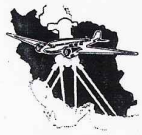
تفکر مکان محور برای پیشرفت جامعه

دومین همایش بین‌المللی تهیه نقشه و اطلاعات مکانی
و نوزدهمین همایش ملی ژئوماتیک



سازمان نقشه‌برداری کشور

محققین ارجمند:

مجتبی جنتی، محمدجواد ولدان‌زوج، علی محمدزاده، شهناز ضعیم و علیرضا صفدری‌نژاد

بدین‌وسیله از حضور ارزنده شما و ارائه مقاله تحت‌عنوان: "بررسی روش‌های آشکارسازی، تشخیص و تعیین میزان تنش‌های زیستی و فیزولوژیک گیاهان با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور" به صورت پوستری در **نوزدهمین همایش ملی ژئوماتیک ۹۱** تشکر و قدردانی می‌گردد.

از درگاه خداوند سبحان سلامتی، سعادت، و توفیق روزافزون برایتان آرزومندیم.

و من ا. . . التوفیق

هادی واعظی

معاون فنی سازمان نقشه برداری کشور

و

دبیر کل همایش

تذهیب Y 117 ، اثر محمدرضا هنرور، حق چاپ برای انتشارات یساولی محفوظ است.

بررسی روش‌های آشکارسازی، تشخیص و تعیین میزان تنش‌های زیستی و فیزولوژیک گیاهان با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور

مجتبی جنتی[1]، محمدجواد ولدان‌زوج[2]، علی محمدزاده[3]، شهناز نخبه زعیم[4]، علیرضا صفدری‌نژاد[5]

۱. دانشجوی کارشناس‌ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
m.jannati@sina.kntu.ac.ir

۲. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
valadanzouj@kntu.ac.ir

۳. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
almoh2@gmail.com

۴. دانشجوی کارشناس‌ارشد مهندسی فتوگرامتری، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
sh_zaiem@yahoo.com

۵. کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
safdari_nezhad@sina.kntu.ac.ir

چکیده

محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین منابع تامین کننده مواد اولیه مورد نیاز بشر در بخش‌های مختلف به حساب می‌آید و پیشرفت کشورها در این زمینه، یکی از معیارهای مهم ارزیابی سطح توسعه یافتگی تلقی می‌گردد. از سوی دیگر، افزون بر تامین نیاز داخلی، مشارکت مفید و موثر در بازارهای جهانی یکی از مهم‌ترین اهداف بخش‌های فعال در عرصه اقتصادی است که پیش‌نیاز آن کاهش هزینه‌های بخش تولید است. یکی از سنگین‌ترین هزینه‌های بخش کشاورزی مواجهه محصول با انواع تنش‌ها است، که در صورت عدم‌شناسایی و مقابله به هنگام، لطمات جبران‌ناپذیری به دنبال خواهدداشت. سنجش از دور به عنوان یک ابزار مطالعات محیطی با قابلیت‌های منحصر به فردی نظیر سرعت و دقت نسبی بالا و هزینه نسبتا پایین در قیاس با روش‌های سنتی، توانایی خود را به اثبات رسانیده است؛ به گونه‌ای که با استفاده از این تکنیک، افزون بر آشکارسازی وجود تنش، می‌توان به تشخیص نوع تنش و حتی برآورد مقدار کمی آن پرداخت. در مقاله حاضر با توجه به اهمیت موضوع، به بررسی روش‌های مختلف آشکارسازی، تشخیص و تعیین کمی تنش‌های زیستی و فیزیولوژیک گیاهان پرداخته شده است.

کلیدواژه: تنش گیاهی، سنجش از دور، شاخص گیاهی، تصویربرداری حرارتی، تصویربرداری فلوئورسانس

۱- مقدمه

تصویربرداری روشی قدرتمند در آشکارسازی، تشخیص و تعیین میزان تنش‌های گیاهی است [۳-۱]. در طبیعت تنش‌های بی‌شماری وجود دارد که سلامت گیاه را متاثر می‌سازد؛ روش‌های متنوعی هم برای آشکارسازی این تنش‌ها با استفاده از تصاویر سنجش از دور توسعه یافته است. در واقع تصویری از خود تنش اخذ نمی‌گردد، و آنچه بررسی می‌شود پاسخ گیاه به تنش است. به عنوان مثال، روزنه‌های تنفسی سطح برگ را با تاثیری که بر دمای برگ می‌گذارد می‌توان مطالعه نمود، اما باید به یاد داشت که این پاسخ ممکن است از طیف وسیعی از تنش‌های دیگر نظیر کم‌آبی، غرق‌آبی، شوری خاک، سموم معدنی و یا آلودگی نیز ناشی شود. از سوی دیگر، لازم به یادآوری است که هر تنش می‌تواند بیش از

یک تاثیر بر گیاه بگذارد [۳]. برای مثال، کم‌آبی نه تنها موجب انسداد روزنه‌های تنفسی می‌شود، بلکه آهنگ فتوسنتز گیاه را هم کاهش می‌دهد، که موجب کاهش رشد گیاه و پژمرده شدن برگ‌ها شده و می‌تواند سبب تخریب رنگ‌دانه‌های اصلی نظیر سبزینه شود. تمامی این پاسخ‌ها به طور مجزا قابل‌شناسایی است. از این روی، به نظر می‌رسد بتوان تنش‌های مختلف را با استفاده از تصاویر اخذ شده از گیاه از هم تمییز داد.

جدول ۱: نمونه‌ای از تنش‌های گیاهی معمول، پاسخ و سیستم تصویربرداری موثر در آشکارسازی آنها [۳]

تنش‌ها	پاسخ‌ها (سیستم تصویربرداری)
بیماری‌های فیزیولوژیکی	
کم‌آبی	افت تبخیر (حرارتی)، تغییرات تنفسی (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، تغییر محتوای سبزینه (بازتابی، فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)، زاویه برگ (چند زاویه‌ای)
شوری	افت تبخیر (حرارتی)، مشکلات تنفسی (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)، زاویه برگ (چند زاویه‌ای)
غرق‌آبی	افت تبخیر (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، تغییر محتوای سبزینه (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)، زاویه برگ (چند زاویه‌ای)
تابش نور/ فرابنفش	تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، تغییر محتوای سبزینه (بازتابی، فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)، زاویه برگ (چند زاویه‌ای)
تنش حرارتی	افت تبخیر (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)
آلودگی	افت تبخیر (حرارتی)، مشکلات تنفسی (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، تغییر محتوای سبزینه (بازتابی، فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)
سموم معدنی	افت تبخیر (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، تغییر محتوای سبزینه (بازتابی، فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)
تنش‌های زیستی	
بیماری‌ها	افت تبخیر (حرارتی)، مشکلات تنفسی (حرارتی)، تغییر در میزان فتوسنتز (فلوئورسانس)، تغییر محتوای سبزینه (بازتابی، فلوئورسانس)، رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییرات بیوشیمی نظیر رادیکال‌های آزاد (فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)، زاویه برگ (چند زاویه‌ای)
آفات	رنگدانه‌های دیگر (بازتابی، فلوئورسانس)، تغییر در رشد گیاه (بازتابی، چند زاویه‌ای)، زاویه برگ (چند زاویه‌ای)

نکته مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد این است که بسیاری از تنش‌ها، پاسخ‌های (علائم) مشابهی دارند؛ بنابراین تشخیص تنشِ علت[۱]، تنها با استفاده از یک پاسخ (علامت) کار دشواری است. با توجه به اهمیتی که تشخیص نوع تنش و میزان رخداد آنها دارد، در این مقاله به معرفی روش‌هایی پرداخته می‌شود که برای استفاده از روش‌های تصویربرداری در مطالعه تنش‌های گیاهی، کاربردهای مدیریت محصول، و به ویژه در کشاورزی دقیق[۲] در دسترس است.

در بخش حاضر، مقدمه‌ای درباره استفاده از داده‌های سنجش از دوری در تشخیص تنش‌های گیاهی ارائه شد. در بخش دوم، به تفکیک سیستم‌های تصویربرداری به بررسی روش‌های موثر در آشکارسازی و تشخیص انواع تنش‌های گیاهی پرداخته می‌شود. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بحث در بخش سوم ارائه خواهد شد. در پایان، در بخش چهارم نیز پیشنهاداتی در خصوص تحقیقات آتی در این زمینه ارائه می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

معمولا هر روش تصویربرداری در دسترس تنها برای مطالعه علائم خاصی مناسب است. بنابراین، ابهامی که در نتیجه چند علتی بودن هر علامت خاص ایجاد می‌شود، بیشتر از ابهام مربوط به مرحله ثبت علائم (اخذ تصویر ماهواره‌ای) است [۳]. در ادامه، به تفکیک سیستم‌های تصویربرداری به بررسی روش‌های موثر در آشکارسازی و تشخیص انواع تنش‌های گیاهی پرداخته می‌شود.

۲-۱- تصویربرداری حرارتی

تصویربرداری حرارتی اساسا در مطالعات مرتبط با آب گیاه [۴]، و به ویژه توان تعرق گیاه [۵] مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که کم‌آبی یکی از مهمترین تنش‌های فیزیولوژیک گیاه محسوب می‌شود و مستقیما بر سلامتی گیاه و میزان محصول تاثیرگذار است، مطالعات زیادی با هدف آشکارسازی و تعیین کمی تاثیر کم‌آبی بر گیاه صورت پذیرفته است. اغلب مطالعات صورت پذیرفته در این حوزه بر توسعه شاخص‌های مرتبط با تنش‌های آبی نظیر SDD[۳]، CWSI[۴]، CTV[۵]، LWCI[۶]، WDI[۷]، WI[۸]، NDWI[۹] و fWBI[۱۰] تاکید دارند [۹-۴]. تمامی این شاخص‌ها براساس طول‌موج‌های متفاوت حساس به آب طیف الکترومگنتیک تعریف شده‌اند. معمولا از باندهای طیفی ۹۷۰-۹۵۰، ۱۲۶۰-۱۱۵۰، ۱۴۵۰ و ۲۲۵۰-۱۹۵۰ نانومتر در برآورد محتوای آب گیاه استفاده می‌شود (جدول ۲) [۴].

جدول ۲: نمونه ای از شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در تشخیص تنش آبی گیاه

شاخص	رابطه	شرح مختصر
CWSI	$CWSI = (T_{canopy} - T_{nws})/(T_{\max} - T_{nws})$	این شاخص معیاری از بازبودن روزنه‌های تنفسی برگ است و در تعیین نیاز آبی گیاه مورد استفاده دارد [۷].
LWCI	$LWCI = \frac{-\log[1-(NIR_{TM4} - MidIR_{TM5})]}{-\log[1-(NIR_{TM4_{fit}} - MidIR_{TM5_{fit}})]}$	این شاخص برای ارزیابی تنش آبی برگ گیاه و براساس دو باند جذبی و غیرجذبی سنجنده TM طراحی شده است [۹].
WDI	$WDI = 1 - \frac{E_a}{E_o}$	این شاخص به منظور تعیین میزان رطوبت خاک طراحی شده است [۸].
WI	$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$	در محتوای آبی زیاد، این شاخص به شدت به محتوای آب گیاه وابسته است [۴].
NDWI	$NDWI = \frac{R_{850} - R_{1240}}{R_{850} + R_{1240}}$	این شاخص برای برآورد میزان آب مایع گیاه طراحی شده است [۶].
fWBI	$fWBI = \frac{R_{900}}{\min(R_{930} - R_{980})}$	طول موج کمینه جذب آب به هنگام بروز تنش متغیر است، که عبارت مخرج کسر این مشکل را برطرف می‌نماید [۴].

متاسفانه این شاخص‌ها تنها به صورت غیرمستقیم یا تجربی با توان تعرق گیاه، که پارامتر کلیدی مرتبط کننده متغیرهای فیزیولوژیکی و محتوای آب گیاه است، در ارتباط هستند [۵]. اخیرا تلاش‌هایی در راستای استفاده از گرماسنجی فروسرخ[۱۱] و تصویربرداری حرارتی به منظور برآورد مستقیم توان تعرق گیاه صورت پذیرفته است [۵]. زیرا یکی از عوامل اصلی تعیین‌کننده دمای سطح برگ میزان تعرق از سطح برگ است [۳]. اثر سرمایشی تعرق از آنجا ناشی می‌شود که مقدار قابل‌توجهی انرژی (گرمای نهان تبخیر) برای تبخیر شدن آب مایع مورد نیاز است، و این انرژی از سطح برگ گرفته می‌شود. در موارد نادری ممکن است دمای سطح برگ از عوامل دیگری نیز تاثیر پذیرد. به عنوان مثال، گرمایی که در اثر انجماد آب در داخل برگ ایجاد می‌شود به سادگی قابل‌ثبت است. از طرف دیگر، گرمایی که در آهنگ بالای تنفسی از سطح برگ گیاهان برمی‌خیزد، می‌تواند به عنوان معیاری برای سنجش این افزایش نرخ تنفس مورد ارزیابی قرارگیرد. با این وجود، در اغلب موارد گرمای ایجاد شده در نتیجه تنفس گیاه به قدری کوچک است که تاثیر قابل‌کشفی بر دمای برگ نمی‌گذارد.

در حال حاضر تحقیقات در جهت خودکارسازی تصویربرداری حرارتی، و ترکیب آن با تصویربرداری مرئی (یا بازتاب قرمز/ فروسرخ)، با هدف خودکارسازی آبیاری زمانمند در دست انجام است [۱۰]. به عنوان یک نمونه خوب در این زمینه می‌توان به آبیاری گلخانه‌ها اشاره نمود؛ جایی که اطمینان از آبیاری مناسب و به موقع تمامی گلدان‌ها از اهیمت بالایی برخوردار است. از طرفی، برای پرهیز از اثرات سوء ناشی از آبیاری بیش از حد و مشکلات ناشی از کمبود منابع آبی، لازم است از آبیاری بیش از نیاز هم اجتناب شود.

۲-۲- تصویربرداری فلوئورسانس

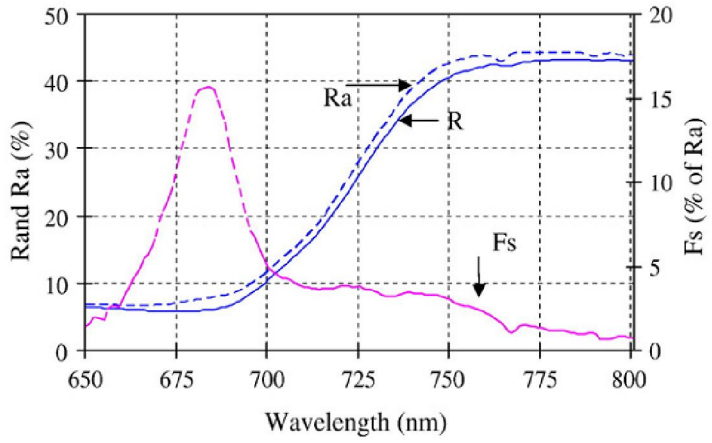
در مطالعه پاسخ یک برگ به تنش‌ها، با ثبت فلوئورسانس تابشی از آن برگ نیز اطلاعات متنوعی قابل دریافت است. مهم‌ترین طول‌موج‌های مرتبط با فلوئورسانس تابشی از یک برگ سبز در نتیجه تحریک با تابش UV-A، طول‌موج‌های ۳۳۰ نانومتر در محدوده فرابنفش، ۴۴۵ نانومتر در محدوده آبی، ۵۳۰ نانومتر در محدوده سبز، ۶۸۵ نانومتر در محدوده قرمز و ۷۴۰ نانومتر در محدوده قرمز دور هستند [۱۱]. قله‌های تابشی مربوط به محدوده قرمز و قرمز دور که به ترتیب در طول‌موج‌های ۶۸۵ و ۷۴۰ نانومتر رخ می‌دهند، اساسا با فلوئورسانس سبزینه نوع a که به طور مستقیم با فرآیند فتوسنتز در ارتباط است، مرتبط هستند [۱]. این در حالی است که تابش‌های طول‌موج‌های کوتاهتر عمدتا با فنولیک[۱۲] مرکب در برگ‌ها، به ویژه اسید فرولیک[۱۳] و اسید کلروژنیک[۱۴] محصور در دیواره سلول‌ها در ارتباط می‌باشند [۳].

بزرگی فلوئورسانس تابشی به شدت به طول‌موج و شدت انرژی تحریک کننده بستگی دارد [۱] و در هر طول‌موج، از تمرکز اجزای تابنده، نورشناسی درون برگ (شامل عواملی که بر جذب مجدد بخشی از فلوئورسانس تاثیر می‌گذارد)، فلوئورسانس مرتبط با فتوسنتز تقسیم انرژی بین فتوسیستم‌ها و فرآیند دفع انرژی در کلروپلاست تاثیر می‌پذیرد [۳]. رنگدانه‌های مرتبط با فرآیند فتوسنتز عمدتا تابش (نور خورشید) را در محدوده ۷۰۰-۳۵۰ نانومتر جذب می‌کنند و این

در حالی است که بیشینه تابش فلوئورسانس سبزینه در طول‌موج‌های ۷۰۰-۶۸۵ نانومتر رخ می‌دهد. در محدوده لبه سبز (۷۲۵-۶۸۰ نانومتر)، به سبب جذب زیاد سبزینه نوع a گیاه بازتاب نسبتا پائینی دارد (شکل ۱) [۱].

مقدار خام فلوئورسانس عملا یک علامت غیرمفید است، زیرا به شدت به روشنایی و مجموعه‌ای از مشخصه‌های ساختاری برگ وابسته است و معیار مشخصی برای سنجش مقدار مطلق این پارامتر در دسترس نیست. از این روی، مقادیر ثبت‌شده برای فلوئورسانس در گام نخست به هنجار می‌شوند (مثلا به صورت درصدی از بازتاب گیاه در هر طول‌موج) تا از تصاویری که با گذار فلوئورسانس در نورپردازی[۱۵] [۱۲] یا با استفاده از روش‌های تلفیق فلوئورسانس[۱۶] [۱۳] تهیه می‌شود، پارامترهای فلوئورسانس سبزینه مشابهی استخراج شود [۳].

فلوئورسانس حاصل از تحریک تکفام در محدوده قرمز ($R_{۶۸۵}$) یا قرمز دور ($R_{۷۴۰}$) و نسبت آنها ($R_{۶۸۵}/R_{۷۴۰}$)، می‌تواند انواع تنش‌های گیاهی را با موفقیت آشکارسازی نموده، و قادر است مقدار پسماند محصولی که سطح خاک زیرکشت را می‌پوشاند، تعیین نماید [۱].



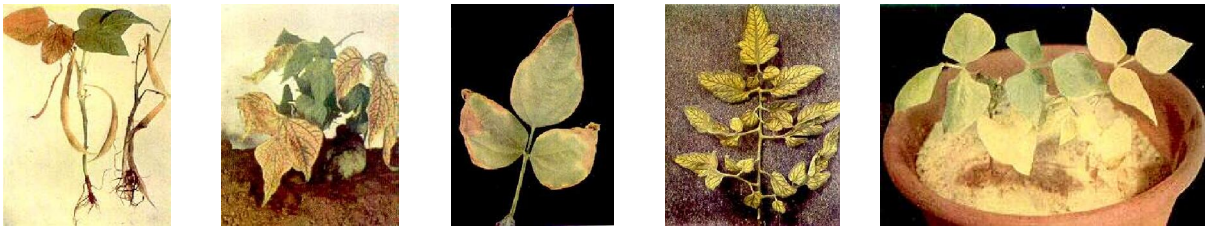
شکل ۱: منحنی رفتار طیفی برگ ذرت در تصویربرداری بازتابی و فلوئورسانس: بازتاب پوشش گیاهی (R)، بازتاب ظاهری (R_a) و فلوئورسانس حالت پایدار ($Fs_\lambda=Ra_\lambda-R_\lambda$) [۱].

بیشتر تحقیقاتی که در زمینه فلوئورسانس سبزینه صورت پذیرفته، بر اندازه‌گیری‌های تک نقطه متمرکز بوده است. این سیستم‌های تصویربرداری نه تنها برای مطالعه پاسخ فتوسنتزی به تنش‌ها، بلکه در مطالعه دامنه وسعی از تنش‌های زیستی کارآیی خود را به اثبات رسانیده‌اند. به عنوان مثال، هر دو نوع داده‌های فلوئورسانس سبزینه و فلوئورسانس چندرنگی در اثبات وجود و تشخیص مراحل ابتدایی بیماری‌های قارچی، ویروسی و باکتریایی، پیش از ظهور علائم دیداری در تصاویر استاندار باندهای مرئی قابل استفاده هستند [۱۴]. افزون بر این، روش‌های فلوئورسانس چندرنگی در تشخیص وضعیت سطح مواد مغذی برگ‌ها نیزکاربرد دارند [۳].

۲-۳- تصویربرداری بازتابش

به طور طبیعی برگ‌ها با بازتاب نور دیده می‌شوند و تغییر رنگ، شاخص مناسبی برای تشخیص سلامتی فرآهم می‌آورد [۱۵]. طیف بازتابی متوسط برگ، به ترکیب نسبی تمامی رنگدانه‌های آن (نظیر سبزینه، کِراتنوئید[۱۷]، فِلِیونوئید[۱۸] و غیره) بستگی دارد. این موضوع، به ویژه تغییر محتوای سبزینه برگ که با استفاده از یک طیف‌نورسنج به راحتی قابل‌اندازه‌گیری است، شاخص خوبی برای تشخیص تنش است [۱].

در عین حال، اگر توزیع رنگ در سطح برگ نیز به عنوان یک پارامتر دیگر دیده شود، توان تفکیک بسیار بزرگتری محیا می‌گردد. بسیاری از بیماری‌ها و کمبود مواد معدنی یا سموم موجب بروز الگوهای رنگی مشخصی می‌شوند. به عنوان مثال، کمبود نیتروژن موجب کاهش کلی سبزینه و در نتیجه زرد شدن برگ می‌شود، کمبود روی موجب بروز رگه‌های قهوه‌ای رنگ می‌گردد، کمبود منیزیم باعث زرد شدن (تنها) قسمت میانی برگ می‌شود، و کمبود گوگرد موجب بروز رگه‌های ارغوانی رنگ در سطح برگ می‌گردد (شکل ۲) [۱۶].



الف: کمبود نیتروژن **ب:** کمبود منیزوم **پ:** کمبود پتاسیم **ت:** کمبود منگنز **ث:** کمبود کلسیم

شکل ۲: نمونه‌ای از الگوهای رنگی ناشی از کمبود مواد معدنی بر رنگدانه‌های برگ گیاه [۱۶]

علائم برخی بیماری‌های گیاهی هم به صورت الگوهای خاص رنگی در نزدیکی یا دور از رگ‌ها و یا لبه برگ ظاهر می‌شود [۱۶]، که به همراه علائم پیش‌گفته می‌تواند برای تشخیص بیماری‌های خاصی مورد استفاده قرارگیرد. متاسفانه این روش نیازمند یک ناظر چیره‌دست است تا بتواند با مشاهده الگوهای رنگی مختلف نوع بیماری را تشخیص دهد [۳]؛ که این موضوع خود انگیزه اصلی ایجاد روش‌های خودکار تشخیص با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و سیستم‌های حامی تصمیم‌گیری به شمار می‌رود.

۲-۴- تصویربرداری با چند سنجنده

از آنجا که هر سیستم تصویربرداری تنها اطلاعات محدودی فرآهم می‌آورد، تنها تغییرات یک یا چند پاسخ میانی محدود را آشکار می‌کند. از سوی یگر، این پاسخ می‌تواند در نتیجه طیف وسیعی از تنش‌ها باشد. در نتیجه، با استفاده از دو یا چند سنجنده توان تشخیص تنش‌ها بسیار بهبود خواهد یافت. به عنوان مثال، تصویربرداری حرارتی عمدتا در مطالعه تغییر نرخ تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار می‌گیرد، که معمولا در نتیجه تغییر روزنه‌های تنفسی رخ می‌دهد، و این در حالی است که تنش‌های مختلفی نظیر کم‌آبی، غرق‌آبی، شوری، و عفونت‌ها یا آلودگی‌های قارچی می‌تواند موجب

بسته شدن روزنه‌های تنفسی شود. از این روی، در مطالعات اخیر برای تشخیص و پایش تنش‌ها تاکید بر توسعه تصویربرداری با چند سنجنده بوده است. این روش‌ها را می‌توان در بازه‌ای از ترکیبات ساده نظیر سنجنده‌های حرارتی و بازتابی [۱۸-۱۷]، یا سنجنده‌های بازتابی مرئی و فلوئورسانس [۱۹]، تا ترکیب‌های پیچیده‌تری مانند سنجنده‌های فلوئورسانس، بازتابی و حرارتی [۲۲-۲۰] قرار داد.

۳- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با وجود تنوع تنش‌های گیاهی و علائم ناشی از آنها، با مطالعه، شناسایی و استفاده از انواع مناسب تصاویر سنجش از دوری می‌توان به آشکارسازی و تشخیص آنها مبادرت ورزید. به بیان دیگر، در اغلب موارد تنها یکی از انواع مختلف سیستم‌های تصویربرداری برای کشف و آشکارسازی یک گونه خاص از تنش‌های گیاهی بهینه خواهد بود. از این روی، مطالعه موردی و بررسی نتایج حاصل می‌تواند راه‌گشای یک سری از مشکلات فرارو باشد. اما در برخی موارد با توجه به عمومیت علائم ناشی از برخی تنش‌ها، شناسایی تنش علت با استفاده از تنها یک نوع سیستم تصویربرداری مقدور نبوده و لازم است برای یافتن ترکیب مناسب تصاویر مورد نیاز تحقیقاتی صورت پذیرد. روشن است که پتانسیل بالایی برای ترکیب سیستم‌های تصویربرداری مختلف در تشخیص و تعیین کمی تنش‌های زیستی و فیزیولوژیکی گیاهی وجود دارد. با ترکیب اطلاعات حاصل از سنجنده‌های مختلف، هر یک از آنها یک پاسخ فیزیولوژیکی متفاوت را آشکارسازی می‌کند، و به این ترتیب توان تشخیص و تعیین کمی تنش‌های مختلف به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. البته لازم است در تمامی مراحل توجه ویژه‌ای به عدم‌قطعیت‌های موجود مبذول شود.

۴- پیشنهادات

با توجه به قابلیت‌های خاص سنجش از دور نظیر سرعت بالا و هزینه نسبتا پائین، به ویژه زمانی که وسعت منطقه مطالعاتی وسیع باشد، و نیز اهمیت راهبردی ویژه برخی محصولات بخش کشاورزی (مانند برنج، گندم و ...) مطالعه موردی با هدف شناسایی و درک راه‌کارها و راهبردهای مورد نیاز جهت طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌ها و زیرسیستم‌های عملیاتی به منظور پایش و کنترل سطح سلامت این محصولات می‌تواند به عنوان یک افق مطالعاتی پیش رو مطرح گردد.

از سوی دیگر، در اغلب مطالعاتی که تا کنون در این زمینه صورت پذیرفته، پاسخ طیفی گیاهان به تنش‌های مختلف مبنای اصلی تحقیقات بوده و از اطلاعات هندسی و بافت تصویر یا اصلا استفاده نشده و یا تمرکز بر این منابع عظیم اطلاعاتی بسیار اندک بوده است. با توجه به اینکه حداقل برای برخی از تنش‌های گیاهی می‌توان الگوهای مکانی مشخصی متصور شد، به نظر می‌رسد بتوان از این اطلاعات برای افزایش معنی‌دار ابعاد فضای ویژگی و کشف دقیق‌تر نوع تنش‌ها بهره جست.

۵- پانوشت‌ها

1. Causal Stress
2. Precision Agriculture
3. Stress Degree Days
4. Crop Water Stress Index
5. Canopy Temperature Variability
6. Leaf Water Content Index
7. Water Deficit Index
8. Water Index
9. Normalized Difference Water Index
10. Floating-Position Water Band Index
11. Infrared Thermometry
12. Phenolic
13. Ferulic Acid
14. Chlorogenic Acid
15. Fluorescence Transients on Illumination
16. Modulated Fluorescence Techniques
17. Carotenoids
18. Flavonoids

منابع و مراجع

[1] P.K. Entcheva Campbell, E.M. Middleton, L.A. Corp, M.S. Kim, 2008, 'Contribution of Chlorophyll Fluorescence to the Apparent Vegetation Reflectance', SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 404 (2008) 433 – 439.

[2] Carter G.A., Miller R.L., 1994, 'Early Detection of Plant Stress by Digital Imaging within Narrow Stress-Sensitive Wavebands', REMOTE SENS. ENVIRON. 50:295-302.

[3] Jones, H.G., Schofield, P., 2008, 'Thermal And Other Remote Sensing Of Plant Stress', GEN. APPL. PLANT PHYSIOLOGY, SPATIAL ISSUE, 34 (1-2), 19-32.

[4] Jones, C.L., Weckler, P.R., Maness, N.O., Stone, M.L., Jayasekara, R., 2004, 'Estimating Water Stress in Plants Using Hyperspectral Sensing', ASAE/CSAE Annual International Meeting, Fair-mont Chateau Laurier, The Westin, Government Centre, Ottawa, Ontario, Canada, 1 - 4 August.

[5] Guilioni, L., Jones, H.G., Leinonen, I., Lhomme, J.P., (2008), 'On the relationships between stomatal resistance and leaf temperatures in thermography', Agric. Forest Meteorol.

[6] Hunt E.R., Jr., Yilmaz M.T., 2007, 'Remote Sensing of Vegetation Water Content using Short-wave Infrared Reflectances', Proc. of SPIE Vol. 6679 667902-1.

[7] Jackson, R.D., Pinter, P.J., JR., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1986, 'Detection and Evaluation of Plant Stresses for Crop Management Decisions', IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. GE-24, NO. 1.

[8] Wang, Q., Takahashi, H., 1998, 'A Land Surface Water Deficit Model for an Arid and Semiarid Region: Impact of Desertification on the Water Deficit Status in the Loess Plateau, China', JOURNAL OF CLIMATE, VOLUME 12, 244-257.

[9] Jensen, J.R., 2007, 'Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective', Pearson Education, Inc., 2end Edition, p: 387.

[10] Cremona, M.V., Stutzel, H., Kage, H., 2003, 'Irrigation Scheduling of Kohlrabi Using Crop Water Stress Index', HORTSCIENCE 39(2): 276-279.

[11] Chappelle EW, Kim MS, Mulchi CL, Daughtry CST, McMurtrey JE, Corp LA, 1999, 'Laser induced fluorescence (LIF) as a remote sensing tool: a review', Geosci Remote Sens Newsletter;110:6–15.

[12] Strasser, R.J., Tsimilli, M., Srivastava, A., 2002, 'Analysis of the Fluorescence Transient'.

[13] Hovenden, MJ., Seppelt, RD., 1995, 'Utility of Modulated Fluorescence in Measuring Photosynthetic Activity of Antarctic Plants: Field and Laboratory Studies', Australian Journal of Plant Physiology 22(2) 321 – 330.

[14] Carter, G.A., 1993, 'Responses of leaf spectral reflectance to plant stress', Am. J. Bot., 80, 239-243.

[15] Anatoly A. Gitelson, and Mark N. Merzlyak, 1998, 'Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves', Adv. Space Res. Vol. 22, No. 5, pp. 686-692, Published by Elsevier Science Ltd.

[16] Thomas Wallace, M.C., D.Sc., A.I.C., 'The Diagnosis of Mineral Deficiencies in Plants by Visual Symptoms', University of Bristol Agricultural and Horticulture Research Station, Long Ashton, Bristol. http://www.hbci.com/~wenonah/min-def/list.htm.

[17] Chaerle, L., F. De Boever, M. Van Montagu, D. Van Der Straeten, 2001, 'Thermographic visualization of cell death in tobacco and Arabidopsis', Plant Cell and Environ., 24, 15-25.

[18] Leinonen, I., H.G. Jones, 2004, 'Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress', J. Exp. Bot., 55, 1243-1231.

[19] Lenk, S., L. Chaerle, E.E. Pfundel, G. Langsdorf, D. Hagenbeek, H.K. Lechtenthaler, D. Van Der Straeten, C. Buschmann, 2007, 'Multispectral fluorescence and reflectance imaging at the leaf level and its possible applications', J. Exp. Bot., 58, 807-814.

[20] Chaerle, L., K. Hulsen, C. Hermans, R.J. Strasser, R. Valcke, M. Hofte, D. Van Der Straeten, 2003, 'Robotized time-lapse imaging to assess in-planta uptake of phenylurea herbicides and their microbial degradation', Physiol. Plant., 118, 613-619.

[21] Chaerle, L., M. Pineda, R. Romero-Aranda, D. Van Der Straeten, M. Baron, 2006, 'Robotized thermal and chlorophyll fluorescence imaging of pepper mild mottle virus infection in Nicotiana benthamiana', Plant, Cell Physiol., 47, 1323-1336.

[22] Chaerle, K., I. Leinonen, H.G. Jones, D. Van Der Straeten, 2007, 'Monitoring and screening plant populations with combined thermal and chlorophyll fluorescence imaging', J. Exp. Bot., 58, 773-784.