



بررسی منحنی انعکاس طیفی درختان مرکبات مبتلا به بیماری گرینینگ یا با استفاده از طیفسنجی زمینی و شاخص‌های گیاهی Huanglongbing

حامد کاچار^{۱*}، مهدی مدیری^۲، محسن عنایتی^۱، محسن عسگری^۳، حکمت‌ا... محمدخانلو^۳، حمید دبیری^۴

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی پدافند غیر عامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نقشهبرداری، دانشگاه آزاد
- ۴- کارشناسی، مهندسی کشاورزی، دانشگاه شیراز

چکیده:

بیماری میوه سبز مرکبات (گرینینگ) یا HLB یکی از خطروناک‌ترین بیماری‌های مرکبات در نقاط مختلف جهان است. بطور کلی این بیماری تمامی ارقام مختلف مرکبات را آلوده می‌کند و درنهایت به مرگ درختان منجر می‌شود. با توجه به آن که تا کنون هیچگونه درمانی برای بیماری گرینینگ مرکبات گزارش نشده است، لذا ازین بردن درختان آلوده می‌تواند گسترش HLB را کاهش دهد. از این رو شناسایی و تشخیص دقیق بیماری HLB قبل از اعمال استراتژی‌های کنترل مانند ازین بردن درختان بیمار، بسیار ضروری است. بطور کلی، از آنجا که روش‌های فعلی تشخیص و تمایز درخت‌های آلوده به HLB از درختان سالم، دستیابی به روشی سریع و قابل‌اطمیان امری زمان‌بر هستند، از این‌رو برای تشخیص و تمایز درخت‌های آلوده به HLB نظری مشاهدات میدانی، PCR و سنجش بیولوژیکی و میکروسکوپی الکترونی، گران و زمان‌بر هستند، از این‌رو برای تشخیص و تمایز درخت‌های آلوده به HLB از درختان سالم، دستیابی به روشی سریع و قابل‌اطمیان امری لازم، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. لذا هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی منحنی انعکاس طیفی درختان مرکبات مبتلا به بیماری گرینینگ با استفاده از طیفسنجی زمینی و شاخص‌های گیاهی است. با توجه به گزارش‌هایی مبنی بر بروز بیماری گرینینگ مرکبات در کشور، منطقه‌ی تنگایچ فسا در استان فارس بعنوان منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شد. با نظر کارشناسان گیاه‌شناسی و کشاورزی حاضر در منطقه، درختان مرکبات سالم و مبتلا به بیماری گرینینگ شناسایی و با استفاده از دستگاه طیفسنج ASD FieldSpec4 عملیات طیفسنجی انجام شد. با مقایسه‌ی میانگین طیف‌های اخذ شده از درختان آلوده به گرینینگ و درختان سالم، مشخص شد که در ناحیه مرئی طیف الکترومغناطیس، متوسط میزان انعکاس طیفی درختان آلوده به گرینینگ یا HLB از درختان سالم بیشتر و در لبه‌ی قرمز و ناحیه مادون قرمز نزدیک، کمتر است. از طرف دیگر شاخص‌های طیفی NDI و PSRI برای درختان پرتقال و گریپفروت سالم و مبتلا به بیماری گرینینگ، محاسبه شد. افزایش میانگین مقادیر شاخص NDI و کاهش میانگین مقادیر شاخص‌های SIPI و PSRI برای درختان مرکبات سالم در مقایسه با درختان مبتلا به بیماری گرینینگ، بیانگر افزایش غلظت کارتنویید و یا کاهش چشمگیر کلروفیل در گیاهان آفت‌زده می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی استرس و زوال در گیاه باشد.

واژه‌های کلیدی: بیماری گرینینگ، مرکبات، طیفسنجی زمینی، شاخص‌های گیاهی

۱- مقدمه

تولید مرکبات یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های کشاورزی و اقتصادی در سراسر جهان است. طبق گزارش سازمان^۱ FAO، حدود ۱۲۲ میلیون تن انواع میوه‌های مرکبات بطور سالانه تولید می‌شود. به عنوان نمونه در سال ۲۰۰۸، از فروش میوه‌های تازه و همچنین آب میوه در سراسر دنیا، درآمدی معادل با ۱۷ بیلیون دلار حاصل شده است [۱]. اما علیرغم درآمدهای اقتصادی بالا، طی سال‌های اخیر خسارات اقتصادی فراوانی در تولید مرکبات به دلیل بروز آفاتی نظیر گرینینگ مرکبات و یا^۲ HLB رخ داده است. بیماری میوه سبز مرکبات^۳ (گرینینگ) یا HLB یکی از خط‌ناک‌ترین بیماری‌های مرکبات در نقاط مختلف جهان است و خسارت ناشی از این بیماری به باغات مرکبات بسیار سنگین و جبران‌ناپذیر است. در صورتی که درختان کم‌سن و جوان به این بیماری آلوده شوند، به مرحله محصول‌دهی نرسیده و در درختان بالغ نیز موجب ناباروری می‌گردد. بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های مرکبات جهان نظیر برزیل، چین، هند، مکزیک و آمریکا بطور ویژه توسط HLB تهدید شده و تا کنون خسارات زیادی را نیز متحمل شده‌اند [۲]. عامل بیماری یک باکتری تحت عنوان^۴ Clas است که در باغ‌ها با پیوند زدن و همچنین توسط آفت پسیل آسیایی مرکبات از درختان آلوده به درختان سالم منتقل می‌شود. حشره ناقل فرم آسیایی بیماری پسیل مرکبات، Diaphorina Citri می‌باشد (شکل ۱). روش انتقال بصورت پایا و تکثیری بوده و حشره ناقل با یکبار تغذیه برای همه عمر آلوده به عامل بیماری می‌گردد و می‌تواند بیماری را انتقال دهد. پس از تغذیه پسیل روی درختان و گیاهان آلوده، عامل بیماری در غدد بزاقی حشره تکثیر شده و قادر است آن را در تمامی دوره‌ی زندگی به میزان‌های جدید و درختان سالم منتقل نماید [۳].



شکل ۱: حشره پسیل آسیایی مرکبات ناقل بیماری گرینینگ

گیاهان خانواده مرکبات میزبان طبیعی بیماری گرینینگ می‌باشند. پرتنال و نارنگی بیشترین حساسیت را به این بیماری داشته و گریپ فروت، نارنج و لیموترش حساسیت کمتری دارند، اما به این بیماری آلوده می‌شوند. بطور کلی این بیماری تمامی ارقام مختلف مرکبات را آلوده می‌کند و درنهایت به مرگ درختان منجر می‌شود. باکتری مربوط به HLB، یعنی CLas، روند انتقال (مواد غذایی) کربوهیدرات‌ها را به نواحی دیگر درخت مختل می‌کند که به زوال درخت و خشکیدگی شاخه‌ها منجر می‌شود. اولین نشانه‌ی قابل رویت بیماری گرینینگ مرکبات، لکه‌دار شدن یا زردشدن برگ است که کلی نیست و بدون اثر گذاشتن بر شاخه‌های دیگر می‌تواند تنها بر روی یک شاخه اثر بگذارد. لکه‌دار شدن زاویه‌ای و زرد از نشانه‌های خاص در بیماری HLB است و مشکل از لکه‌های زرد روی برگ‌های مایل به سبز تیره است. علائم بیماری HLB بر روی برگ‌های جوان و ساقه‌های تازه‌شان، به هنگام رشد شاخه‌ها و بعد از اینکه برگ‌ها کاملاً رشد کرده و رسیدند، ظاهر می‌شود. در این بیماری برگ‌ها با حالت ابلقی^۵ نمایان می‌شوند، یعنی نواحی زرد و سبز بدون مرز مشخص روی برگ ظاهر می‌گردند (شکل ۲). لازم به ذکر است که در بیماری گرینینگ، حالت ابلقی از رگبرگ‌ها نیز عبور می‌کند [۴].

¹ Food and Agriculture Organization

² Huanglongbing

³ Citrus Greening

⁴ Candidatus liberibacter asiaticus

⁵ Mottelling



شکل ۲: برگ‌های سالم (سمت راست) و برگ‌های مبتلا به بیماری گرینینگ (سمت چپ)

علائمی مانند زرد شدن برگ، لکه‌های تیره و میوه‌های کوچک، دورنگ و نامتقارن شدن میوه‌ها (شکل ۳)، تقریباً ۶ ماه دو سال بعد از شروع بیماری ظاهر می‌شوند. میوه‌ی درخت آلوده مزه‌ی تلخ، بو و طعم اسیدی دارد که به آبمیوه‌ای با کیفیت بسیار ضعیف منجر می‌شود و این عامل، عدم رضایتمندی بازار را در پی خواهد داشت [۴].

با توجه به آن که تا کنون هیچگونه درمانی برای بیماری گرینینگ (میوه سبز) مركبات گزارش نشده است، لذا از بین بردن درختان آلوده می‌تواند گسترش HLB را کاهش دهد. از این رو شناسایی و تشخیص دقیق بیماری HLB قبل از اعمال استراتژی‌های کنترل مانند از بین بردن درختان بیمار، بسیار ضروری و یک مسئله‌ی حیاتی است [۵].



شکل ۳: علائم بیماری روی میوه‌ها (دورنگ و نامتقارن شدن میوه‌ها)

در حال حاضر، تشخیص و شناسایی مبتنی بر مشاهدات میدانی بطور گسترده برای تشخیص علائم بیماری گرینینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در طول فرآیند شناسایی، بمنظور بررسی علائم حاکی از بیماری مذکور، تیمی از کارشناسان و بازرسان آموزش دیده با وسائل نقلیه و بالابرها متصل به وسائل نقلیه و یا بدون هیچگونه وسیله‌ی نقلیه‌ای در میان باغ‌های مركبات به کاوش می‌پردازند. میزان میانگین درصد موفقیت در تشخیص درختان آلوده به بیماری HLB در این روش حدوداً ۴۷-۵۹٪ گزارش شده است [۶]. از جمله چالش‌هایی که در طول شناسایی مبتنی بر روش مشاهدات میدانی پیش رو است عبارتند از: توزیع نابرابر علائم بیماری در یک درخت، اثرات مشابه کمبودهای مواد مغذی نظیر زینک و آهن، عوامل محیطی و دیگر شرایط استرس است که به علائم مشابه منجر می‌شوند.

سنجهش بیولوژیکی و میکروسکوپی الکترونی برای تشخیص بیماری HLB قابل استفاده است، اما این روش‌ها زمان بر و در وسعت وسیع مکانی، غیرعملیاتی هستند. روش‌های مولکولی مانند سنجهش‌های مبتنی بر ¹PCR برای تشخیص وجود بیماری HLB استفاده می‌شود [۷]. باوجود این، شناسایی گیاهان مشکوک از طریق علائم برگی و میوه‌ای، قبل از سنجهش‌های PCR، مستلزم اعزام گروه‌های میدانی شناسایی آموزش دیده است. بطور کلی، از آنجا که روش‌های فعلی

¹ polymerase chain reaction

تشخیص HLB گران و زمان بر هستند، برای تشخیص و تمایز درخت‌های آلوده به HLB از درختان سالم در یک پهنه‌ی وسیع جغرافیایی، دستیابی به روشی سریع و قابل اطمینان امری لازم و ضروری است.

سنکران^۱ و همکاران[۸]، طی سال ۲۰۱۰، پژوهش‌های انجام شده پیرامون طیف‌سنجدی مرئی(VIS)^۲ و مادون قرمز(NIR)^۳ جهت تشخیص بیماری گیاهان را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که طیف‌سنجدی مرئی-مادون قرمز نزدیک(VIS-NIR) پتانسیل تشخیص ناهنجاری‌های گیاهی ناشی از بیماری یا سوء تغذیه را دارد[۹ و ۱۰]. نایدو^۴ [۱۱] عفونت ویروسی در درختان انگور که باعث بیماری لوله‌ای شدن برگ می‌شود را بررسی نمود. آن‌ها از شاخص‌های گیاهی برای متمایز کردن این بیماری استفاده کردند و صحت ۷۵٪ را گزارش نمودند. در مطالعه‌ای دیگر، بیماری فساد اسکلروتینیا^۵ توسط هوانگ^۶ و آپان^۷ [۱۲] در کرفس تحت شرایط میدانی و با استفاده از داده‌های فرا طیفی مورد بررسی قرار گرفت. پژوهشگران در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که گستره مرئی-مادون قرمز نزدیک از ۴۰۰ الی ۱۳۰۰ نانومتر به خوبی کل طیف (۴۰۰ الی ۲۵۰۰ نانومتر) برای تشخیص این بیماری عمل می‌کند. لیو^۸ و همکاران[۱۳]، شدت بیماری خال قهقهه‌ای برنج را با استفاده از رگرسیون تدریجی^۹، رگرسیون جزء اصلی^{۱۰} و رگرسیون کمترین مربعات جزئی^{۱۱} مشخص و ارزیابی نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ارزیابی شدت بیماری با بکارگیری انعکاس فراتیفی از برگ‌ها قابل انجام است. پول^{۱۲} و همکاران[۱۴]، با استفاده از طیف‌سنجدی مرئی-مادون قرمز نزدیک بیماری HLB را در آزمایشگاه بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که با کاهش میزان کلروفیل و جذب ناشی از آن در برگ‌های آلوده به HLB، بازتابندگی در محدوده‌ی مرئی طیف الکترومغناطیس افزایش می‌یابد.

در سال‌های اخیر استان‌های جنوبی کشور نظیر سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان، فارس و ... به کانون‌های اصلی برخی از بیماری و آفات بسیار مهم مرکبات نظیر گرینینگ و پسیل تبدیل شده‌اند که همگی اهمیت جهانی داشته و از عوامل مهم قرنطینه‌ای و بیوتوریسم محسوب می‌شوند[۱۵، ۱۶ و ۱۷]. از این رو با توجه به بروز بیماری گرینینگ مرکبات در کشور، هدف اصلی این مقاله، بررسی منحنی انعکاس طیفی درختان مرکبات مبتلا به بیماری گرینینگ با استفاده از طیف‌سنجدی زمینی و شاخص‌های گیاهی است.

مقاله‌ی حاضر در چهار بخش اصلی تدوین شده است. در بخش نخست، مقدمه‌ای در ارتباط با اهمیت و تاثیرات بیماری گرینینگ، چگونگی شناسایی و راهکار مقابله با آن ارائه گردید. در بخش دوم، پس از معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه، روند و چگونگی انجام آزمایشات طیف‌سنجدی زمینی تشریح می‌گردد. نتایج آزمایشات در بخش سوم ارائه می‌شود. در بخش چهارم، به بحث در خصوص نتایج حاصل و ارائه‌ی پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی پرداخته خواهد شد.

¹ Sankaran

² visible

³ Near infrared

⁴ Naidu

⁵ Sclerotinia

⁶ Huang

⁷ Apan

⁸ Liu

⁹ Stepwise regression

¹⁰ Principal component regression

¹¹ Partial least squares regression

¹² Poole

۲- مواد و روش‌ها

۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

استان فارس با حدود ۶۵۰۰ هکتار باغات مرکبات و تولید سالیانه بیش از یک میلیون تن محصولات مختلف مرکبات، مقام دوم کشور را پس از استان مازندران دارا می‌باشد. فارس از جمله مهم‌ترین مناطق تولید‌کننده نهال مرکبات و تامین‌کننده نهال سایر استان‌های کشور بویژه استان‌های جنوبی می‌باشد، که با تولید سالانه ۸ میلیون نهال مرکبات بعنوان یکی از عمده‌ترین تولید‌کنندگان نهال مرکبات کشور محسوب می‌گردد و همین مسئله اهمیت حفظ و نگهداری این درختان با ارزش را در مقابل آفات و بیماری‌های مختلف بیش از پیش نمایان می‌سازد.

طبق گزارش‌های موجود، با توجه به شیوع پسیل آسیایی مرکبات، ناقل فرم آسیایی بیمارگر و ظهور علائم مظنون به بیماری میوه سبز در درختان مرکبات استان فارس [۱۷]، با انجام آزمون PCR، وجود عامل بیماری میوه سبز در نمونه‌های پسیل و درختان مظنون ردیابی شد و در نتیجه در منطقی از جمله منطقه‌ی تنگ ایج فسا نمونه‌هایی از مرکبات با انجام آزمون‌های PCR حامل باکتری بیمارگر شناسایی شدند، از این رو منطقه‌ی تنگ ایج فسا در عرض جغرافیایی ۲۸°۹۵' شمالی و طول جغرافیایی ۵۴°۹۳' شرقی بعنوان منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شد(شکل (۴)).



شکل ۴: باغ‌های پرتقال، لیمو و گریپفروت

۲-۱- طیفسنجی

طیفسنجی یا طیف‌نگاری در مفهوم عام آن عبارت است از تهیه منحنی بازتاب پدیده یا پدیده‌های مورد نظر در محدوده طول موج‌های مشخص. طیفسنجی می‌تواند به دو صورت زمینی و تصویری صورت گیرد. اندازه‌گیری به روش طیفسنجی زمینی می‌تواند در آزمایشگاه یا در محیط‌های واقعی، انجام پذیرد. اسپکتروفوتومترها و اسپکترورادیومترها برای این اندازه‌گیری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر حسب این که اندازه‌گیری در طبیعت و یا در شرایط آزمایشگاهی است، منبع نور می‌تواند به ترتیب نور طبیعی (خورشید) و یا نور مصنوعی (لامپ) باشد. لازم به ذکر است، در پژوهش حاضر، طیفسنجی زمینی در شرایط میدانی و با نور طبیعی انجام شده و در ادامه، روند انجام عملیات آزمایش تشریح می‌شود.

۲-۲- روش انجام طیفسنجی

در این پژوهش از طیفسنج میدانی ASD^۱ FieldSpec4 (شکل ۵) استفاده شد. این دستگاه رفتار طیفی پدیده‌ها را در ناحیه مرئی-مادون قرمز نزدیک (VNIR^۲) و مادون قرمز کوتاه SWIR1^۲ و SWIR2^۲ اندازه‌گیری می‌کند. محدوده‌ی طیفی این دستگاه از ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است.

¹ Analytical spectral devices



شکل ۵: الف- طیفسنج میدانی ASD FieldSpec4 ب- صفحه سفید مرجع

با نظر کارشناسان و متخصصان کشاورزی حاضر در منطقه، درختان دارای آفت گرینینگ و همچنین درختان سالم و عاری از هرگونه آفتی شناسایی و عملیات طیفسنجی از قسمت فوقانی محدوده‌ی آفت‌زده‌ی و سالم گیاهان، تحت شرایط طبیعی صورت پذیرفت. طی عملیات جمع‌آوری داده از فیبر نوری^۳ دستگاه با زاویه‌ی میدان دید^۴ ۲۵ درجه استفاده شد. دستگاه ASD، سطحی دایره‌ای شکل را با زاویه‌ی میدان دید خود پوشش می‌دهد. در روند انجام عملیات، فاصله‌ی تقریبی فیبر نوری از قسمت فوقانی و تاج درختان در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد، بطوریکه محدوده‌های مورد نظر در میدان دید سنسور قرار گیرد. بطور میانگین مساحت ناحیه‌ی اسکن شده روی زمین توسط اسپکترورادیومتر طی عملیات طیفسنجی مذکور در حدود ۳۸۵ دسیمتر مربع است. داده‌ها در بازه‌ی زمانی ساعت ۱۱ تا ۳ بعدازظهر در تاریخ ۱۳۹۵/۰۸/۱۳ در شرایط جوی آرام و آسمانی عاری از ابر، جمع‌آوری شد. بهمنظور فراهم آوردن شرایط یکسان نمونه‌برداری، طی عملیات طیفسنجی از شاخه‌ها و نمونه‌برگ‌ها در جهتی که تاج بیش‌ترین میزان نور را در طول روز دریافت می‌کند، استفاده شد. جهت کم نمودن تاثیر عوامل مزاحم محیطی از قبیل دما، فشار، رطوبت و باد، هر نمونه ۱۰ بار توسط دستگاه اسکن شد. در نتیجه هر یک از مشاهدات حاصل ده بار اسکن است و از طرف دیگر در تنظیمات دستگاه، تعداد تکرار مشاهدات، ۴ بار تکرار تنظیم شد و عملاً در هر مرحله‌ی مشاهداتی از هر نمونه ۴۰ مشاهده اخذ شد. میزان بازنگردی ثبت شده به صحت فرآیند انجام کالیبراسیون دستگاه طیفسنج وابسته است. لذا پس از هر ۱۰ دقیقه جهت کاهش خطاهای مربوط به شرایط جوی، مرحله‌ی قرائت صفحه‌ی مرجع^۵ و بهینه‌سازی تکرار می‌شد. انرژی بازتاب شده از شی مورد نظر بوسیله‌ی سنسور دستگاه طیفسنج اخذ و با ارتباط بیسیم به لپ‌تاپ منتقل می‌گشت. داده‌ها توسط نرم‌افزار RS3 پردازش، ثبت و ذخیره شدند. علاوه بر این، اندازه‌گیری انرژی داخلی دستگاه^۶، کالیبراسیون، بهینه‌سازی^۷ و قرائت صفحه‌ی مرجع نیز توسط نرم‌افزار مذکور انجام شد. پس از تخلیه داده‌ها، برای انجام پردازش‌های مورد نظر از نرم‌افزارهای ViewSpec و متلب استفاده شد. با میانگین‌گیری از طیف‌ها و همچنین حذف باندهای جذبی بخار آب در محدوده‌های ۱۳۵۰-۱۴۶۰ و ۱۷۹۰-۱۹۶۰ نانومتر پردازش‌های طیفی مقدماتی انجام شد(شکل ۶ و ۷).

¹ visible near infrared

² Short wave infrared

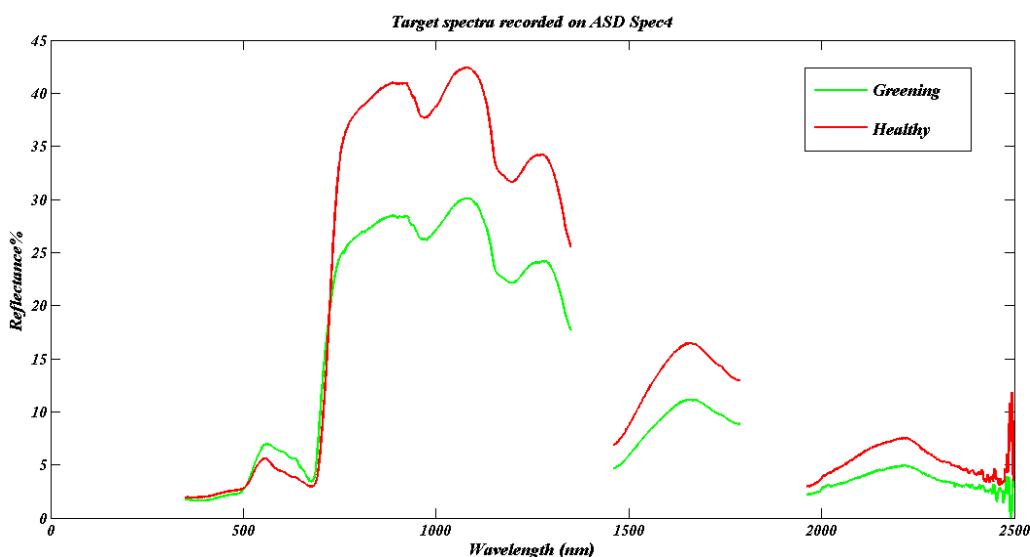
³ Bare fiber optic cable

⁴ Field of view

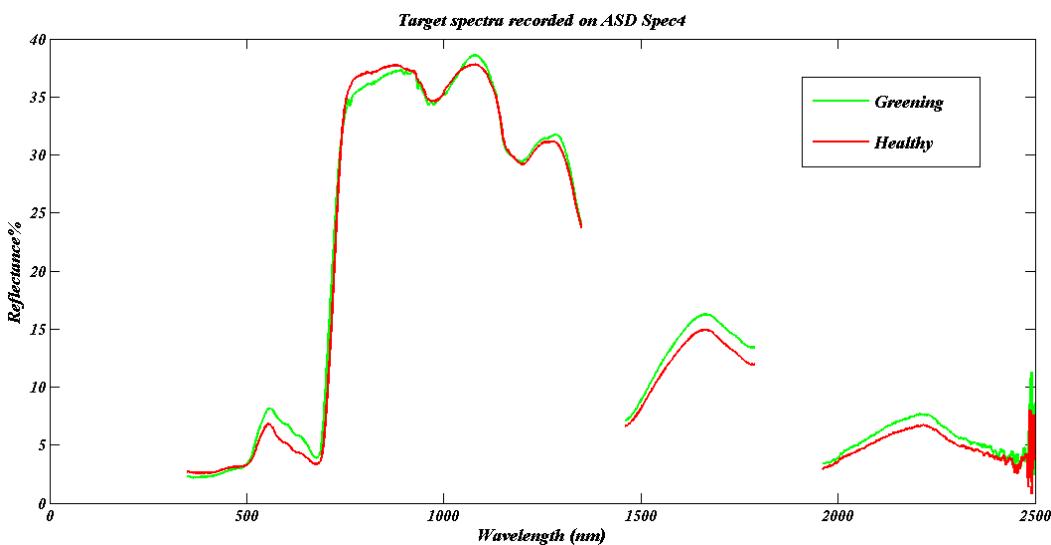
⁵ white reference

⁶ Dark current

⁷ optimization



شکل ۶: میانگین منحنی‌های انعکاس طیفی درختان پرتفال مبتلا به بیماری گرینینگ و درختان پرتفال سالم



شکل ۷: میانگین منحنی‌های انعکاس طیفی درختان گریپ‌فروت مبتلا به بیماری گرینینگ و درختان گریپ‌فروت سالم

با توجه به شکل‌های (۶ و ۷)، تغییرات محسوسی در محدوده‌ی مرئی برای منحنی‌های انعکاس طیفی مربوط به گیاهان بیمار و سالم در هر دو گونه‌ی پرتفال و گریپ‌فروت دیده می‌شود. طبق شکل‌های فوق، در ناحیه‌ی مرئی طیف الکترومغناطیس، متوسط میزان انعکاس طیفی درختان آلوده به گرینینگ یا HLB از درختان سالم بیشتر است، در حالی که مقادیر متوسط انعکاس طیفی درختان سالم در لبه‌ی قرمز و ناحیه‌ی مادون قرمز نزدیک (۷۵۰ الی ۱۱۰۰ نانومتر) طیف الکترومغناطیس از مقادیر مربوط به درختان مبتلا به HLB بیشتر است.

گیاهان سالم دارای جذب بالا در محدوده‌ی مرئی هستند و از طرف دیگر انعکاس طیفی بالایی را در ناحیه‌ی مادون قرمز نزدیک از خود نشان می‌دهند. این امر به دلیل رنگدانه‌های موجود در برگ نظیر زانتوفیل^۱، کلروفیل و کارتنوئید می‌باشد که به شدت دارای جذب بالای انرژی در محدوده‌ی مرئی هستند و کمتر بازتاب می‌کنند. در حالی

^۱ xanthophyll

که در ناحیه مادون قرمز نزدیک میزان جذب انرژی در آن‌ها کوچک و یا حتی صفر است و درنتیجه درصد بازتابندگی در این محدوده بسیار بالا است [۱۸].

هنگامی که گیاهی توسط یک عامل تنفس زیستی دچار بیماری و استرس‌هایی نظیر گرینینگ می‌گردد، عموماً کاهش قابل انتظاری در تولید کلروفیل ایجاد می‌شود که این امر منجر به افزایش متناظر انعکاس در محدودهٔ مرئی و کاهش بازتابندگی در محدودهٔ مادون قرمز نزدیک می‌شود.

۲-۳- شاخص‌های طیفی

ساختار شاخص‌های طیفی به نحوی است که کنتراستی بین یک طول موج مبنا با حداقل حساسیت نسبت به رنگدانه مورد نظر و طول موج دیگر (طول موج شاخص) که حداقل حساسیت را نسبت به آن رنگدانه دارد، ایجاد می‌کند. محاسبهٔ این شاخص‌های طیفی بسته به هدف مورد نظر می‌تواند با استفاده از منحنی‌های طیفی اولیه، فیلتر شده و یا تبدیل‌های مختلف از جمله مشتق اول و دوم منحنی طیفی و حذف پیوستار^(۱) محاسبه شود [۱۹]. در مقاله‌ی پیش رو، از تعدادی شاخص‌های طیفی که رابطهٔ آماری خوبی را با غلظت کلروفیل و نسبت کارتونوئید به کلروفیل دارند، استفاده شده است (جدول ۱).

شاخص طیفی SIPI، دارای حساسیت زیادی به جذب طیفی نسبت رنگدانه کارتونوئید به کلروفیل می‌باشد. همچنین در مقابل تغییرات متغیرهایی در تاج مانند شاخص سطح برگ نیز بسیار حساس می‌باشد. افزایش این شاخص طیفی بیانگر افزایش غلظت کارتونوئید و یا کاهش چشمگیر کلروفیل می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهندهٔ استرس در گیاه باشد. بنابراین در سنجش از دور ابر طیفی برای پایش وضعیت سلامت پوشش گیاهی، تعیین استرس فیزیولوژیکی گیاه و بررسی میزان تولید محصولات کاربرد دارد [۲۰].

جدول ۱: شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این پژوهش

| منبع | رابطه | شاخص طیفی |
|------|---|-------------------|
| [۲۰] | $\text{SIPI} = \frac{R_{800} - R_{445}}{R_{800} - R_{680}}$ | SIPI ^۲ |
| [۱۹] | $\text{NDI} = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705}}$ | NDI ^۳ |
| [۲۱] | $\text{PSRI} = \frac{R_{680} - R_{500}}{R_{750}}$ | PSRI ^۴ |

R: انعکاس طیفی در یک طول موج

در شاخص NDI، از طول موج‌های محدوده لبه قرمز، حساس به غلظت کلروفیل، استفاده می‌شود. این شاخص به علت جذب کلروفیل در طول موج‌های ۷۰۵ و ۷۵۰ نانومتر، نسبت به دامنهٔ وسیعی از تغییرات غلظت کلروفیل در برگ حساس می‌باشد [۱۹]. شاخص گیاهی NDI، در کشاورزی دقیق، دیده‌بانی جنگل و تعیین استرس پوشش گیاهی کاربرد دارد و محدودهٔ این شاخص از ۰/۹ تا +۱ می‌باشد، اما به طور معمول میزان آن برای گیاهان سبز از ۰/۲ تا ۰/۹ می‌باشد [۲۲].

^۱ Continuum Removal

^۲ Structure Insensitive Pigment Index

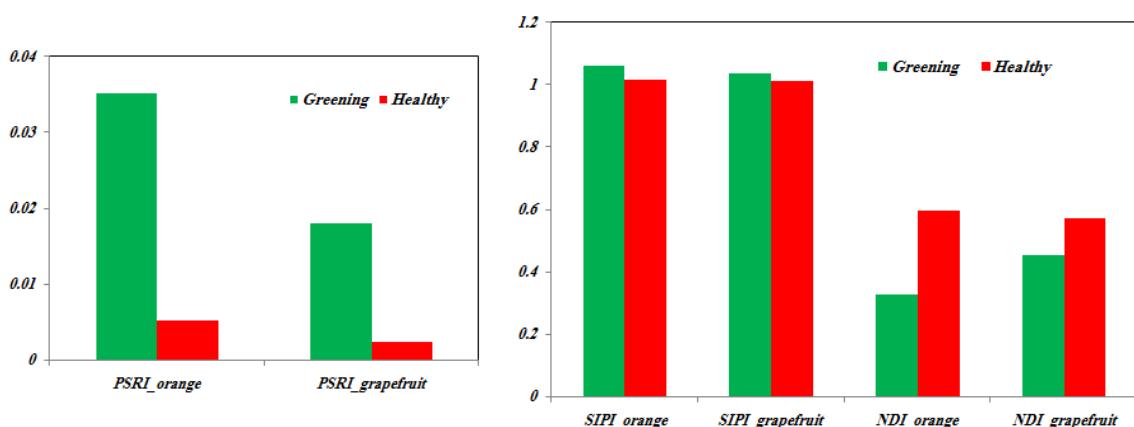
^۳ Normalized Difference Index

^۴ Plant Senescence Reflectance Index

شاخص طیفی PSRI، بیان کنندهٔ نسبت تجمع کارتونویید به کلروفیل موجود در برگ است. افزایش در PSRI نشان دهندهٔ افزایش استرس و شروع پیری گیاه است. از جمله کاربرد این شاخص، دیده‌بانی سلامت پوشش گیاهی، تعیین استرس فیزیولوژیکی گیاه و آنالیز محصول گیاه مورد نظر می‌باشد. محدوده این شاخص از ۱-۱+ است، اما معمولاً برای گیاهان سبز از ۰/۰-۰/۲ متغیر می‌باشد [۲۱].

۳- نتایج

سه شاخص NDI، SIPI و PSRI برای درختان پرتقال و گریپفروت سالم و مبتلا به بیماری گرینینگ محاسبه شد (شکل ۸).



شکل ۸: میانگین مقادیر شاخص‌های PSRI، SIPI و NDI برای درختان پرتقال و گریپفروت بیمار و سالم ارزش‌های به دست آمده از محاسبه شاخص NDI حساس به کلروفیل، حاکی از آن است که در محدودهٔ مرئی، جذب طیفی کلروفیل در درختان آلوده به گرینینگ یا HLB کمتر از درختان سالم در هر دو گونه است. افزایش شاخص SIPI، در درختان مبتلا به HLB، نشان دهندهٔ افزایش نسبی غلظت کارتونویید می‌باشد. بطور کلی افزایش ارزش این شاخص طیفی در درختان مركبات بیمار نسبت به درختان سالم در هر دو گونه، بیانگر افزایش غلظت کارتونویید و یا کاهش چشمگیر کلروفیل می‌باشد که می‌تواند نشان دهندهٔ استرس و زوال در گیاه باشد. ارزش‌های بدست آمده از محاسبهٔ شاخص PSRI حاکی از آن است که درختان گریپفروت و پرتقال سالم با کمترین مقدار شاخص PSRI سالم‌تر از درختان گریپفروت و پرتقال بیمار با بیشترین مقدار شاخص PSRI می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به هدف اصلی مقاله حاضر یعنی بررسی منحنی انعکاس طیفی درختان مركبات مبتلا به بیماری گرینینگ با استفاده از طیف‌سنجی زمینی و شاخص‌های گیاهی، منطقه تنگ ایچ فسا در استان فارس بعنوان منطقهٔ مورد مطالعه انتخاب شد. با نظر کارشناسان گیاه‌شناسی و کشاورزی حاضر در منطقه، درختان مركبات سالم و مبتلا به بیماری گرینینگ شناسایی و با استفاده از دستگاه طیف‌سنج ASD FieldSpec4 عملیات طیف‌سنجی انجام شد. با مقایسه‌ی میانگین طیف‌های اخذ شده از درختان آلوده به گرینینگ و درختان سالم، مشخص شد که در ناحیهٔ مرئی طیف الکترومغناطیس، متوسط میزان انعکاس طیفی درختان آلوده به گرینینگ یا HLB از درختان سالم بیشتر است، در حالی که مقادیر متوسط بارتابندگی درختان سالم در لبهٔ قرمز و ناحیهٔ مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیس از مقادیر مربوط به درختان مبتلا به HLB بیشتر است و این امر به این دلیل است که هنگامی که گیاهی توسط یک عامل تنش‌زای زیستی دچار بیماری و استرس‌هایی نظیر گرینینگ می‌گردد، عموماً کاهش قابل انتظاری در تولید کلروفیل ایجاد می‌شود که این پدیده منجر به افزایش متناظر انعکاس در محدودهٔ مرئی و کاهش بازتابندگی در

محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک می‌شود. از طرف دیگر شاخص‌های طیفی SIPI و PSRI برای درختان پرتقال و گریپ‌فروت سالم و مبتلا به بیماری گرینینگ، محاسبه شد. افزایش میانگین مقادیر شاخص NDI و کاهش میانگین مقادیر شاخص‌های SIPI و PSRI برای درختان مرکبات سالم در مقایسه با درختان مبتلا به بیماری گرینینگ برای هر دو گونه‌ی پرتقال و گریپ‌فروت، بیانگر افزایش غلظت کارتنوبید و یا کاهش چشمگیر کلروفیل در گیاهان آلوهه می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی استرس و زوال در گیاه باشد.

با توجه به اهمیت فوق العاده‌ی موضوع شناسایی آفت گرینینگ برای اقتصاد کشاورزی کشور، امکان سنجی به کارگیری سنجنده‌های تصویربرداری چندطیفی، ابرطیفی و حتی حرارتی نصب شده بر روی هوایپیما و یا پرنده‌های بدون سرنشیں جهت شناسایی درختان مرکبات مبتلا به HLB، بعنوان یکی از افق‌های مطالعاتی آتی، پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations [on-line]. Available from <http://faostat.fao.org/site>, accessed 17 March 2014.
- [2] M.C., do Brasil Cardinalli, P.R., Villas Boas, D.M.B.P., Milori, E.J., Ferreira, M.F., Silva, M.A., Machado, “Infrared spectroscopy: a potential tool in huanglongbing and citrus variegated chlorosis diagnosis”, *Talanta*, 91, 1–6, 2012.
- [3] J.M., Bové, “Huanglongbing: a destructive, newly-emerging century-old disease of citrus”, *J. Plant Pathol.* 88(1), 7–37, 2006.
- [4] E., Etxeberria, P., Gonzalez, D., Achor, and G. Albrigo, “Anatomical distribution of abnormally high levels of starch in HLB-affected Valencia orange trees”, *Physiol. Mol. Plant. Pathol.* 74, 76–83, 2009.
- [5] K.R., Chung, R.H., Bralsky, “Citrus diseases exotic to Florida: Huanglongbing (citrus greening)”, Fact sheet PP-210. Gainesville, Fla.: University of Florida IFAS, Florida Cooperative Extension Service, 2009.
- [6] S., Futch, S., Weingarten, M., Irey, “Determining HLB infection levels using multiple survey methods in Florida citrus”, In: Proceedings Florida State Horticultural Society (FSHS), 122, pp. 152–158, 2009.
- [7] A.K., Hansen, J.T., Trumble, R., Stouthamer, T.D., Paine, “New Huanglongbing (Hlb) *Candidatus* species, “*C. Liberibacter psyllaorous*”, found to infect tomato and potato is vectored by the psyllid *Bactericerca cockerelli* (Sulc)”, *Applied and Environmental Microbiology* 74 (18), 5862–5865, 2008.
- [8] S., Sankaran, A.R., Mishra, R., Ehsani, C., Davis, “A review of advanced techniques for detecting plant diseases”, *Computers and Electronics in Agriculture* 72 (1), 1–13, 2010.
- [9] S., Sankaran, R., Ehsani, “Visible-near infrared spectroscopy based citrus greening detection: evaluation of spectral feature extraction techniques”, *Crop protection* 30 (11), 1508–1513, 2011.
- [10] S., Sankaran, A.R., Mishra, J.M., Maja, R., Ehsani, “Visible-near infrared spectroscopy for detection of Huanglongbing in citrus orchards”, *Computers and Electronics in Agriculture* 72 (2), 127-134, 2011.
- [11] R.A., Naidu, E.M., Perry, F.J., Pierce, T. Mekuria, “The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars”, *Computers and Electronics in Agriculture* 66 (1), 38–45, 2009.
- [12] J. F., Huang, and A. Apan “Detection of sclerotinia rot disease on celery using hyperspectral data and partial least squares regression”, *J. Spatial Sci.* 51(2), 129-142, 2006.
- [13] Z. J., Liu, J. S. Huang, R. Tao, W. Zhou, and L. Zhang “Characterizing and estimating rice brown spot disease severity using stepwise regression, principal component regression, and partial least square regression”, *J. Zhejiang University Sci. B* 8(10), 738-744, 2007.
- [14] G., Poole, W. Windham, G. Heitschmidt, B. Park, and T. Gottwald, “Visible/near-infrared spectroscopy for discrimination of HLB-infected citrus leaves from healthy leaves”, In Proc. Intl. Research Conf. on Huanglongbing. St. Paul, Minn., Plant Management Network, 2008.

- [15] M. M., Faghihi, M., Salehi, A. Bagheri, and K. Izadpanah, "First report of citrus huanglongbing disease on orange in Iran", Plant Pathology, 58, 2009.
- [16] A., Mohkami, R., Satari, Z., Lori, A. Ehsani, and A. Nazemi, "First report of citrus huanglongbing in the Orzooiyeh region in Kerman province", Iranian Journal of Plant Pathology, 47, 2011.
- [17] M., Salehi and R. Rasoulpour, "First report of Candidatus Liberibacter asiaticus associated with Hunglongbing in Fars province", Iranian Journal of Plant Pathology, 51, 4, 563-566, 2016.
- [18] E.B., Knippling, "Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation", Remote Sens, Environ, 1, 155-159, 1970.
- [19] G., Le Maire, C., Francios and E., Dufrene, "Towards Universal Broad Leaf Chlorophyll Indices Using PROSPECT Simulated Database and Hyperspectral Reflectance Measurements", Remote Sensing of Environment, 89, 1-28, 2004.
- [20] J., Penuela, F., Baret and I., Filella, "Semi-Empirical Indices to Assess Cartenoidas/Chlorophyll a ratio from Leaf Spectral Reflectance", Photosynthetica, 31, 221-230, 1955.
- [21] J.R., Merzlyak, A.A., Gitelson, O.B., Chivkunova and V.U., Rakitin, "Non-destructive Optical Detection of Pigment Changes During Leaf Senescence and Fruit Ripening", Physiologica Plantarum 106, 135-141, 1999.
- [22] A.A., Gitelson and M.N., Merzlyak, "Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of Aesculus Hippocastanum L. and Acer Platanoides L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation", Journal of Plant Physiology 143, 286-292, 1994.