

تعیین محتوای رطوبت نسبی برگ دو ژنوتیپ کنجد با طیف سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک (Vis/NIR) برای تشخیص تنش خشکی

آذر خورسندی^۱، عباس همت^{۲*}، سید احمد میره‌ای^۳، پرویز احسان زاده^۴ و رسول امیرفتاحی^۵

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱/۱۷)

چکیده

محتوای رطوبت نسبی (RWC) در گیاهان یکی از مهم‌ترین پارامترهای بیوشیمیایی است و کمبود آن کارایی فتوسنتز و بهره‌وری محصول را محدود می‌کند. گزارش‌های علمی در مورد استفاده از طیف‌سنجی در تشخیص تنش خشکی برای گیاه کنجد بسیار نادر است. در این پژوهش، امکان شناسایی تنش خشکی در دو ژنوتیپ حساس (ناز تک شاخه) و مقاوم (یکتا) با پیش‌بینی RWC در برگ کنجد در شرایط تنش آبی با استفاده از شاخص‌های طیفی بررسی شد. از شاخص‌های طیفی توسعه‌یافته در قالب نسبت/تفاوت بازتاب به‌دست آمده از طیف بازتابش، محدود به ناحیه VIS/NIR (400-1100 nm) استفاده شد. صد و پنجاه گلدان از هر یک از دو ژنوتیپ به‌طور تصادفی به سه گروه مساوی تقسیم شدند. گلدان‌ها در پتانسیل مکشی خاک ۰/۱- (آبیاری خوب)، ۱- (تنش متوسط)، و ۱/۵- (مگاپاسکال (تنش شدید) آبیاری شدند. سپس طیف‌سنجی بازتابشی از برگ‌های هر گلدان، در ناحیه نور مرئی و مادون قرمز نزدیک تهیه شد. RWC برگ نیز اندازه‌گیری شد. در اکثر موارد، روابط خطی بین RWC و میانگین سه باند طیف بازتابشی برگ شامل: سبز (۵۲۰ تا ۵۶۵ نانومتر)، قرمز (۵۸۰ تا ۷۶۰ نانومتر) و مادون قرمز نزدیک (۷۶۰ تا ۹۰۰ نانومتر)، و همچنین شاخص‌های پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) و نسبت‌های طیفی (SR) استخراج شده از طیف بازتابشی، به‌دست آمد. نتایج نشان داد که میانگین بازتابش منطقه قرمز با ضرایب تبیین ۰/۷۸ و ۰/۷۶ و RMSE ۴/۵۸ و ۲/۵۱، شاخص NDVI3 با ضرایب تبیین ۰/۸۰ و ۰/۷۹ و RMSE ۳/۸۴ و ۲/۵۱ و همچنین نسبت SR با ضرایب تبیین ۰/۸۴ و ۰/۷۶ و RMSE ۳/۴۰ و ۲/۶۶ به ترتیب برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک‌شاخه، بهترین نتایج را برای پیش‌بینی محتوای رطوبت نسبی برگ ارائه دادند بنابراین، طیف‌سنجی VIS/NIR روشی سریع، تاحدی دقیق و غیرمخرب برای تشخیص شرایط آبی کنجد است. در شرایط تنش آبی، تغییرات شدیدتر RWC برگ در ژنوتیپ "یکتا" در مقایسه با "ناز تک شاخه" منجر به عملکرد بهتر شاخص‌های طیفی بازتابشی در تخمین محتوای رطوبت نسبی برگ در این ژنوتیپ شد. نتایج ارائه شده می‌تواند منجر به توسعه یک ابزار قابل‌حمل برای تشخیص سریع و غیرمخرب RWC برگ کنجد شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، نسبت ساده طیفی (SR)، تنش آبی، طیف‌سنجی مرئی - فرورسرخ

نزدیک، طیف بازتابش پراکنشی

۱، ۲ و ۳. به ترتیب دانش آموخته دکتری، استاد و دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴. استاد، گروه مهندسی زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۵. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ahemmat@iut.ac.ir

مقدمه

گیاهی) و غیرزیستی (مانند تنش‌های خشکی و شوری) مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۶ و ۱۹).

در اثر برخورد پرتوهای نور به برگ، بخشی از طیف نوری توسط برگ جذب و بخشی دیگر عبور یا بازتاب می‌یابد. طیف بازتابشی گیاه بستگی به ویژگی‌های سطح برگ، ساختار داخلی و غلظت و توزیع ترکیبات بیوشیمیایی برگ دارد. به این ترتیب، از تجزیه و تحلیل طیف بازتابشی برگ می‌توان برای ارزیابی خصوصیات و وضعیت فیزیولوژیکی گیاه استفاده کرد. شرایط آبی گیاه را می‌توان با بررسی شرایط آبی بافت‌های اندام‌های گیاهی از جمله ریشه، ساقه و برگ گیاه ارزیابی کرد. در مقایسه با دیگر اندام‌های گیاهی، تجزیه و تحلیل برگ یکی از مهم‌ترین ابزارها برای ارزیابی شرایط آبی و غذایی گیاه است که می‌تواند ملاکی برای آبیاری و کوددهی گیاه باشد (۲۹). طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک (Vis/NIR) را می‌توان برای تشخیص محتوای رطوبت نسبی برگ (RWC) استفاده کرد. روش‌های طیف‌سنجی مرئی - مادون قرمز نزدیک مبتنی بر اطلاعات طیفی گرفته شده از سطح برگ در محدوده طول موج‌های مرئی (Vis) و مادون قرمز نزدیک (NIR) است. در روش طیف‌سنجی بازتابشی، از دست دادن آب در گیاه منجر به تغییر در بازتابش نور پخش شده (بازتابش پراکنشی: diffuse reflectance) از برگ گیاه می‌شود. به دلیل جذب بعضی از طول موج‌های موجود در پرتو تابیده شده به سطح برگ، شدت طیف بازتابش یافته از برگ با پرتو تابشی شده متفاوت است. به این پرتو تابیده شده، بازتابش پخشی نیز گفته می‌شود. جذب پرتو تابیده شده توسط پیوند O-H آب موجود در برگ، منجر به کاهش شدت طیف بازتابشی در باندهای خاصی از طیف می‌شود (۱۵، ۱۶ و ۱۷).

تنش خشکی باعث کاهش سرعت فتوسنتز خالص و تعرق در گیاهان زراعی شده و موجب کاهش رشد در این گیاهان می‌شود. بسته شدن روزنه‌های گیاه تحت تنش خشکی، به منظور حفظ بیشتر محتوای آب سلول، می‌تواند باعث کاهش جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز در گیاه شود. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی در گیاه و

یکی از رایج‌ترین و محدودکننده‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد محصولات کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک، تنش آبی است (۳۰). این تنش می‌تواند منجر به بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق گیاه از سطح برگ شود. علاوه بر این، افزایش تنش آبی، منجر به کاهش فعالیت فتوشیمیایی کلروفیل و در نتیجه کاهش غلظت کلروفیل، اختلال در عملکرد فتوسنتز، کاهش در جذب مواد غذایی توسط ریشه از خاک و انتقال مواد غذایی از ریشه به برگ و در نتیجه کاهش تولید محصول می‌شود (۱۱ و ۱۳). بنابراین، تشخیص زمانی و مکانی تنش رطوبتی گیاه در مزرعه، با استفاده از فناوری‌های نوین برای تدوین یک برنامه زمان‌بندی آبیاری و سپس به کاربردن تکنولوژی‌هایی مانند روش‌های آبیاری دقیق، در مناطق خشک و نیمه خشک می‌تواند دارای پیامدهای مهمی در شیوه‌های مدیریت کشاورزی باشد (۱۵). شرایط آبی برگ در تاج (کانوپی) گیاه، یکی از پارامترهای به شدت دینامیکی است و به سرعت به تغییر رطوبت خاک پاسخ می‌دهد (۲۵).

روش‌های سنتی برای اندازه‌گیری تنش آبی در محصولات کشاورزی، بر پایه نمونه‌برداری مستقیم از خاک در مزرعه و یا گیاه استوار است. این روش‌ها شامل اندازه‌گیری محتوای آب خاک و یا مکش آب خاک در روش خاک‌پایه و اندازه‌گیری پتانسیل آب برگ و جریان شیره گیاه در روش‌های گیاه‌پایه هستند. اگرچه روش‌های خاک‌مبنا نشان‌دهنده وجود آب در منطقه ریشه هستند، اما همیشه با وضعیت آبی گیاه ارتباط مستقیم ندارند. علاوه بر این، هرچند اندازه‌گیری‌های پتانسیل آب برگ و جریان شیره در آن‌ها، اطلاعات مستقیمی از وضعیت آب گیاه را فراهم می‌کنند، ولی نیاز به نمونه‌برداری مخرب از گیاه دارند، که در مقیاس مزرعه دشوارتر است. روش‌های سنسجش غیر تماسی و غیر مخرب می‌توانند به‌طور مداوم گیاهان را پایش کنند (۱۴). امروزه در کشاورزی دقیق، روش طیف‌سنجی به‌عنوان یک روش غیرمخرب برای تشخیص و پایش عوامل تنش‌زای زیستی (مانند بیماری‌ها و آفات

گیاه، به تغییرات شاخص‌های سبزیگی باریک باند در لبه قرمز، نسبت به شاخص‌های با پهن باند حساس‌تر است (۸).

اگرچه کنجد (*Sesamum indicum* L.) مقاومت نسبتاً بالایی به تنش‌های محیطی دارد، ولی تنش‌ها، از جمله تنش آبی، می‌توانند روی کاهش عملکرد آن اثر معنی‌داری بگذارند. در مطالعه‌ای که برای بررسی تأثیر رطوبت خاک (تنش خشکی) روی فیزیولوژی دوازده ژنوتیپ از گیاه کنجد در اصفهان انجام شد، مشخص شد تیمار آبیاری در سطح احتمال یک درصد بر سرعت فتوسنتز خالص تأثیر معنی‌داری گذاشت. در این مطالعه، تنش خشکی شدید (۱/۴- مگاپاسکال) باعث کاهش ۴۳/۸ درصدی سرعت فتوسنتز خالص برگ نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین گزارش شد که محتوای کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و نسبت کلروفیل a/b تحت تنش خشکی شدید به ترتیب ۴۸، ۴۳/۵، ۴۶/۶ و ۵/۷ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش می‌یابد (۲۰).

در پژوهش حاضر، امکان‌سنجی اندازه‌گیری غیرمخرب و سریع مقدار آب برگ دو ژنوتیپ از گیاه کنجد با استفاده از طیف‌سنجی در محدوده طیف مرئی- مادون قرمز نزدیک (۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر) مورد مطالعه قرار گرفت. در همین راستا، اهداف این پژوهش عبارت بودند از: (الف) برآورد مقدار RWC در گیاه کنجد در دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه با استفاده از شاخص‌های استخراج شده از طیف بازتابشی برگ گیاه کنجد و (ب) بررسی امکان تشخیص شرایط تنش آبی در گیاه کنجد در دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه با استفاده از روش غیرمخرب طیف‌سنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان، واقع در بخش مرکزی ایران (32°38'N; 51°39'E; 1620 m, altitude)، به صورت یک آزمایش گلدانی، در قالب یک طرح کاملاً تصادفی روی دو ژنوتیپ گیاه کنجد (ناز تک شاخه و یکتا)، با سه تیمار آبیاری و ۵۰ تکرار برای هر تیمار اجرا شد. ژنوتیپ ناز تک شاخه به عنوان ژنوتیپ حساس‌تر به تنش خشکی و

در نتیجه کاهش فتوسنتز، مقدار بازتابش در سه منطقه نور سبز، قرمز و فروسرخ نزدیک تغییر می‌کند که نشان‌دهنده همبستگی RWC و بازتابش در سه منطقه طیف سبز (۵۲۰ تا ۵۶۵ نانومتر)، قرمز (۵۸۰ تا ۷۶۰ نانومتر) و فروسرخ نزدیک (۷۶۰ تا ۹۰۰ نانومتر) است (۸، ۱۲ و ۲۱).

تاکنون شاخص‌ها و نسبت‌های زیادی از طیف بازتابشی تهیه شده از برگ گیاهان استخراج و رابطه آن‌ها با پارامترهای مختلف برگ شامل رطوبت نسبی برگ و محتوای کلروفیل مورد بررسی قرار گرفته است (۳، ۴، ۵، ۱۷، ۲۲ و ۲۶). بیشتر این شاخص‌ها بر اساس تفاوت بازتاب طیف الکترومغناطیسی تاج گیاهان در طول موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک طراحی شدند. بازتابش در محدوده طول موج قرمز (حدود ۰/۶-۰/۷ میکرومتر) به دلیل جذب توسط رنگیزه‌های موجود در برگ گیاهان (عمدتاً کلروفیل)، بسیار کم است. از طرفی مقدار بازتابش در محدوده مادون قرمز نزدیک (حدود ۰/۸-۰/۹ میکرومتر) به علت جذب کم توسط برگ‌های گیاهان بسیار زیاد است. یکی از این شاخص‌ها، شاخص پوشش گیاهی (Vegetation Index: VI) است که از تفریق باند مادون قرمز نزدیک از باند قرمز به دست می‌آید. ولی شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) متداول‌ترین شاخص گیاهی است که از تقسیم اختلاف (تفاضل) مقادیر باندهای قرمز (Red) و مادون قرمز (NIR) بر مجموع آنها به دست می‌آید. تعدادی از این شاخص‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در میان شاخص‌های جدول ۱، برای محاسبه شاخص‌های سبزیگی پهن‌باند (Broadband greenness Indices) از یک باند طیف بازتابشی در منطقه NIR و دیگری در منطقه قرمز، جایی که کلروفیل برای فتوسنتز، فوتون‌های آن ناحیه را جذب می‌کند، استفاده شده است. درحالی‌که برای محاسبه شاخص‌های سبزیگی باریک‌باند (Narrowband greenness Indices)، از لبه قرمز (منطقه‌ای با شیب شدید در محدوده ۶۹۰ تا ۷۴۰ نانومتر) استفاده شده است. بر اساس مطالعات قبلی، سلامتی و سبزیگی

Inc. ساخت کشور ایران و ساخته شده در آزمایشگاه تراهترز گروه فوتونیک دانشگاه کاشان، استفاده شد. این اسپکترومتر قادر به ثبت طیف الکترومغناطیسی در ناحیه ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر، با وضوح دو نانومتر بوده و مجهز به آشکارساز از نوع CCD است. در این مطالعه، برای هدایت نور از منبع نور به سطح برگ و همچنین به منظور انتقال طیف بازتابشی از برگ به داخل اسپکترومتر، از پروب فیبر نوری مدل R600-8-VisNIR ساخت شرکت استلارنت کشور آمریکا، استفاده شد. برای نگهداری پروب روی برگ در حین طیف‌سنجی و همچنین برای جلوگیری از تأثیرگذاری نور محیطی بر آزمایش، گیره نگهدارنده‌ای برای پروب ساخته شد. این گیره دارای دو فک از جنس پلی آمید سیاه بود و به نحوی طراحی شد که پس از قرارگیری برگ مابین فک‌ها، هیچ نوری از اطراف وارد پروب نشود. همچنین فاصله مابین پروب با برگ توسط پیچی در داخل گیره، قابل تنظیم بود.

برای ثبت طیف بازتابشی Vis/NIR برگ، ابتدا با قرار دادن پروب نوری در داخل گیره نگهدارنده برگ و اتصال آن به دستگاه طیف‌سنج و منبع نور و همچنین اتصال دستگاه طیف‌سنج به رایانه، عملیات ثبت طیف بازتابشی برگ آغاز شد. برای اندازه‌گیری طیف نسبی بازتابشی، قبل از عملیات طیف‌سنجی، دو طیف مرجع سفید و تیره تعریف شد. برای اینکار از مرجع استاندارد سفید شامل استوانه‌ای به قطر ۵۰ میلی‌متر و حاوی ماده‌ای با نام هالون (Halon) با قابلیت بازتابش بیش از ۹۷٪ نور در گستره ۳۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر برای طیف مرجع استفاده شد. به این صورت که گیره نگهدارنده روی مرجع استاندارد سفید قرار گرفت و طیف بازتابشی به‌عنوان طیف مرجع ($R_{reference}$) ثبت شد. برای تهیه طیف تیره، ابتدا درپوش پروب فیبر نوری آن قرار داده شد، و سپس با خاموش کردن منبع نور، طیف تیره (R_{dark}) ثبت شد. در نهایت یکی از برگ‌های انتهایی و کامل توسعه یافته از هر گل‌دان، انتخاب و طیف بازتابشی برگ اندازه‌گیری و ثبت شد. طیف بازتابشی نسبی ($R_{relative}$) برای هر نمونه از رابطه (۲) به دست آمد (۲۷):

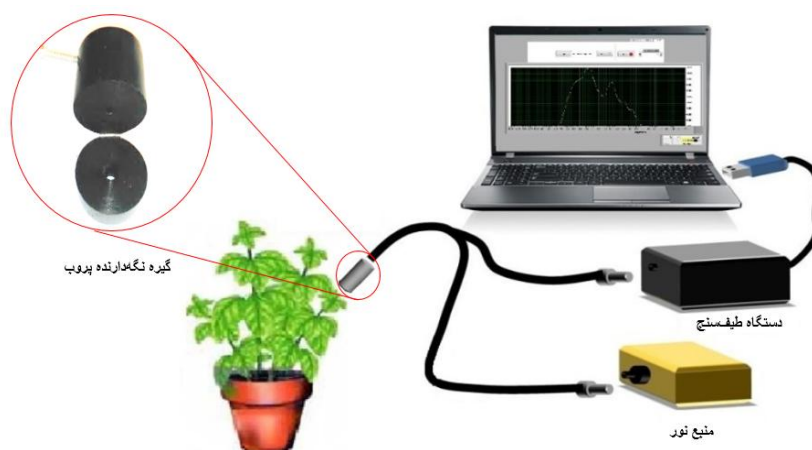
ژنوتیپ یکتا به‌عنوان ژنوتیپ مقاوم‌تر به تنش خشکی، در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند (۲۸).

سه تیمار آبیاری شامل آبیاری در پتانسیل آبی خاک ۰/۱- (بدون تنش؛ WW)، ۱- (تنش متوسط؛ MWS) و ۱/۵- (تنش شدید؛ SWS) بود (۲۸). هر واحد آزمایشی شامل یک گل‌دان به قطر ۱۷ سانتی‌متر بود. بذور کنجد از هر دو ژنوتیپ ناز تک شاخه (N) و یکتا (Y)، هر کدام در گل‌دان‌های جدا کاشته شدند. پس از سبز شدن کامل و استقرار گیاه‌ها، عمل تنک کردن انجام شد و ۶ گیاه در هر گل‌دان باقی ماند. در ابتدای آزمایش تا ۶ هفته پس از کاشت، همه گل‌دان‌ها به طور یکسان و پس از تخلیه شدن ۲۰٪ از آب در دسترس خاک تحت آبیاری مناسب قرار گرفتند. پس از ۶ هفته، در انتهای مرحله رویشی و در شروع مرحله زایشی، تنش خشکی به گیاهان/بوته‌ها اعمال شد (۷). سپس عملیات طیف‌سنجی مرئی-مادون‌قرمز نزدیک روی گل‌دان‌ها انجام شد (۷). در این مطالعه، محتوای RWC برگ به‌عنوان روش مرسوم گیاه‌منا برای بیان شرایط رطوبتی گیاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. برگی از برگ‌های انتهایی و کاملاً توسعه یافته هر گل‌دان انتخاب شد (۲۸). برای تعیین درصد وزنی RWC برگ از رابطه (۱) استفاده شد (۲۳):

$$RWC(\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100 \quad (1)$$

که در آن FW وزن برگ تازه (g)، DW وزن برگ خشک (g) و TW وزن برگ بعد از قرار گرفتن در آب مقطر، در اتاق تاریک و به مدت ۴ ساعت (g) است. اندازه‌گیری RWC بلافاصله پس از انجام آزمایش طیف‌سنجی روی گل‌دان‌ها انجام شد.

در این مطالعه، سامانه‌ای برای جمع‌آوری طیف بازتابشی برگ کنجد در محدوده امواج مرئی-مادون‌قرمز نزدیک (Vis/NIR) شامل طیف‌سنج، منبع نور، پروب فیبر نوری، گیره نگه دارنده، پروب و برگ و مرجع سفید مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). برای تهیه طیف بازتابشی از برگ گیاه کنجد، از یک اسپکترومتر PDA (Photodiode Array Spectrometers) مدل Spec-700, OPTIC استفاده شد.



شکل ۱. سامانه جمع آوری طیف بازتابشی برگ (۷)

در شکل طیف‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. (۴) تصحیح خط پایه. پیش پردازش خط پایه یک نوع تبدیل است که در آن یک خط پایه‌ی شیب دار به یک خط پایه‌ی افقی تبدیل می‌شود. برای اجرای این روش‌ها از نرم افزار The Unscrambler استفاده شد (۷).

در این مطالعه، رابطه محتوای رطوبت نسبی برگ دو ژنوتیپ از گیاه کنجد و طیف بازتابشی گرفته شده از برگ آنها مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های طیف بازتابشی دریافت شده از برگ کنجد در دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه، تحت سه تیمار آبیاری WW، MWS، و SWS در منطقه ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر توسط طیف مرجع سفید و تیره نرمالیزه شدند (رابطه ۲). سپس میانگین هر ۵۰ طیف بازتابشی به ترتیب میانگین کلاس‌های WW-Y، MWS-Y، و SWS-Y برای ژنوتیپ یکتا و WW-N، MWS-N، و SWS-N برای ژنوتیپ ناز تک شاخه نامیده شدند. اطلاعات طیفی منطقه ۴۰۰-۵۰۰ نانومتر به دلیل کم بودن شدت نور لامپ‌های هالوژن در این ناحیه و بنابراین نسبت سیگنال به نویز (SNR) بسیار پایین، حذف شدند. بنابراین، تنها اطلاعات طیفی منطقه ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر در تحلیل‌ها استفاده شد.

در پژوهش حاضر، روابط بین میانگین سه باند از طیف بازتابشی برگ شامل: سبز (۵۲۰ تا ۵۶۵ نانومتر)، قرمز (۵۸۰ تا ۷۶۰ نانومتر) و مادون قرمز نزدیک (۷۶۰ تا ۹۰۰ نانومتر) با

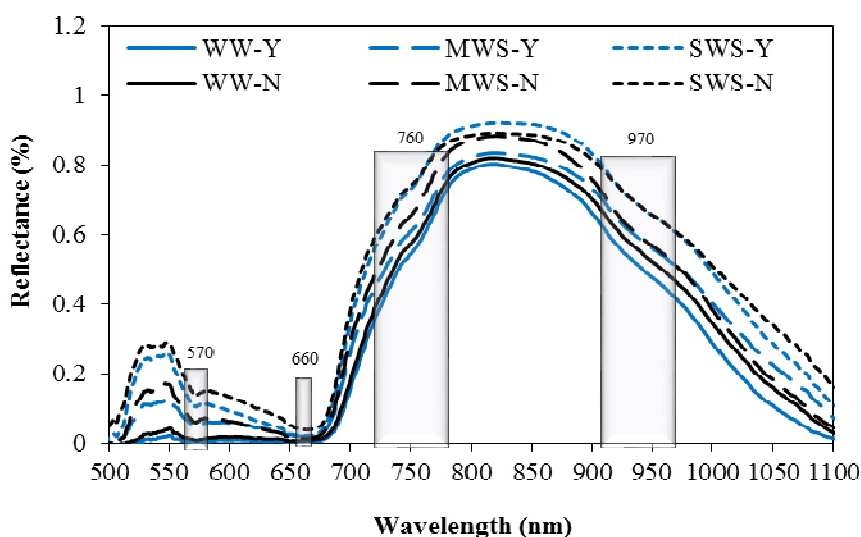
$$R_{\text{relative}} = \left[\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{dark}}}{R_{\text{reference}} - R_{\text{dark}}} \right] \quad (2)$$

که در آن R_{sample} طیف بازتابشی دریافت شده از نمونه است. اندازه‌گیری دو طیف مرجع سفید و تیره هر یک ساعت یکبار تکرار شد تا تأثیر تغییرات دمایی دمایی منبع نور و سخت افزار طیف‌سنج روی اندازه‌گیری‌ها به حداقل برسد.

قبل از استفاده از مناطق مؤثر از طیف و ساختن شاخص‌های طیفی، پیش پردازش‌هایی روی داده‌های طیفی اجرا شد که عبارت بودند از: (۱) یکنواخت سازی. در طیف NIR معمولاً "برای از بین بردن نویزهای تصادفی و بهبود نسبت سیگنال به نویز از روش یکنواخت سازی استفاده می‌شود. یکی از الگوریتم‌های مناسب برای یکنواخت کردن طیف، الگوریتم ساویتسکی - گولای (Savitzky-Golay Algorithm) است. (۲) نرمالیزه کردن. ویژگی‌ها در کاربردهای مختلف، بازه تغییرات متفاوتی دارند. به علاوه، مقادیر به دست آمده برای هر ویژگی به واحد اندازه‌گیری آن بستگی دارد. بنابراین جهت مقایسه داده‌ها، ابتدا لازم است که این ویژگی‌ها در یک مقیاس مشابه، نرمالیزه شده و سپس مورد مقایسه قرار گیرند. (۳) تصحیح پراکنش افزایشنده. روش تصحیح پراکنش افزایشنده، یکی از متداول‌ترین و مؤثرترین روش‌های پیش پردازش طیف است که برای تصحیح همزمان منتقل شدن نقطه‌ی شروع طیف و تغییرات ایجاد شده

جدول ۱. شاخص‌های بازتابشی استخراج شده از طیف برگ

شاخص‌های بازتابشی	واژه اختصاری	فرمول	پارامترهای بیولوژیکی قابل تخمین	مرجع
نسبت ساده ۱	SR	R _{NIR} /R _{Red}	زیست‌توده سبز	(۵, ۲۴)
شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده ۱	NDVI ₁ (800:680)	(R ₈₀₀ -R ₆₈₀)/(R ₈₀₀ +R ₆₈₀)	زیست‌توده سبز	(۸)
شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده ۲	NDVI ₂ (790:670)	(R ₇₉₀ -R ₆₇₀)/(R ₇₉₀ +R ₆₇₀)	زیست‌توده سبز	(۳)
شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده ۳	NDVI ₃ (790:550)	(R ₇₉₀ -R ₅₅₀)/(R ₇₉₀ +R ₅₅₀)	زیست‌توده سبز	(۳)
شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده لبه قرمز	NDVI _{RE}	(R ₇₅₀ -R ₇₀₅)/(R ₇₅₀ +R ₇₀₅)	زیست‌توده سبز	(۲۲)
لبه قرمز	λ _{RE}	طول موج شیب بیشینه در افزایش بازتابش از قرمز تا مادون قرمز نزدیک	کلروفیل	(۴)
نسبت ساده ۲	VOGREI	R ₇₄₀ /R ₇₂₀	کلروفیل	(۲۶)



شکل ۲. میانگین طیف بازتابشی برگ کنجد در شش کلاس WW-Y، MWS-Y، SWS-Y، WW-N، MWS-N، و SWS-N.

WW: بدون تنش؛ MWS: تنش متوسط؛ SWS: تنش شدید. N: ژنوتیپ ناز تک شاخ و Y: ژنوتیپ یکتا. (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در WW-N، MWS-N، SWS-N، WW-Y، MWS-Y، SWS-Y، و Y، تغییرات فیزیولوژیک ایجاد شده در گیاه، در نتیجه تیمارهای تنش آبی مختلف، منجر به تغییرات قابل توجهی در طیف‌های گرفته شده از گیاهان شد. تغییرات در طیف بازتابشی گرفته شده از برگ گیاه، در اثر تیمار تنش آبی، در مطالعات دیگران، نیز مشاهده شد (۹، ۱۵ و ۱۸). گزارش شده که تغییرات ایجاد شده در طیف بازتابشی در اثر تنش آبی

RWC تعیین شدند. ضمناً از داده‌های طیف Vis/NIR تهیه شده از برگ کنجد، نسبت‌ها و شاخص‌های طیفی مختلف (جدول ۱) استخراج و روابط آن‌ها با RWC برگ مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

تحلیل اولیه طیف Vis/NIR

میانگین هر ۵۰ طیف بازتابشی گرفته شده از تیمارهای WW-

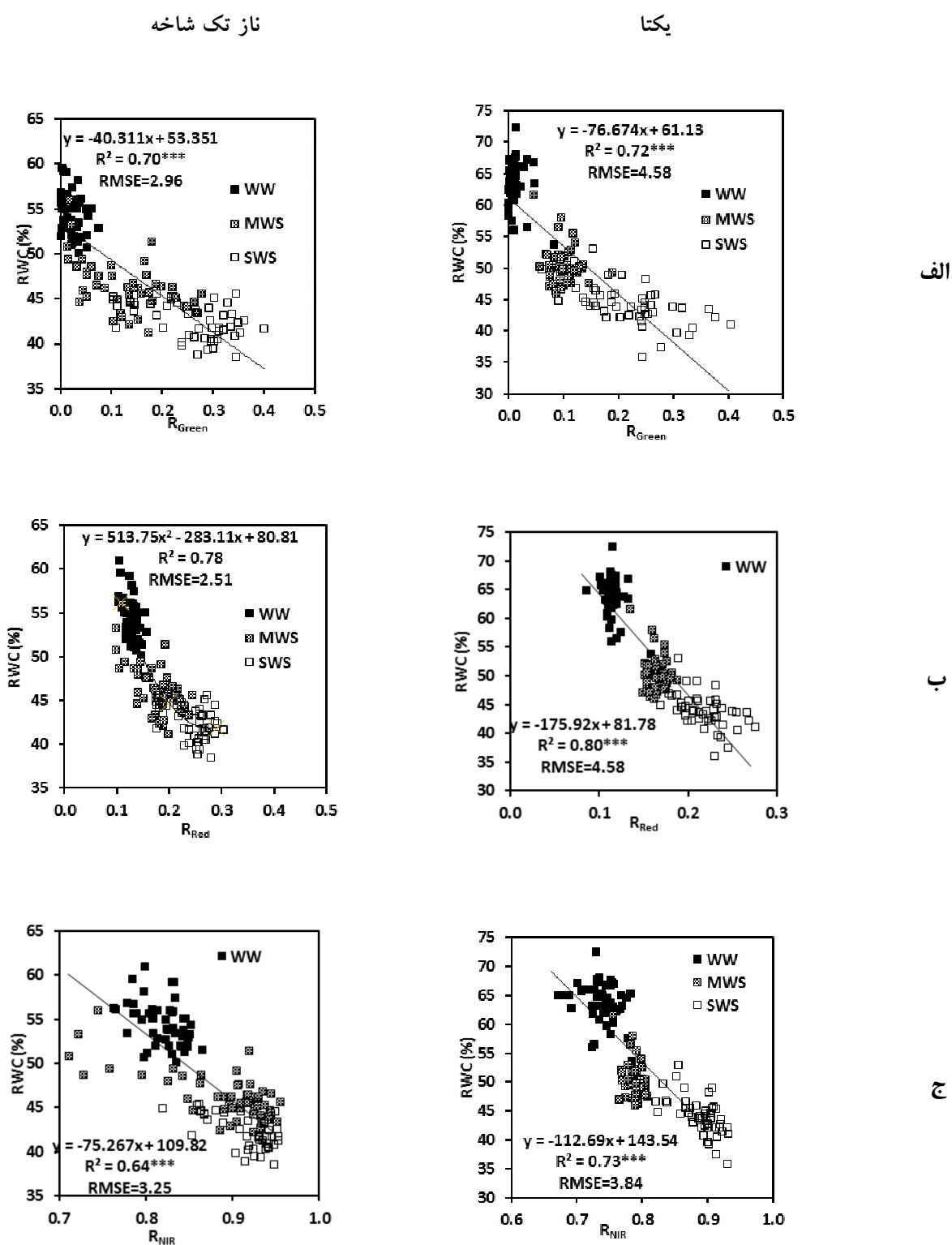
و SWS-N در پنج باند طیفی گزارش شده توسط سایر پژوهشگران (۱۲ و ۱۷) شامل: ۷۶۵-۷۵۵ (R₍₇₆₀₎)، ۹۶۵-۹۷۵ (R₍₉₇₀₎)، ۵۶۵-۵۲۰ (R_(Green))، ۷۶۰-۵۸۰ (R_(Red)) و ۹۰۰-۷۶۰ (R_(NIR)) با RWC در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزایش تنش آبی در گیاه، مقدار بازتابش در هر سه منطقه سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک افزایش یافت که موجب همبستگی RWC و درصد بازتابش در هر یک از این سه ناحیه شد (شکل ۳). پژوهشگران پیشین (۱۲ و ۲۹) نیز روابط معنی داری بین میانگین سه باند از طیف بازتابی برگ (ذکر شده در بالا) با RWC گزارش کردند. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای، محققین مشاهده کردند که با افزایش تنش آبی در گیاه ختمی چینی (*Hibiscus rosa-sinensis*)، بازتابش در دو منطقه طیفی سبز و قرمز افزایش می‌یابد (۲۱). در مطالعه‌ای دیگر، از تصویربرداری چندطیفی جهت بررسی شرایط آبی تاج درختان هلو و نارنگی استفاده شد. در این پژوهش نیز با افزایش تنش آبی، افزایش بازتابش در باندهای قرمز و سبز مشاهده شد (۱۲). برخلاف نتایج این پژوهش، در برخی پژوهش‌های دیگر، با افزایش تنش آبی، بازتابش در ناحیه سبز کاهش ولی در ناحیه قرمز افزایش یافت (۲۹). همچنین گزارش شده است که با افزایش تنش آبی، رابطه معنی داری بین باند R_{NIR} و RWC مشاهده نشد (۱۲). گزارش شده است که با افزایش تنش آبی، بازتابش در منطقه NIR کاهش می‌یابد (۸).

شکل ۳ نشان می‌دهد که طیف بازتابی Vis/NIR برگ ژنوتیپ یکتا در بخش‌های قرمز، سبز، مادون قرمز نزدیک و باندهای جذبی ۷۶۰ و ۹۷۰ در حالت WW به خوبی از دو حالت MWS و SWS تفکیک شده است. در حالی که این تفکیک در ژنوتیپ ناز تک شاخه مشاهده نمی‌شود. در کل مقایسه ضرایب تبیین برای ۵ منطقه سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک، ۷۶۰ و ۹۷۰ نانومتر برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه نشان می‌دهد که طیف بازتابی گرفته شده از برگ ژنوتیپ یکتا در این مناطق دارای قدرت بیشتری برای پیش‌بینی آب برگ در این ژنوتیپ است.

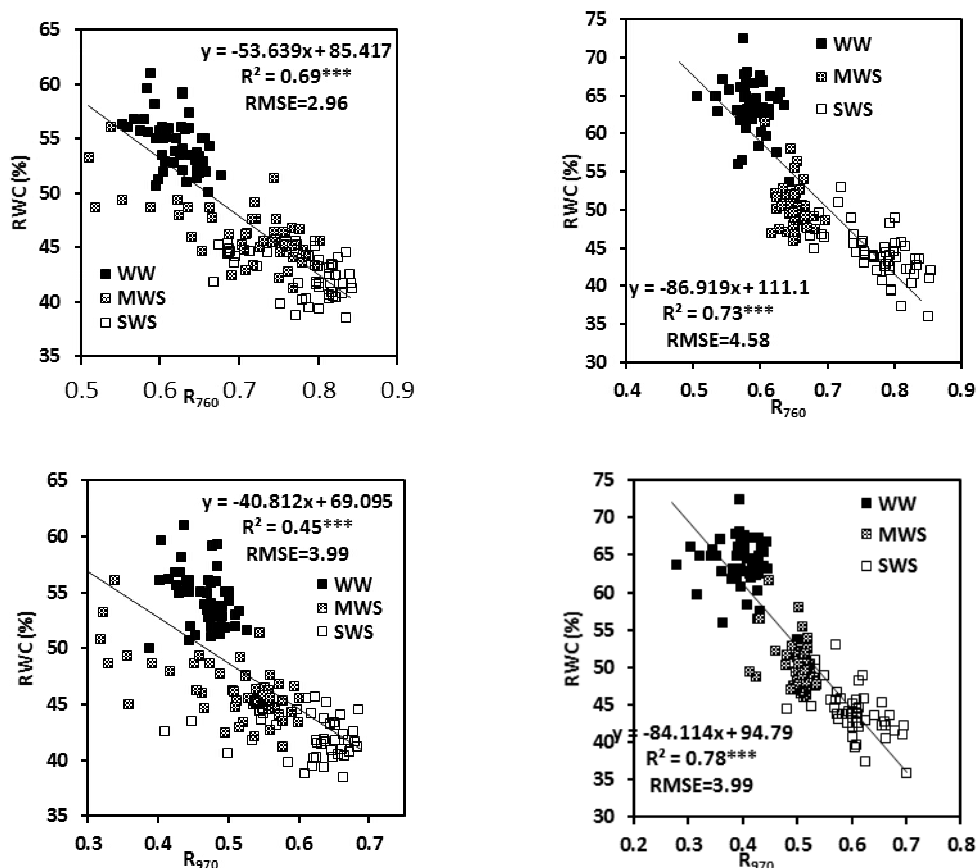
می‌تواند در نتیجه تغییر در ساختار و ترکیبات برگ شامل غلظت رنگدانه‌ها، ابعاد سلولی، ترکیبات و ساختار دیواره سلولی باشد (۱۶). نتایج حاصل از طیف بازتابی دریافت شده از برگ کنجد نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی، بازتابش نور در هر دو منطقه مرئی (۷۰۰-۵۰۰ نانومتر) و مادون قرمز نزدیک (۷۰۰-۱۱۰۰ نانومتر) برای هر دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه افزایش یافت. به طور کلی، این موضوع نشان‌دهنده رابطه بین طیف بازتابی و تنش آبی در برگ کنجد است. نتایج برخی مطالعات دیگر نشان می‌دهد که با افزایش تنش آبی در گیاه، مقدار بازتابش در منطقه مرئی افزایش می‌یابد که با نتایج به دست آمده در این تحقیق، همخوانی دارد (۱۶، ۱۷ و ۱۸). با افزایش تنش آبی، افزایش طیف بازتابی در محدود ۴۵۰ تا ۷۰۰ نانومتر توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (۲۱). پژوهشگران گزارش کردند که تحت تنش آبی، مقادیر بازتابش دریافتی از برگ گیاه گوجه در باندهای ۸۳۰-۶۹۰ و ۸۳۰-۱۰۰۰ نسبت به گیاه شاهد افزایش یافت (۳). افزایش در طیف بازتابی، در منطقه مادون قرمز نزدیک، نیز در این مطالعه مشاهده شد. مطالعات قبلی نشان داد که در اثر تنش آبی، یک فرورفتگی در طیف بازتابی در بین طول موج‌های ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر ایجاد می‌شود که عمق این فرورفتگی بر اساس سطح تنش آبی تغییر می‌کند (۹، ۱۷، ۲۵ و ۲۹). نتایج گزارش شده با نتایج به دست آمده در این مطالعه همخوانی دارد. فرورفتگی کوچک در اطراف طول موج ۹۷۰ نانومتر نشان دهنده طیف جذبی ناچیز آب در این ناحیه است. این تأثیرات در شکل ۲ قابل مشاهده هستند. محققین گزارش کردند که محتوای آب برگ تأثیر زیادی بر طیف بازتابی دریافت شده در طول موج ۹۷۰ نانومتر دارد (۲).

روابط بین نواحی طیفی مرئی - مادون قرمز نزدیک و محتوای رطوبت نسبی برگ

تغییرات میانگین نواحی طیف بازتابی برگ کنجد برای هر شش تیمار MWS-N، WW-N، SWS-Y، MWS-Y، WW-Y



شکل ۳. رابطه بین RWC و درصد بازتابش در باندهای طیفی استخراج شده از طیف بازتابشی برگ شامل باند طیفی: (الف) ۵۲۰-۵۶۵ (R_{Green})، (ب) ۵۸۰-۷۶۰ (R_{Red})، (ج) ۷۶۰-۹۰۰ (R_{NIR})، (د) ۷۶۵-۷۵۵ (R₇₆₀) و (ه) ۹۶۵-۹۷۵ نانومتر



ادامه شکل ۳.

RWC برگ کنگد در هر دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه نشان دادند، ولی مقایسه این دو باند جذبی آب نشان داد که منطقه ۷۶۰ نانومتر با ضرایب تبیین 0.73 و 0.69 و $RMSE$ ، 4.58 و 2.96 به ترتیب برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه، نتایج بهتری را برای پیش‌بینی RWC برگ نسبت به 970 نانومتر ارائه کردند. گرچه منطقه 970 نانومتر هم نتایج تقریباً مشابهی برای پیش‌بینی RWC برگ ژنوتیپ یکتا با ضرایب تبیین 0.78 و 0.45 و $RMSE$ ، 3.99 ارائه کرد. مشاهدات گلخانه‌ای نشان داد که تحت تنش شدید، برگ‌ها در ژنوتیپ ناز تک شاخه دچار پژمردگی شدیدتری نسبت به ژنوتیپ یکتا شدند. دلیل ارتباط ضعیف‌تر این باند جذبی با RWC برای ژنوتیپ ناز تک شاخه احتمالاً می‌تواند در اثر تغییر در ساختار برگ تحت تنش آبی شدید باشد (۱۶).

با مقایسه ۳ منطقه سبز، قرمز و مادون‌قرمز نزدیک در شکل ۳ می‌توان دریافت که منطقه قرمز با ضرایب تبیین 0.78 و 0.73 و $RMSE$ ، 3.99 و 4.58 به ترتیب برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه، بهترین نتایج را برای پیش‌بینی RWC برگ ارائه دادند (شکل ۳-ب). رابطه RWC با طیف گرفته شده از منطقه قرمز به صورت یک رابطه درجه دو است. از طرف دیگر، دو منطقه سبز با ضرایب تبیین 0.72 و 0.70 و $RMSE$ ، 4.58 و 2.96 و مادون‌قرمز نزدیک با ضرایب تبیین 0.73 و 0.64 و $RMSE$ ، 3.99 و 3.84 برای تخمین RWC برگ برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه، اندکی ضعیف‌تر عمل کردند (شکل ۳-الف و ج).

اگر چه دو باند جذبی 760 و 970 نانومتر که مربوط به جذب توسط پیوند O-H هستند، روابط خطی معنی‌داری با

شاخص‌های سبزی‌نگی استخراج شده از برگ چغندر قند را با خصوصیات فیزولوژیک این گیاه گزارش کردند (۹).

رابطه SR (نسبت درصد بازتابش در منطقه مادون قرمز نزدیک به منطقه قرمز)، لاندای (λ_{RE}) و نسبت VOGREI (جدول ۱) با RWC در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت SR با RWC دارای رابطه معنی‌دار با ضرایب تبیین ۰/۸۴ و ۰/۷۶ درصد و RMSE، ۳/۴۰ و ۲/۶۶ به ترتیب برای ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه است. این رابطه دارای شیب منفی است، یعنی با افزایش تنش آبی، این نسبت کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش تنش آبی، مقدار افزایش بازتابش در منطقه NIR نسبت به افزایش بازتابش در منطقه قرمز کمتر است که نشان‌دهنده تغییرات شدیدتر بازتابش برگ کنگد در منطقه طیف مرئی قرمز است. کاهش نسبت SR، با افزایش تنش آبی توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (۸ و ۱۰).

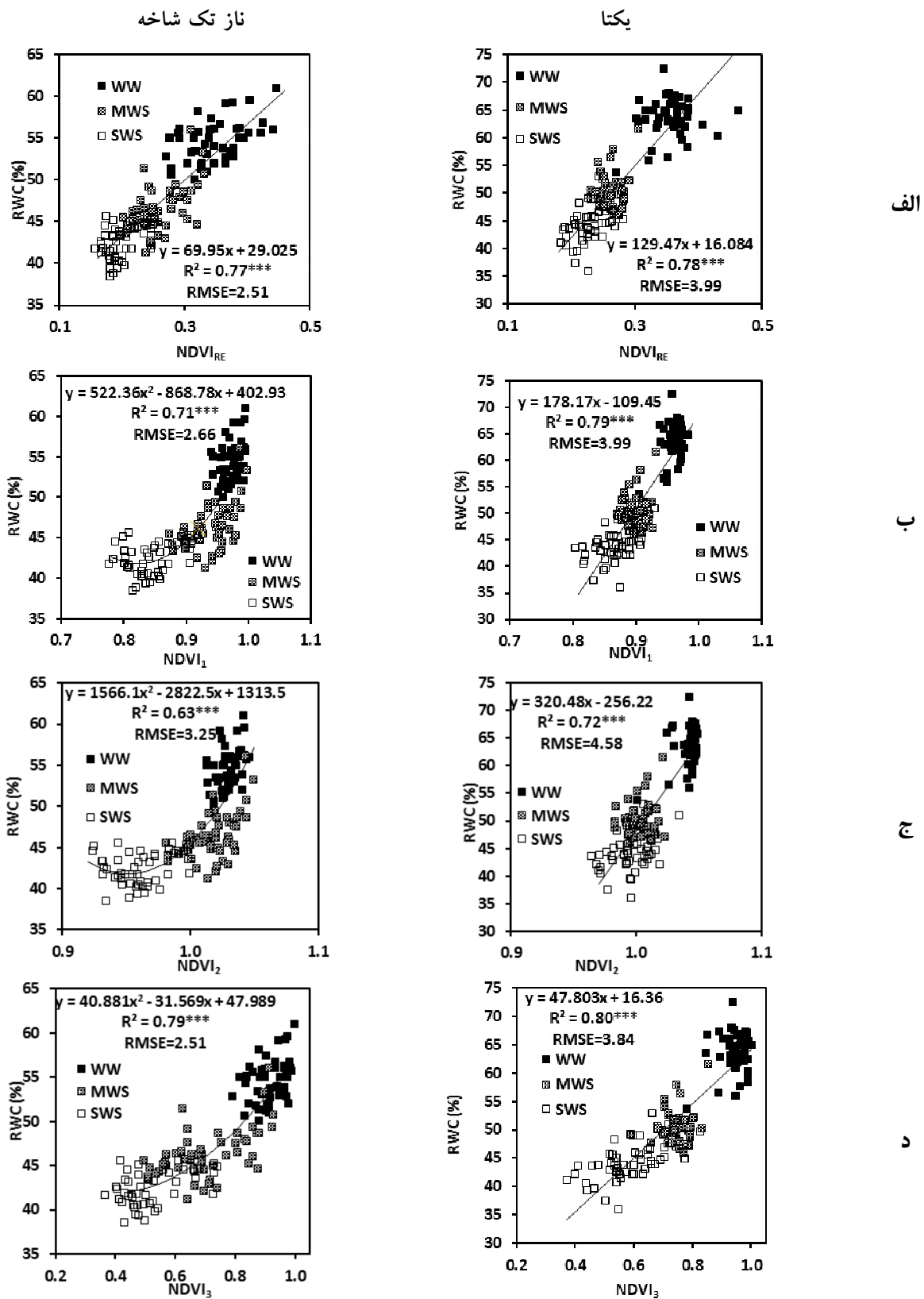
λ_{RE} نشان‌دهنده طول موجی است که در آن شیب بیشینه لبه قرمز اتفاق می‌افتد. شکل ۵-ب نشان می‌دهد که λ_{RE} با افزایش تنش آبی برای هر دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه به سمت طول موج‌های کوچک‌تر حرکت می‌کند. به این صورت که در حالت WW شیب بیشینه لبه قرمز در طول موج‌های ۷۰۰ تا ۷۱۰ نانومتر اتفاق افتاده است، ولی با افزایش تنش آبی، این شیب به سمت طول موج ۶۹۰ نانومتر تغییر مکان پیدا می‌کند.

شکل ۵-ج نشان‌دهنده رابطه معنی‌دار بین RWC و VOGREI با ضرایب تبیین ۰/۷۹ و ۰/۷۷ و RMSE، ۳/۸۴ و ۲/۵۱ به ترتیب برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه است. نسبت VOGREI نشان‌دهنده شیب لبه قرمز طیف بازتابشی برگ در منطقه ۷۲۰ تا ۷۴۰ نانومتر است. با توجه به شیب منفی منحنی شکل ۵-ج، می‌توان دریافت که با افزایش تنش آبی، شیب لبه قرمز، در منطقه ۷۲۰ تا ۷۴۰ نانومتر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. وجود رابطه معنی‌دار بین تنش آبی گیاه و این شاخص توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است (۱ و ۸). شکل ۵ نشان‌دهنده روابط قوی‌تر مابین نسبت‌های ذکر شده و RWC در ژنوتیپ یکتا نسبت به ناز تک شاخه است.

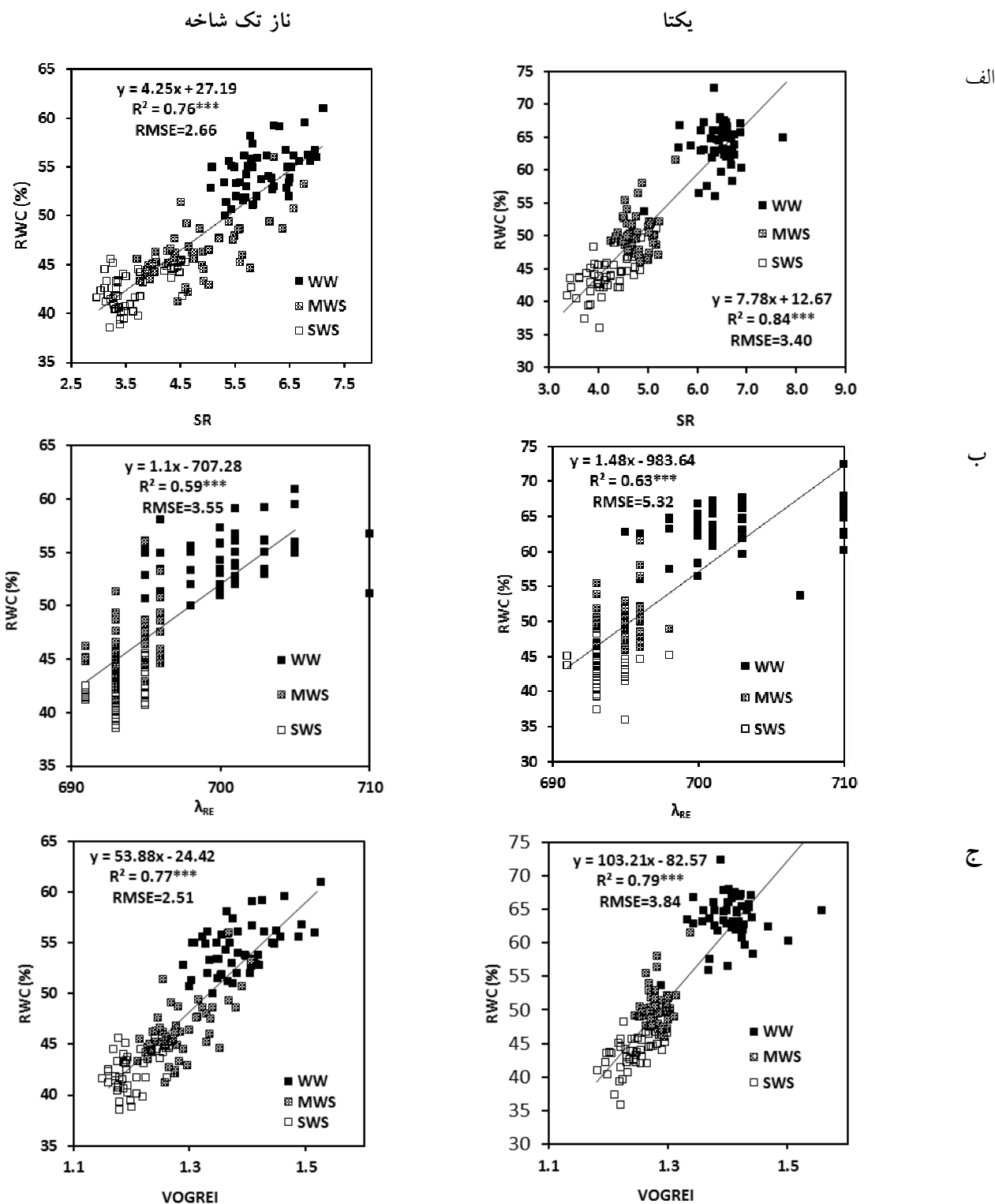
روابط بین شاخص‌های طیفی و محتوای رطوبت نسبی برگ روابط RWC با نسبت‌ها (SR) و شاخص‌های سبزی‌نگی (NDVI) استخراج شده از طیف بازتابشی برگ (جدول ۱) در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل‌های ۴ الف-د نشان می‌دهد که هر چهار شاخص سبزی‌نگی استخراج شده از بازتابش دریافت شده از برگ، به‌خوبی قادر به تخمین محتوای رطوبتی برگ هستند. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، هر ۴ شاخص سبزی‌نگی با افزایش تنش رابطه معکوس داشته و کاهش می‌یابند.

از آن میان شاخص $NDVI_3$ (۷۹۰:۵۵۰) دارای عملکرد بهتر و ضرایب تبیین بیشتری (برای ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۹) و RMSE کمتر (به ترتیب برابر ۳/۸۴ و ۲/۵۱) با RWC است (شکل ۴-د). سه شاخص $NDVI_{RE}$ ، $NDVI_1$ (۸۰۰:۶۸۰) و $NDVI_2$ (۷۹۰:۶۷۰) نیز به ترتیب دارای ضرایب تبیین ۰/۷۸، ۰/۷۹ و ۰/۷۲ برای ژنوتیپ یکتا و ۰/۷۷، ۰/۷۱ و ۰/۶۳ برای ژنوتیپ ناز تک شاخه بود. گزارش شده است که شاخص‌های $NDVI_{RE}$ و $NDVI_1$ (۸۰۰:۶۸۰) استخراج شده از تصاویر ابرطیفی درخت سیب، دارای روابط معنی‌دار با تنش آبی هستند که ضریب همبستگی بیشتر (برابر ۰/۹۴) مربوط به شاخص $NDVI_{RE}$ بود (۸). پژوهشگران دیگر نیز نشان دادند که با افزایش تنش آبی، شاخص (۷۹۰:۶۷۰) $NDVI_2$ نسبت به تیمار شاهد به شدت کاهش می‌یابد. کاهش شاخص (۸۰۰:۶۸۰) $NDVI_1$ با افزایش تنش آبی، نیز توسط سایر محققان گزارش شده است (۹). به‌علاوه، قدرت بیشتر شاخص $NDVI_{RE}$ به‌عنوان یک شاخص با پهنای باند باریک‌تر نسبت به شاخص‌های پهنای باند بیش‌تر، برای تخمین شرایط آبی گیاه، در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (۸).

شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که روابط بین شاخص‌های $NDVI_1$ ، $NDVI_2$ و $NDVI_3$ با RWC برگ در ژنوتیپ ناز تک شاخه به‌صورت درجه دوم، به ترتیب با ضرایب تبیین ۰/۷۱، ۰/۶۳ و ۰/۷۹ و RMSE، ۲/۶۶، ۳/۲۵ و ۲/۵۱ تخمین زده شده است. پژوهشگران وجود رابطه درجه دوم میان برخی



شکل ۴. رابطه RWC و شاخص‌های: (الف) (NDVI_{RE} (RE NDVI (۷۵۰:۷۰۵))، (ب) (NDVI₁ (۸۰۰:۶۸۰))، (ج) (NDVI₂ (۷۹۰:۶۷۰)) و (د) (NDVI₃ (۷۹۰:۵۵۰)) برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه.



شکل ۵. رابطه RWC با (الف) نسبت SR، (ب) λ_{RE} و (ج) VOGREI برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه.

نتیجه گیری کلی

روش سریع، تاحدی دقیق و غیرمخرب برای تشخیص شرایط آبی گیاه کنجد و همچنین تخمین محتوای رطوبت نسبی

این مطالعه نشان داد طیفسنجی مرئی- مادون قرمز نزدیک یک

مقاوم و حساس یکتا و ناز تک شاخه، تحت تنش آبی نشان داد که طیف بازتابشی مرئی مادون قرمز نزدیک، قادر به تفکیک بهتر سطوح تنش رطوبتی در ژنوتیپ یکتا نسبت به ناز تک شاخه است. روش ارائه شده در این مقاله یک دیدگاه تحلیلی از محتوای رطوبت نسبی در گیاه ارائه می‌دهد که می‌تواند برای توسعه‌ی ابزارهای قابل حمل برای تخمین غیر مخرب و سریع محتوای رطوبت نسبی و سایر پارامترهای بیوشیمیایی در گیاه، به‌طور همزمان استفاده شود و در نهایت می‌تواند منجر به برنامه ریزی کارآمدتر آبیاری در کشاورزی دقیق شود.

تشکر و سپاسگزاری

حمایت مالی از این پروژه (شماره ۹۵۸۳۵۲۷۱) توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) و دانشگاه صنعتی اصفهان تامین شده است که سپاسگزاری خود را از آنها اعلام می‌داریم.

(RWC) برگ برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه است. با افزایش تنش آبی در گیاه کنگد، طیف بازتابشی در هر دو منطقه مرئی (۷۰۰-۵۰۰ نانومتر) و مادون قرمز نزدیک (۱۱۰۰-۷۰۰ نانومتر) برای هر دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه افزایش یافت. در منطقه مرئی، بازتابش دریافت شده از برگ ژنوتیپ ناز تک شاخه تحت هر سه تیمار آبیاری، بیشتر از بازتابش دریافت شده از برگ ژنوتیپ یکتا بود. در منطقه مادون قرمز نزدیک، نیز بازتابش دریافت شده از برگ ژنوتیپ ناز تک شاخه در شرایط WW، MWS و SWS به ترتیب، بیشتر، بیشتر و کمتر از بازتابش دریافت شده از برگ ژنوتیپ یکتا بود. با مقایسه ۳ منطقه سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک مشخص شد که منطقه قرمز بهترین نتایج را برای پیش‌بینی RWC برگ برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه ارائه دادند. RWC با شاخص‌های سبزیگی استخراج شده از طیف بازتابشی برگ کنگد نیز دارای رابطه قوی و معنی‌داری ($p < 0.001$) بود. از آن میان، بهترین شاخص سبزیگی برای پیش‌بینی RWC برای دو ژنوتیپ یکتا و ناز تک شاخه، شاخص $NDVI_3$ (۷۹۰:۵۵۰) بود. مقایسه دو ژنوتیپ

منابع مورد استفاده

- Amatya, S., M. Karkee, A. K. Alva, P. Larbi and B. Adhikari. 2012. Hyperspectral imaging for detecting water stress in potatoes. American Society of Agricultural and Biological Engineers Conference: Dallas, Texas, USA, July 29 - August 1, 2012. Paper Number: 12-1345197.
- Danson, F. M., M. D. Steven, T. J. Malthus and J. A. Clark. 1992. High-spectral resolution data for determining leaf water content. *International Journal of Remote Sensing* 13: 61-70.
- Elvanidi, A., N. Katsoulas, K. P. Bartzanas and C. Kittas. 2017. Crop water status assessment in controlled environment using crop reflectance and temperature measurements. *Precision Agriculture* 18: 332-349.
- Filella, I. and J. Penuelas. 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing* 15: 1459-1470.
- Gamon, J. A., C. B. Field, M. L. Goulden, K. L. Griffin, A. E. Hartley, G. Joel, J. Penuelas and R. Valentini. 1995. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three californian vegetation types. *Ecological Applications* 5: 28-41.
- Jones, H. G. and F. Schofield. 2008. Thermal and other remote sensing of plant stress. *General and Applied Plant Physiology* 34: 19-32.
- Khorsandi, A. 2019. Detection of drought and salinity stresses in two sesame genotypes using thermal infrared imaging and visible-near infrared spectroscopy methods. Ph.D. dissertation. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Farsi).
- Kim, Y., D. M. Glenn, J. Park, H. K. Ngugi and B. L. Lehman. 2011. Hyperspectral image analysis for water stress detection of apple trees. *Computers and Electronics in Agriculture* 77: 155-160.
- Koksal, E. S. 2011. Hyperspectral Reflectance Data processing through cluster and principal component analysis for estimating irrigation and yield related indicators. *Agricultural Water Management* 98: 1317-1328.
- Koksal, E. S., Y. Gungor and Y. E. Yildirim. 2011. Spectral reflectance characteristics of sugar beet under different levels of irrigation water and relationships between growth parameters and spectral indexes. *Irrigation and*

Drainage 60: 187-195.

11. Kramer, P. J. and J. S. Boyer. 1995. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press. San Diego.
12. Kriston-Vizi, J., M. Umeda and K. Miyamoto. 2008. Assessment of the water status of mandarin and peach canopies using visible multispectral imagery. *Biosystems Engineering* 100: 338-345.
13. Lin, C., S. C. Popescu, S. C. Huang, P. T. Chang and H. L. Wen. 2015. A novel reflectance-based model for evaluating chlorophyll concentrations of fresh and water-stressed leaves. *Biogeosciences* 12: 49-66.
14. Ling, P. P., G. A. Giacomelli and T. Russell. 1996. Monitoring of plant development in controlled environment with machine vision. *Advances in Space Research* 18: 101-112.
15. Penuelas, J., I. Filella, C. Biel, L. Serrano and R. Save. 1993. The Reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote sensing* 14: 1887-1905.
16. Penuelas, J., J. A. Gamon, A. L. Fredeen, J. Merino and C. B. Field. 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment* 48: 135-146.
17. Penuelas, J., J. Pinol, R. Ogaya and I. Filella. 1997. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing* 18: 2869-2875.
18. Rollin, E. M. and E. J. Milton. 1998. Processing of high spectral resolution reflectance data for the retrieval of canopy water content information. *Remote Sensing of Environment* 65: 86-92.
19. Schlemmer, M. R., D. D. Francis, J. F. Shanahan and J. S. Schepers. 2005. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agronomy Journal* 97: 106-112.
20. Seyyedjan Jasbi, M. and P. Ehsanzadeh. 2014. Evaluation of physiological characteristics related to water deficit in some genotypes of sesame (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science* 44: 575-583. (In Farsi).
21. Shimada, S., E. Funatsuka, M. Ooda, M. Takyu, T. Fujikawa and H. Toyoda. 2012. Developing the monitoring method for plant water stress using spectral reflectance measurement. *Journal of Arid Land Studies* 22: 251-254.
22. Sims, D. A. and J. A. Gamon. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81: 337-354.
23. Smart, R. E. and G. E. Bingham. 1974. Rapid estimates of relative water content. *Plant physiology* 53: 258-260.
24. Tucker, C. J. 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment* 10: 23-32.
25. Ustin, S. L., D. Riano and E. R. Hunt. 2012. Estimating canopy water content from spectroscopy. *Israel Journal of Plant Sciences* 60: 9-23.
26. Vogelmann, J. E., B. N. Rock and D. N. Moss. 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *Remote Sensing* 14: 1563-1575.
27. Workman Jr, J. 2000. *The Handbook of Organic Compounds, Three-Volume Set: NIR, IR, R, and UV-Vis Spectra Featuring Polymers and Surfactants*. Academic Press. Manchester.
28. Yousefzadeh Najafabadi, M. and P. Ehsanzadeh. 2017. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. *Photosynthetica* 55: 11-22.
29. Zhang, Q., Q. Li and G. Zhang. 2012. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection. *Spectroscopy* 27: 93-105.
30. Zia, S., G. Romano, W. Spreer, C. Sanchez, J. Cairns, J. L. Araus and J. Muller. 2013. Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199: 75-84.

Determination of Leaf Relative Water Content of Two Genotypes of Sesame Using Visible and Near- Infrared (VIS/NIR) Spectrometry to Detect Drought Stress

A. Khorsandi¹, A. Hemmat^{2*}, S. A. Mireei³, P. Ehsanzadeh⁴ and R. Amirfattahi⁵

(Received: February 20-2022; Accepted: April 06-2022)

Abstract

Relative water content (RWC) in plants is one of the most important biochemical parameters and its deficiency limits efficiency of photosynthesis and crop productivity. The scientific reports on using spectroscopy in detecting drought stress for sesame plants are very rare. In this study, the possibility of identifying water stress in two sensitive (Naz-Takshakhe) and resistant (Yekta) genotypes by predicting the RWC in sesame plants under water-stressed conditions using spectral indices was investigated. The developed spectral indices in the form of the ratio/difference of the reflectance derived from the leaf diffuse reflectance spectra, limited to the Visible-Near Infrared (Vis/NIR) region (400–1100 nm), were used. One hundred and fifty pots from each of the two genotypes were randomly divided into three equal groups. Pots were irrigated at soil water potential of -0.1 MPa (well-watered), -1.0 MPa (moderate-water stressed), and -1.5 MPa (severe-water stressed). The Vis/NIR spectra were then obtained from the leaves of each pot. Leaf RWC was also measured. In most cases, linear relationships between the RWC and the means of the three band reflectance spectra including: green (520 to 565 nm), red (580-760 nm) and near-infrared (760 to 900 nm), as well as normalized difference vegetation indices (NDVIs), and spectral ratios (SRs) extracted from the reflectance spectra were obtained. The results showed that the mean reflection of the red zone with the coefficients of determination of 0.80 and 0.78 and RMSE of 4.58 and 2.51, $NDVI_3$ with the coefficients of determination of 0.80 and 0.79 and RMSE of 3.84 and 2.51, and also, SR with the coefficients of determination of 0.84 and 0.76 and RMSE of 3.40 and 2.66 for both “Yekta” and “Naz-Takshakhe” genotypes, respectively, provided the best results for predicting the RWC of the leaves. Therefore, the Vis/NIR spectroscopy is a fast, somewhat accurate and non-destructive method for detecting sesame water conditions. Under water-stressed conditions, more severe changes in the RWC of the “Yekta” genotype compared to “Naz-Takshakhe”, led to better performance of the reflectance spectral indices in estimating the RWC of the leaf in this genotype. The presented results can lead to the development of a reliable and portable tool for rapid and non-destructive detection of RWC of the sesame leaves.

Keywords: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Simple Ratio (SR), Water stress, Vis/NIR Spectroscopy, Diffuse Reflectance spectrum

1, 2 and 3. PhD Graduate, Professor and Associate Professor, Respectively, Department of Biosystems Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

4. Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

5. Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: ahemmat@iut.ac.ir