگزانتوفیل می‌تواند در برگ‌ها به‌صورت تغییرات دقیقی در بازتاب ۵۳۱ نانومتر تشخیص داده شود [۴۰، ۴۱]. اخیراً محققان، حساسیت PRI را برای تشخیص تنش آبی محصول در مقیاس زمانی کوتاه نشان داده‌اند [۹۴، ۱۰۳، ۱۰۴]، زارکو-تجادا[۵۴] و همکاران [۱۰۳] همبستگی بالایی در باغات مرکبات با شاخص تصاویر شیمیایی بازتابی و پتانسیل آب برگ[۵۵] (ψ) به دست آورده‌اند. برنی[۵۶] و همکاران [۱۲،۱۳] استاندارد PRI را با استفاده از شاخص باز نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی[۵۷] (RDVI) (شاخصی حساس به ساختمان تاج گیاه) و شاخص مرز قرمزی که به مقدار کلروفیل حساس است، نرمال کردند (R_{700}/R_{670}). شاخص جدید (PRI_{norm}) نه‌تنها تغییرات رنگدانه‌ای اگزانتوفیل را به‌عنوان عملکرد تنش آبی تشخیص می‌دهد بلکه برای سطح محتوای کلروفیل و کاهش منطقه سطح برگی در تاج گیاه، به‌عنوان تنش معرفی می‌شود. روسینی[۵۸] و همکاران [۸۸] امکان نقشه‌برداری تنش آبی را با استفاده از شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی نشان دادند و از مزایای قابلیت‌های تفکیک‌پذیری مکانی را که در مناطق حرارتی مشکل‌تر هستند، بهره جستند. مطالعات، امکان به‌کارگیری داده‌های سنجش از دور در کشاورزی دقیق جهت بهبود برنامه‌ریزی آبیاری را نشان دادند. بااین‌حال، حساسیت PRI اندازه‌گیری شده در سطح تاج گیاهی محصول مستلزم تحقیقات بیشتر شامل ارزیابی فرمولی شاخص برای محصول سبزیجات باارزش بالا به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد و بهره‌وری است.

روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر

بیابی و همکاران [۱۴] با اندازه‌گیری تغییرات رنگی و موفولوژیکی گیاه لیلیوم به کمک پردازش تصویر و توسعه سامانه آبیاری هوشمند بر این اساس میزان آب مصرفی را ۱۴۵۹۰ میلی‌لیتر در روز کاهش دادند. گارسیا- متیوس[۵۹] و همکاران [۴۴] به‌منظور بهبود مدیریت آبیاری گیاه کاهو با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال، فضای رنگی Lab با دقت کلی ۹۹/۲ درصد را به‌عنوان مطلوب‌ترین فضای رنگی پیشنهاد دادند.

وو[۶۰] و همکاران [۹۹] جهت برآورد محتوای کلروفیل، دوربین‌های فرا طیفی را موردبررسی و مطالعه قراردادند و توانستند محتوای کلروفیل را با ضریب همبستگی ۰/۸۸ پیش‌بینی کنند. نداف زاده و آبدانان مهدی‌زاده [۷۰] گیاه چمن را تحت تنش خشکی قراردادند و با کمک سامانه بینایی ماشین توسعه‌یافته توانستند مرز تنش خشکی که سبب آسیب به گیاه می‌شود را با دقت ۸۰ ٪ تشخیص دهند.

شاخص‌های آبی

معمولاً باندهای جذب آب در محدوده ۲۵۰۰-۱۳۰۰ نانومتر، بیشترین حساسیت را به غلظت آب برگ در بیشتر محصولات نشان می‌دهد [۱۸]. بااین‌حال، جذب آب در این محدوده بسیار قوی است به‌طوری‌که باندهای مادون‌قرمز برای اندازه‌گیری غلظت آب در تاج‌های گیاهی محصولات، ناکافی هستند [۸۰] . بنابراین طیف بازتابی در محدوده مادون‌قرمز نزدیک به ۹۷۰-۹۵۰ نانومتر که مربوط به باند جذبی ضعیف‌تر آب می‌باشند، برای نمایش محتوای رطوبت تاج یا کل گیاه مناسب نشان داده‌شده‌اند [۸۲] . وقتی‌که گیاه تحت تأثیر تنش آب قرار می‌گیرد، طیف ۹۷۰ نانومتر بازتابی تمایل به ناپدید شدن و تغییر یافتن به طول‌موج‌های پایین‌تر دارد [۸۰]، و این مفهوم برای توسعه شاخص بازتاب آب[۶۱] (WI) و شاخص سهمیه ساده آب[۶۲] استفاده شد [۱۰۵] .

54 - Zarco- Tejada
55 - leaf water potential (ψ)
56 - Berni
57 - Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)
58 - Rossini
59 - Garcia-Mateos
60 - Wu
61 - water index (WI)

بازتاب در ۹۰۰ نانومتر به‌عنوان یک مرجع استفاده می‌شود زیرا در این طول‌موج، جذبی توسط آب صورت نمی‌گیرد اما تغییرات مشابه در ساختار نمونه برای خوانده شدن در ۹۷۰ نانومتر تحت کنترل قرار می‌گیرد. شاخص آبی دارای همبستگی بالاتری با محتوای آبی گیاه در محصولات مختلف داشته است [۸۲، ۹۸،۲۷] . پنیولاس[63] و همکاران [۸۲] ارتباطی قوی بین محتوای رطوبت و سبز بودن مشاهده نمودند و نسبت NDVI : WI را به‌عنوان شاخص بهتری برای محتوای آب تاج گیاه نسبت به شاخص آبی پیشنهاد دادند. گائو[64] [۴۲] شاخص تفاضل آبی نرمال شده [65] (NDWI) را برای پایش تغییرات محتوای آبی در برگ‌ها با استفاده از NIR (نزدیک به مادون‌قرمز) و SWIF (امواج کوتاه مادون‌قرمز) به ترتیب با طول‌موج تقریباً ۸۶۰ نانومتر و دیگری در ۱۲۴۰ نانومتر بکار برد. بازتاب SWIF، تغییرات در محتوای آبی گیاه و ساختار مزوفیل اسفنجی در تاج پوشش‌های گیاهی را منعکس کرد؛ درحالی‌که بازتاب NIR متأثر از ساختار داخلی برگ و مقدار ماده خشک برگ، اما نه محتوای آب، قرار دارد. ترکیب NIR با SWIF تغییرات ناشی از ساختار داخلی برگ و مقدار ماده خشک را حذف نموده و از این طریق، دقت در بازیابی محتوای آبی گیاه را بهبود می‌بخشد [۹۸]. بااین‌حال، گائو [۴۲] اشاره‌کرده که NDWI به تغییرات در محتوای آبی تاج گیاهان، واکنش نشان می‌دهد اما به اثرات پراکندگی آئروسل جوی نسبت به NDVI، حساسیت کمتری دارد. بنابراین، به‌صورت تکمیلی، جایگزینی برای NDVI نیست. بااین‌وجود، مطالعات قبلی نشان داده که ارتباط شاخص‌های آبی (WI, SRWI, NDWI, WI:NDVI) برای پایش تنش‌های آبی گیاه در محصولات ذرت و گندم برقرار است. به‌عنوان‌مثال، پانیگادا[66] و همکاران [۷۷] همبستگی معنی‌داری بین WI و EWT تاج گیاه به دست آوردند؛ روسینی[67] و همکاران [۸۸] همبستگی بالایی بین WI:NDVI و RWC نشان دادند؛ درحالی‌که وانگ[68] و همکاران [۹۸] ارتباط خوبی بین NDWI و محتوای آب برگ به دست آوردند و باند کم پهنای ۷۸۰ تا ۱۷۵۰ نانومتر را به‌صورت حساس نسبت به پارامترهای آبی گندم بهاره، محاسبه کردند. دلیل علاقه به شاخص‌های بازتابی، کاربرد آن‌ها در مقیاس بالا با تصاویر ماهواره‌ای است زیرا استفاده از تصاویر حرارتی به دلیل وضوح ضعیف، غیر قابل‌اطمینان بوده، درحالی‌که اطلاعات ترکیبی از گیاه و پس‌زمینه خاک به دست می‌آید. محققان امکان تعیین نقشه تنش آبی گیاه را با استفاده از شاخص‌های فرا طیفی نشان دادند اما مشاهده نمودند که تفسیر این یافته‌ها در دقت برنامه‌ریزی آبیاری نیازمند تحقیقات بیشتری است.

نتیجه‌گیری

تکنیک‌های مرسوم برنامه‌ریزی آبیاری بستگی به اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک، داده‌های هواشناسی، اندازه‌گیری پاسخ فیزیولوژیکی گیاه به‌منظور تعیین تنش آبی دارد. این رویکرد به دلیل هزینه‌های بالای سنسورها و نصب آن‌ها، و دشواری دستیابی به اندازه‌گیری‌ها خصوصاً برای خاک‌های ناهمگون و تاج‌های گیاهی محصولات، ناکافی است. پتانسیل آب برگ و هدایت روزنه‌ای، شاخص‌های گیاهی مرسومی هستند که برای تعیین محتوای آب محصول استفاده می‌شوند اما اندازه‌گیری آن‌ها مخرب، وابسته به نیروی کارگر یا نامناسب برای تنظیم خودکار است؛ این امر باعث دشواری انتخاب آن‌ها برای تعیین زمان آبیاری می‌گردد. تکنیک‌های خودکار جهت پایش محتوای آبی محصول که بتواند نتایج غیر مخرب، سریع و قابل‌اطمینان از وضعیت آب گیاه فراهم نماید، موردنیاز است.

شاخص‌های طیفی گیاهی به‌دست‌آمده از سنسورهای فرا طیفی نصب بر پهپادهای بدون سرنشین به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای پایش محتوای آب محصول و بهبود مدیریت آب در آبیاری شناخته‌شده‌اند. به‌طورکلی، بیشتر مطالعات فیزیولوژیکی درباره تنش آبی گیاه، ارتباط نسبتاً معنی‌داری (با R2 برابر با ۰/۵ یا کمتر) بین یک پارامتر اندازه‌گیری شده از روش سنجش از دور مثل NDVI یا PRI و

62 - simple ration water index (SRWI)
63 - Peñuelas
64 - Gao
65 - Normalized Difference Water Index (NDWI)
66 - Panigada
67 - Rossini
68 - Wang

اندازه‌گیری‌ای همچون شاخص منطقه برگی، هدایت روزنه‌ای و پتانسیل آب برگ گزارش داده‌اند. متأسفانه، این نوع دقت، ناکافی است که اجازه اندازه‌گیری تک پارامترها (همچون NDVI یا PRI) برای تخمین وضعیت آب گیاه را می‌دهد. بنابراین تکنیک مدیریت داده‌های خلاقانه که داده‌ها را از رویکردهای مبتنی بر خاک و گیاه ادغام می‌کند، برای گسترش دانش علمی جهت به‌کارگیری پارامترهای تنش آبی محصول به‌منظور برنامه‌ریزی آبیاری و فراهم نمودن آبیاری با ابزار پیشرفته به جهت تصمیم‌سازی نیاز است.

اگرچه شاخص‌های بازتابی طیفی برای تعیین تنش آبی در محصولات مختلف پیشنهادشده‌اند، بیشتر این مطالعات بر روی گونه‌های مختلف درختان و محصولات غلات متمرکزشده‌اند. کاربرد شاخص‌های نوری با طول‌موج پایین جهت تشخیص تنش آبی و برنامه‌ریزی آبیاری برای محصولات گیاهی ارزشمند در مناطق و محیط‌های دارای تنش آبی و در شرایط رشد، موردبررسی قرار نگرفته است. علائم بر این، ازآنجاکه VIS برای تشخیص تنش آبی محصول و ویژگی آب و هوایی است، بررسی ناحیه مرئی طیفی جهت بهبود بهره‌وری و عملکرد محصولات گیاهی، ضرورت دارد. این پتانسیل بر اساس پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی‌های سنسوری، تحلیل و پردازش تصاویر، تصمیم سازی رایانه‌ای و اندازه‌گیری شاخص‌های فرا طیفی با پهپادهای بدون سرنشین، بسیار عظیم است.

همچنین ویژگی‌های طیفی برگ منحصراً به وضعیت آب گیاه بستگی ندارد. فاکتورهایی همچون نوع خاک، ساختار تاج گیاه، ضخامت برگ، سن برگ، تفاوت در ویژگی‌های سطح برگ و تغییرات زاویه برگ ممکن است بر ارتباط بین پاسخ طیفی برگ و تنش آبی گیاه، مؤثر باشد. پژوهش‌های آینده باید بر ادغام تصاویر فرا طیفی طول‌موج پایین و حرارتی جهت فراهم نمودن اطلاعات دقیق درباره محتوای آب گیاه، و تجزیه و تحلیل داده‌های بی‌وقفه و تعیین تنش آبی گیاه به‌وسیله تکنیک‌های آنالیز تصویر پیشرفته تمرکز کنند، تا مقرون‌به‌صرفه و در دسترس کشاورزان باشد.

منابع

1. Agam, N., Cohen, Y., Berni, J., Alchanatis, V., Kool, D., Dag, A., Yermiyahu, U., Ben-Gal, A., 2013. An insight to the performance of crop water stress index for olive trees. Agric. Water Manage. 118, 79–86.
2. Aladenola, O., Madramootoo, C., 2014. Response of greenhouse-grown bell pepper)Capsicum annuum L.) to variable irrigation. Canadian J. Plant Sci. 94, 303–310.
3. Alchanatis, V., Cohen, Y., Cohen, S., Moller, M., Sprinstin, M., Meron, M., Tsipris, J,. Saranga, Y., Sela, E., 2010. Evaluation of different approaches for estimating and mapping crop water status in cotton with thermal imaging. Precision Agric. 11, 27-41.
4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspirationGuidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300, D05109.
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L., 2005. The FAO-56 dual crop coefficient method for predicting evaporation from soil and application extensions. J. Irrig. Drain. Eng. 131, 2–13.
6. Alves, I., Pereira, L.S., 2000. Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: a new approach. Irrig. Sci. 19 (2), 101–106.
7. Ameglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F., Dayau, S., Cruiziat, P,. 1999 .Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. Plant and Soil 207, 155–167. Available from http://bt.e-ditionsbyfry.com/publication/?i=316822.

8. Ballester, C., Jimenez-Bello, M., Castel, J., Intrigliolo, D., 2013. Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. Agricultural and Forest Meteorology 168, 120–129.
9. Bausch, W., Trout, T., Buchleiter, G., 2011. Evapotranspiration adjustments for deficit-irrigated corn using canopy temperature: a concept. Irrig. and Drain. 60, 682-693.
10. Behmann, J., Steinrücken, J., Plümer, L., 2014. Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 93, 98– 111.
11. Bellvert, J., Marsal, J., Girona, J., Gonzalez-Dugo, V., Fereres, E., Ustin, S.L., ZarcoTejada, P.J., 2016. Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of crop water status in peach, nectarine and saturn peach orchards. Remote Sens.8, 39.
12. Berni, J., Zarco-Tejada, P., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., Villalobos, F., 2009a. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. Remote Sens. Environ. 113, 2380–2388.
13. Berni, J.A., Zarco-Tejada, P.J., Suárez, L., Fereres, E., 2009b. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 47, 722–738.
14. Biabi, H., Abdanan Mehdizadeh, S. and Salehi Salmi, M.R. 2019. Design and implementation of a smart system for water management of lilium flower using image processing. Computers and Electronics in Agriculture. 160, 131-143.
15. Bouraima, A.-K., Zhang, W.H., Wei, C.F., 2015. Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin. Int. J. Agric. Biol. Eng. 8 (2), 58–64.
16. Busetto, L., Migliavacca, M., Amaducci, S., Colombo, R., 2013. Assessing canopy
17. Campos, I., González-Piqueras, J., Carrara, A., Villodre, J., Calera, A., 2016. Estimation of total available water in the soil layer by integrating actual evapotranspiration data in a remote sensing-driven soil water balance. J. Hydrol. 534, 427–439.
18. Carter, G.A., 1991. Primary and secondary effects of water concentration on the spectral reflectance of leaves. Am. J. Bot. 78, 916–924.
19. Cheng, X.-J., Wang, D., 2014. Estimating canopy water content in wheat based on new vegetation water index. Spectrosc. Spectral Anal. 34, 3391–3396.
20. Clarke, T.R., 1997. An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. Hort Technol. 7, 9–16.
21. Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., Tsipris, J., 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. J. Exp. Botany 56, 1843- 1852.
22. Collaizzi, P., Kustas, William P., Anderson, Martha C., Agam, Nurit; Tolk, Judy A,. Evett, Steven R., Howell, Terry A., Gowda, Prasanna H., O'Shaughnessy, Susan A,. 2013 .Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. Publications from USDA-ARS/ UNL Faculty. Paper 1147. http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1147.

23. Colombo, R., Meroni, M., Busetto, L., Rossini, M., Panigada, C., 2011. Optical remotesensing of vegetation water content. In: Thenkabail, P.S., Lyon, J.G,. Huete, A. (Eds.), Hyperspectral remote sensing of vegetation. CRC Press/Taylor and Fran-cis Group, USA, pp. 227–244.
24. Colombo, R., Meroni, M., Marchesi, A., Busetto, L., Rossini, M., Giardino, C., Panigada, C., 2008. Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling. Remote Sens. Environ. 112, 1820- 1834.
25. Dangwal, N., Patel, N., Kumari, M., Saha, S., 2015. Monitoring of water stress in wheat using multispectral indices derived from Landsat-TM. Geocarto Int., 1–12.
26. Danson, F., Steven, M., Malthus, T., Clark, J., 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. Int. J. Remote Sens. 13, 461–470.
27. Dawson, T., Curran, P., North, P., Plummer, S., 1999. The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. Remote Sens. Environ. 67, 147–159.
28. Dejonge, K.C., Taghvaeian, S., Trout, T.J., Comas, L.H., 2015. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. Agric. Water Manage. 156, 51–62.
29. Eastham, J., Gray, S.A., 1998. A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation. American J. Enol. Viticulture 49, 171–176.
30. Effect of short-term water stress on leaf gas exchange processes and plant water potential in Schefflera. Hort Sci. 20, 932–934.
31. Ehret, D.L., Lau, A., Bittman, S., Lin, W., Shelford, T., 2001. Automated monitoring of greenhouse crops. Agronomie 21, 403–414.
32. Ehsani, R., Wulfsohn, D., Das, J., Lagos, I.Z., 2016. Yield estimation: a low–hanging fruit for application os small UAS. ASABE Resource magazine. Available from http://bt.eitionsbyfry.com/publication/?i=316822.
33. Elston, J., 2016. Why unmanned aircraft for agriculture? ASABE Resource magazine.
34. Fereres, E., Goldhamer, D.A., 2003. Suitability of stem diameter variations and water
35. Filion, R., Bernier, M., Paniconi, C., Chokmani, K., Melis, M., Soddu, A., Talazac, M., Lafortune, F., 2016. Remote sensing for mapping soil moisture and drainage potential in semi-arid regions: applications to the Campidano plain of Sardinia, Italy. Sci. Total Environ. 543, Part B, 862–876.
36. Flexas, J., Escalona, J.M., Evain, S., Gulías, J., Moya, I., Osmond, C.B., Medrano, H., 2002. Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO2 assimilation and stomatal conductance during water-stress in C3 plants. Physiologia plantarum 114, 231–240.
37. Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., Gallego, P.P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J., Medrano, H., 2015. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. Agric. Water Manage. 153, 9–19.
38. Gallardo, M., Thompson, R., Valdez, L., Fernández, M., 2006. Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse-grown vegetable crops. J. Horticultural Sci. Biotechnol. 81, 483–495.
39. Gamon, J., 2015. Reviews and syntheses: optical sampling of the flux tower footprint. Biogeosciences 12, 4509–4523.
40. Gamon, J., Penuelas, J., Field, C., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. Remote Sens. Environ. 41, 35–44.

41. Gamon, J., Serrano, L., Surfus, J., 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. Oecologia 112, 492–501.
42. Gao, B., 1996. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sens. Environ. 58, 257–266.
43. Garces-Restrepo, C., Vermillion, D., Mu~noz, G., 2007. Irrigation management transfer. Worldwide efforts and results. FAO, Rome. pp. 62.
44. Garsia-Mateos, G., Hernandez- Hernandez, J. L. Escarabajal- Henarejos, D., Jean-Terrones, S. and Molina- Martines, J. M. 2015. Study and comparison of color models for automatic images analysis in irrigation management applications. Agricultural water management. 151, 158-166.
45. Giorio, P., Giorio, G., 2003. Sap flow of several olive trees estimated with the heatpulse technique by continuous monitoring of a single gauge. Environ. Exp. Botany 49, 9–20.
46. González-Dugo, M., Moran, M., Mateos, L., Bryant, R., 2006. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. Irrigation Sci. 24, 233– 240.
47. Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P.J., Fereres, E., 2014. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. Agric. For. Meteorol. 198–199.
48. Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiol. 3, 309–320.
49. Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., Dextraze, L., 2002.
50. Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1 (2), 96–99.
51. Hernández-Clemente, R., Navarro-Cerrillo, R.M., Suárez, L., Morales, F., Zarco-Tejada, P.J., 2011. Assessing structural effects on PRI for stress detection in conifer forests. Remote Sens. Environ. 115, 2360–2375.
52. Hirich, A., Fatnassi, H., Ragab, R., Choukr-Allah, R., 2016. Prediction of climate change impact on corn grown in the south of morocco using the saltmed model. Irrig. and Drain. 65, 9–18.
53. Huguet, J.-G., Li, S., Lorendeau, J.-Y., Pelloux, G., 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. J. Horticultural Sci. 67, 631–640.
54. Idso, S., Jackson, R., Pinter, P., Reginato, R., Hatfield, J., 1981. Normalizing the stressdegree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol. 24, 45–55.
55. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. Remote Sens. Environ. 81, 416– 426.
56. Irmak, S., Haman, D.Z., Bastug, R., 2000. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn. Agron. J. 92 (6), 1221–1227.
57. Jones, H., 2010. Remote detection of crop water stress and distinguishing it from other stresses. XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 922. 23–34.
58. Jones, H., 2012. Remote sensing of plant stresses and its use in irrigation management. VII Int. Symp. Irrig. Horticultural Crops 1038, 239–247.
59. Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. J. Exp. Botany 55, 2427–2436.
60. Kullberg, E.G., DeJonge, K.C., Chávez, J.L., 2017. Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. Agric. Water Manage. 179, 64–73.

61. Lei, Y., Zhang, H., Chen, F., Zhang, L., 2016. How rural land use management facilitates drought risk adaptation in a changing climate—A case study in arid northern China. Sci. Total Environ. 550, 192–199.
62. Leroux, L., Baron, C., Zoungrana, B., Traoré, S.B., Seen, D.L., Bégué, A., 2016. Crop monitoring using vegetation and thermal indices for yield estimates: case study of a rainfed cereal in semi-arid west africa. IEEE J. Selected Topics in Appl. Earth Observations and Remote Sens. 9, 347–362.
63. Limpus, S., 2009. Isotropic and anisotropic characterisation of vegetable crops. In: Fisheries, D.O.P.I.A. (Ed.).
64. Lorenzo-Minguez, P., Ceulemans, R., Gabriels, R., Impens, I., Verdonck, O., 1985.
65. Maes, W., Achten, W., Reubens, B., Muys, B., 2011. Monitoring stomatal conductance of Jatropha curcas seedlings under different levels of water shortage with infrared thermography. Agric. Forest Meteorol. 151, 554–564.
66. Magney, T.S., Vierling, L.A., Eitel, J.U., Huggins, D.R., Garrity, S.R., 2016. Response of high frequency Photochemical Reflectance Index (PRI) measurements to environmental conditions in wheat. Remote Sens. Environ. 173, 84–97.
67. Meroni, M., Rossini, M., Guanter, L., Alonso, L., Rascher, U., Colombo, R., Moreno, J., 2009. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence: review of methods and applications. Remote Sens. Environ. 113, 2037–2051.
68. Meroni, M., Rossini, M., Picchi, V., Panigada, C., Cogliati, S., Nali, C., Colombo, R., 2008. Assessing steady-state fluorescence and PRI from hyperspectral proximal sensing as early indicators of plant stress: the case of ozone exposure. Sensors 8, 1740–1754.
69. Moya, I., Camenen, L., Evain, S., Goulas, Y., Cerovic, Z., Latouche, G., Flexas, J., Ounis, A., 2004. A new instrument for passive remote sensing: 1. Measurements of sunlight-induced chlorophyll fluorescence. Remote Sens. Environ. 91, 186–197.
70. Nadafzadeh, M., Abdanan Mehdizadeh, S. and Soltanikazemi, M. 2018. Development of computer vision system to predict peroxidase and polyphenol oxidase enzymes to evaluate the process of banana peel browing using genetic programming modeling. Scientia Horticulturea. 231, 201-209.
71. Nielsen, D.C., Gardner, B.R., 1988. Scheduling irrigation for corn with the crop water stress index (CWSI). Appl. Agric. Res. 2 (5), 295–300.
72. O'Shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D., Howell, T.A., 2012. A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. Agric. Water Manage. 107, 122–132.
73. Osakabe, Y.1., Osakabe, K., Shinozaki, K.1., Lam-Son, P., 2014. Response of plants to water stress. Front Plant Sci. 5, 86.
74. Osroosh, Y., Peters, R.T., Campbell, C.S., Zhang, Q., 2015. Automatic irrigation scheduling of apple trees using theoretical crop water stress index with an innovative dynamic threshold. Comp. Electron. Agric. 118, 193–203.
75. Osroosh, Y., Peters, R.T., Campbell, C.S., Zhang, Q., 2016. Comparison of irrigation automation algorithms for drip-irrigated apple trees. Comp. Electron. Agric. 128, 87–99.
76. Paltineanu, C., Septar, L., Moale, C., 2013. Crop water stress in peach orchards and relationships with soil moisture content in a Chernozem of Dobrogea. J. Irrig. Drain Eng. 139 (1), 20–25.
77. Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Cilia, C., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Cogliati, S., Picchi, V., Pinto, F., Marchesi, A., Colombo, R., 2014. Fluorescence, PRI and canopy temperature for water stress detection in cereal crops. Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation 30, 167–178.

78. Patel, A., Sharda, R., Patel, S., Meena, P., 2017. Reference evapotranspiration estimation using cropwat model at ludhiana district (Punjab). Int. J. Sci., Environ. Technol. 6 (1), 620–629.
79. Payero, J.O., Irmak, S., 2006. Variable Upper and Lower Crop Water Stress Index Baselines for Corn and Soybean. Biological Systems Engineering: Papers and Publications. <http://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/50>.
80. Peñuelas, J., Filella, I., 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. Trends in Plant Sci. 3, 151–156.
81. Peñuelas, J., Garbulsky, M.F., Filella, I., 2011. Photochemical reflectance index (PRI) and remote sensing of plant CO2 uptake. New Phytologist 191, 596–599.
82. Peñuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., Filella, I., 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). Int. J. Remote Sens. 18, 2869–2875.
83. potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. J. Horticultural Sci. Biotechnol. 78, 139–144.
84. PRI from airborne imagery to map water stress in maize. ISPRS J. Photogramm.
85. Rahimzadeh-Bajgiran, P., Munehiro, M., Omasa, K., 2012. Relationships between the photochemical reflectance index (PRI) and chlorophyll fluorescence parameters and plant pigment indices at different leaf growth stages. Photosynthesis Res. 113, 261–271.
86. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studies by model simulations. Remote Sens. Environ. 50, 1–17.
87. Rossini, M., Fava, F., Cogliati, S., Meroni, M., Marchesi, A., Panigada, C., Giardino, C., Roujean, J.L., Breon, F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sens. Environ. 51, 375–384.
88. Rossini, M., Fava, F., Cogliati, S., Meroni, M., Marchesi, A., Panigada, C., Giardino, C., Roujean, J.L., Breon, F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sens. Environ. 51, 375–384.
89. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Fraden, S.C., Marcanti, E.P., Becker, M. A. (Eds.), Third ERTS-1 Symposium, 10–14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C.. NASA, pp. 309–317.
90. Scholander, P.F., Hammel, H., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E., 1965. Sap pressure in vascular plants. Science 148, 339–346.
91. Singh, A.K., Madramootoo, C.A., Smith, D.L., 2010. Water balance and corn yield under different water table management scenarios in Southern Quebec. In: 9th international drainage symposium held jointly with CIGR and CSBE/SCGAB proceedings, 13–16 June 2010, Québec City convention centre, Quebec City, Canada. American Soc. Agric. Biol. Engineers, 1.
92. Steele, D.D., Stegman, E.C., Gregor, B.L., 1994. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. Trans. ASAE 37 (4), 1197–1203.
93. Stockle, C.O., Dugas, W.A., 1992. Evaluating canopy temperature based indices for irrigation scheduling. Irrig. Sci. 13, 31–37.
94. Suárez, L., Zarco-Tejada, P., Berni, J., González-Dugo, V., Fereres, E., 2010. Orchard Water Stress detection using high-resolution imagery. XXVIII international horticultural congress on science and horticulture for people (IHC2010): international symposium on 922. 35–39.
95. Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A., González-Dugo, V., Fereres, E., 2009. Modelling PRI for water stress detection using radiative transfer models. Remote Sens. Environ. 113, 730–744.

96. Surendran, U., Sushanth, C.M., Mammen, G., Joseph, E.J., 2017. FAO-CROPWAT model-based estimation of crop water need and appraisal of water resources for sustainable water resource management: Pilot study for Kollam district – humid tropical region of Kerala, India. Current Sci. 112 (1), 76–86.
97. Taghvaeiana, S., Comas, L., DeJonge, K.C., Trout, T.J., 2014. Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower. Agric. Water Manage. 144, 69–80.
98. Wang, X., Zhao, C., Guo, N., Li, Y., Jian, S., Yu, K., 2015. Determining the canopy water stress for spring wheat using canopy hyperspectral reflectance data in loess plateau semiarid regions. Spectrosc. Lett. 48, 492–498.
99. Wu, M. and Kubota, CH. 2008. Effect of high electrical conductivity of nutrient solution and its application timing on lycopene, chlorophyll and sugar concentration of hydroponic tomatoes during ripening. Scientia Horticulturea. 116 (2). 122-129.
100. Yazar, A., Howell, T.A., Dusek, D.A., Copeland, K.S., 1999. Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn. Irrig. Sci. 18 (4), 171–180.
101. Yildirim, M., Demirel, K., Bahar, E., 2012. Effect of restricted water supply and stress development on growth of bell pepper (Capsicum Annuum L.) under drought conditions. J. Agro Crop Sci. 3, 1–9.
102. Zarco-Tejada, P.J., Berni, J.A., Suárez, L., Sepulcre-Cantó, G., Morales, F., Miller, J., 2009. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. Remote Sens. Environ. 113, 1262–1275.
103. Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Berni, J.A., 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. Remote Sens. Environ. 117, 322–337.
104. Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Williams, L., Suárez, L., Berni, J.A., Goldhamer, D., Fereres, E., 2013. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. Remote Sens. Environ. 138, 38–50.
105. Zarco-Tejada, P.J., Rueda, C.A., Ustin, S.L., 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. Remote Sens. Environ. 2003 (85), 109–124.
106. Zhang, H., Han, M., Chavez, J.L., Lan, Y., 2017a. Improvement in estimation of soil water deficit by integrating airborne imagery data into a soil water balance model. Int. J. Agric. Biol. Eng. 10 (3), 37–46.
107. Zhang, H., Xiong, Y., Huang, G., Xu, X., Huang, Q., 2017b. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao irrigation district. Agric. Water Manage. 179, 205–214.
108. Zhao, T., Stark, B., Chen, Y., Ray, A. L., Doll, D., 2015. A detailed field study of direct correlations between ground truth crop water stress and normalized difference vegetation index (NDVI) from small unmanned aerial system (sUAS). Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on IEEE. 520–525.