



بررسی رفتار بازتابندگی طیفی نهال بلوط ایرانی تحت تنش گرد و غبار

صغری رنجبر اسلاملو^{۱*}، سهام میرزایی^۲، علی درویشی بلورانی^۳، فردین میرزاپور^۴، حسینعلی بهرامی^۵، نادیا عباسزاده تهرانی^۶

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
- ۲- دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
- ۳- استادیار گروه سنجش از دور و GIS دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
- ۴- دانش‌آموخته دکتری دانشکده مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه تربیت مدرس
- ۵- دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۶- استادیار پژوهشگاه هوا فضای کشور

چکیده:

جنگل‌ها در ارتباط با چرخه‌ی جهانی کربن، تبخیر و تعرق و آلودگی سطح زمین نقش مهمی در تنظیم آب و هوای جهانی بر عهده دارند و عامل تولید و حفظ آب، حفظ رطوبت و حفظ خاک هستند. جنگل‌های زاگرس بدلیل کارکرد حفاظتی دارای اهمیت فراوانی هستند که در سال‌های اخیر خشکیدگی در درختان بلوط این جنگل‌ها رشد فزاینده‌ای داشته است. این پدیده با خشکسالی و طوفان‌های گرد و غبار در منطقه مقارن شده است. بنابراین عامل گرد و غبار در این منطقه می‌تواند عاملی مستعدکننده و به عنوان یک تنش‌گر، در کنار تنش‌گرهایی مانند خشکی که از عوامل شناخته شده زوال گیاهان است، مطرح شود. سنجش از دور ابرطیفی با دارا بودن ویژگی‌های پیوستگی باندی و پهنای باندی کم، قابلیت‌های بالایی در تخمین پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی و تعیین استرس‌های وارده بر گیاهان دارد. در این پژوهش، رفتار بازتابندگی طیفی نهال بلوط ایرانی (*Quercus Brantii*) متأثر از غلظت‌های مختلف گرد و غبار در محیط آزمایشگاهی بررسی شده است. اندازه‌گیری طیفی با دستگاه اسپکترورادایومتر Fieldspec3 با محدوده طیفی کامل در سطح تاج پوشش انجام شد. چهار شاخص طیفی باریک‌بند گیاهی جدید شامل NDVI، DVI، SAVI2 و PVI برای تمامی جفت‌طول‌موج‌های ممکن محاسبه شد، سپس با بررسی همبستگی آن‌ها با مقادیر غلظت گرد و غبار، مهمترین طول‌موج‌ها معرفی شدند. دقت نتایج تخمین مقادیر تنش بوسیله هر شاخص، با استفاده از R^2 و RMSE و روش اعتبار متقابل سنجیده شد. نتایج نشان داد، شاخص‌های باریک‌بند روش‌های مناسبی برای تخمین میزان اثرپذیری از تنش گرد و غبار می‌باشند. در این تحقیق، شاخص نسبتی DVI و شاخص تعدیل‌کننده اثر خاک SAVI2 به عنوان مناسب‌ترین شاخص‌ها ($R^2 \geq 0.74$ و $RMSE \leq 0.27$) برای مطالعه اثر گرد و غبار بر نهال بلوط ایرانی، با جفت طول‌موج‌های بهینه آن‌ها به ترتیب در محدوده‌های جذب آب و جذب کلروفیل قرمز، معرفی شدند.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی، شاخص باریک‌بند، خشکیدگی بلوط ایرانی، گرد و غبار.

۱- مقدمه

کشور ایران در یک منطقه با آب و هوای خشک قرار گرفته و از سالیان گذشته با پدیده طوفان‌های گرد و غبار روبرو بوده است. به دلیل مجاورت مناطق غرب و جنوب غربی کشور با بیابان‌های بزرگ کشورهای همجوار، روزهای غبارآلود در این مناطق قابل توجه بوده است. بیشتر طوفان‌های گرد و غبار در این منطقه در تابستان و بهار رخ می‌دهد و در سال‌های اخیر افزایش یافته است. گرد و غبار یک آلاینده ذره‌ای با منشأ طبیعی می‌باشد و دارای طیف وسیعی از اندازه‌ها، اشکال و ترکیبات شیمیایی مختلف است و قادر به تاثیرگذاری براقلیم و جوامع انسانی است [۱].

طبق مطالعات انجام شده، به دنبال وقوع خشکسالی‌های اخیر و طوفان‌های گرد و غبار، پدیده خشکیدگی درختان بلوط ایرانی در جنگل‌های منطقه زاگرس نیز روند فزاینده‌ای داشته است. جنگل‌ها در ارتباط با چرخه‌ی جهانی کربن، تبخیر و تعرق و آبدوی سطح زمین نقش مهمی در تنظیم آب و هوای جهانی بر عهده دارند [۲] و عامل تولید و حفظ آب، حفظ رطوبت و حفظ خاک هستند. جنگل‌های بلوط غرب کشور ایران بخش وسیعی از سلسله جبال زاگرس را می‌پوشاند که از شمال غربی کشور، یعنی شهرستان پیرانشهر در آذربایجان غربی شروع و تا حوالی فیروزآباد در فارس ادامه می‌یابد [۳]. این جنگل‌ها در ۱۱ استان پراکنده شده‌اند و از نظر مساحت بالغ بر ۴۲٪ مساحت جنگل‌های کشور را تشکیل می‌دهند. از جمله کارکردهای مهم استراتژیک جنگل‌های بلوط در زاگرس، کارکرد مهم حفاظت آب و خاک می‌باشد. بیش از ۴۱٪ آب شیرین کشور در زاگرس واقع شده است. گونه غالب این جنگل‌ها مربوط به درخت بلوط ایرانی می‌باشد. این درختان نقش مهمی در کنترل فرسایش خاک دارند [۴]. بر اساس آمار سازمان جنگل‌ها و مراتع و آبخیزداری کشور، بیماری خشکیدگی بلوط در زاگرس اولین بار در سال ۲۰۰۹ میلادی، یعنی یک سال پس از آغاز دوره افزایشی گرد و غبار در منطقه، توسط ادارات منابع طبیعی ایلام و فارس گزارش شد و پس از آن، از سایر استان‌ها نیز گزارشاتی در این خصوص دریافت گردید.

به‌طور کلی، عامل گرد و غبار در این منطقه می‌تواند عاملی مستعد کننده و به عنوان یک تنش‌گر، در کنار تنش‌گرهایی مانند خشکی که از عوامل شناخته شده زوال گیاهان است، مطرح شود. علم سنجش از دور، بخصوص سنجش از دور ابرطیفی، شامل روش‌های کارآمدی است که به دلیل داشتن قابلیت‌های بالا در تخمین پارامترهای بیوفیزیکی و بیوشیمیایی می‌تواند در تعیین استرس‌های وارده بر گیاهان و اثرات آن در مناطق مختلف کمک کند. شناسایی اولیه رفتارهای طیفی متاثر از پدیده‌های مختلف به طور جداگانه در طبیعت بدلیل تاثیر همزمان تمامی عوامل محیطی قابل انجام نیست.

بنابراین در این مطالعه با پیاده‌سازی برخی حالات ممکن طبیعت در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و تنها با تغییر متغیر مورد نظر (غلظت ذرات گرد و غبار) سعی بر مدلسازی اثر گرد و غبار بر رفتار طیفی درخت بلوط نموده‌ایم. ابزارهای سنجش از دور پوشش گیاهی در دهه‌های اخیر به طور قابل توجهی توسعه یافته‌اند [۵]. سنجش از دور نوری از حسگرهای چندطیفی، به طیف‌سنج‌های ابرطیفی، با حسگرهایی که به طور عادی دارای صدها باند طیفی پیوسته و باریک بین ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر است، توسعه یافته و پتانسیل اندازه‌گیری متغیرهای گیاهی خاصی، که اندازه‌گیری آنها با استفاده از حسگرهای چند طیفی مشکل می‌باشد را دارد [۶]. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های توسعه یافته از داده‌های ابرطیفی آزمایشگاهی و تصویری برای اندازه‌گیری‌های تنش پوشش گیاهی [۷] و پارامترهای بیوشیمیایی گیاهان [۸] با نتایج خوبی رو به افزایش بوده است. توسعه روش‌های این اندازه‌گیری‌ها برای تمام گونه‌های گیاهی و بخصوص پوشش گیاهی ارزشمند جنگل‌ها، از نظر صرفه جویی در زمان اندازه‌گیری و اندازه‌گیری بدون تخریب می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

هر چند عوامل متعددی در وقوع خشکیدگی درختی دخالت دارند اما منشا اصلی آن، خشکسالی‌ها و بروز تنش‌های خشکی شدید است که باعث می‌شود درختان نتوانند آب مورد نیاز خود را به اندازه کافی بدست آورند و در نتیجه

دچار ضعف فیزیولوژیک می‌شوند [۹]. در چنین شرایطی هر عاملی که به نحوی با حیات درختان و رشد و نمو آنها در ارتباط است، می‌تواند بر مقاومت درختان به تنش‌های محیطی تاثیر گذاشته و درختان ضعیف شده را در برابر خشکیدگی مستعدتر سازد [۱۰].

سنجش از دور می‌تواند در نظارت دراز مدت پوشش گیاهی برای حفاظت از تنوع زیستی استفاده شود [۱۱]. طوفان‌های گرد و غبار جنوب غربی ایران در سال‌های اخیر، آثار زیان‌باری بر سلامت پوشش گیاهی منطقه داشته است. یافتن نحوه ارتباط این عامل و خشکیدگی درختان بلوط از طریق اطلاعات سنجش از راه دور، می‌تواند به ارائه روش‌های شناسایی پوشش جنگلی تحت تنش با صرفه‌جویی در زمان و هزینه کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طرح آزمایش‌ها

در این پژوهش از نهال‌های دو ساله گونه بلوط ایرانی (*Quercus Brantii*) پرورش یافته در نهالستان جنگلی شهرستان مریوان واقع در استان کردستان استفاده شد. نهال‌ها در اواخر اسفندماه سال ۱۳۹۴ (قبل از آغاز رویش و شکفتن جوانه‌ها) به گلخانه منتقل و در گلدان‌های پلاستیکی به قطر دهانه ۱۸ و ارتفاع ۱۴ کاشته شدند. به منظور شبیه سازی خاک گلدان‌ها با خاک نهالستان جنگلی، از خاکی با ترکیب لومی شنی رسی برای تمام گلدان‌ها استفاده و خاک مورد نظر در آزمایشگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و پارامترهای فیزیکی و میزان اسیدیته و شوری آن اندازه‌گیری شد. پس از آنالیز خاک و تعیین کمبودهای موجود در خاک کودهای لازم به گلدان‌ها داده شد. گلدان‌ها در یک فضای جداگانه نگهداری و مطابق مدیریت رایج نهالستان آبیاری و دوره‌ی رویش آغاز شد. دما و رطوبت گلخانه با توجه به مرحله رشد بطور متناسب تنظیم و کنترل گردید.

به منظور شبیه‌سازی گرد و غبار با استفاده از نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از مراکز مستعد تولید گرد و غبار و یک دستگاه تونل باد سیار^۱، گرد و غبار در محیط آزمایشگاهی گلخانه شبیه‌سازی شد. بخشی از محیط گلخانه‌ای مورد آزمایش به سه اتاقک مساوی تقسیم شد و در هر کدام ۵ نهال در داخل هر قسمت قرار گرفت. نمونه‌های شاهد نیز در خارج از اتاقک‌های گرد و غبار نگهداری شدند. طراحی فضای محیط آزمایش به گونه‌ای بود که ذرات گرد و غبار از اتاق اول وارد اتاق دوم و از آنجا وارد اتاق سوم می‌شدند. مدت اعمال گرد و غبار و اندازه غلظت آن، با توجه به نتایج شامسونی و همکاران [۱] و با تنظیم سرعت تونل باد سیار و طراحی منافذ در دیواره اتاقک‌ها به‌طور تجربی تنظیم شد.

در اتاقک اول ۱۵۰۰ میکروگرم بر متر مکعب، در اتاقک دوم ۷۵۰ میکروگرم بر متر مکعب و در اتاقک سوم ۳۵۰ میکروگرم بر متر مکعب تنظیم شد. انتخاب غلظت ۷۵۰ میکروگرم بر متر مکعب برای اتاق دوم براساس متوسط غلظت گرد و غبار در استان‌های غرب کشور بوده است. انتخاب ۳۵۰ میکروگرم بر متر مکعب براین اساس است که بیشتر از این مقدار نشان از شروع وضعیت بحرانی برای موجودات زنده و گیاهان می‌باشد. اندازه‌گیری ریزگردهای معلق در هوا در داخل اتاقک‌ها به کمک دستگاه غبارسنج مدل 176000A Microdust Pro Dust Monito صورت گرفته است.

این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری میزان ذرات معلق در هوا با غلظت‌های بین ۰/۰۰۱ تا ۲۵۰۰ میلی گرم بر مترمکعب را دارا می‌باشد و در آن، نور مادون قرمز نزدیک^۲ (NIR) با طول موج ۸۸۰ نانومتر بر نمونه تابانده می‌شود که در اثر برخورد نور تابیده شده با ذرات معلق، این نور پخش می‌شود. نور پخش شده متناسب با میزان غلظت ذرات بوده و به‌وسیله آشکارسازهای نور اندازه‌گیری می‌شود [۱۲]. مدلسازی تنش گرد و غبار طی دوره ۷۰ روز به‌صورت سه روز یکبار، یعنی ۲۰ روز گرد و غباری انجام گردید. شکل (۱) یک نمونه از هر تیمار را در پایان دوره تنش نشان می‌دهد.

^۱ Portable

^۲ Near Infra-Red

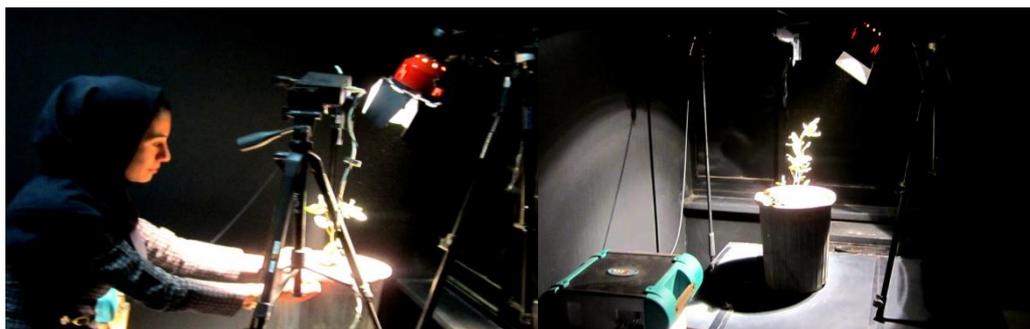


شکل (۱): نهال‌های دو ساله بلوط ایرانی تحت تنش گردوغبار شبیه‌سازی شده با غلظت (الف): ۰، (ب): ۳۵۰ میکروگرم بر متر مکعب، (ج): ۷۵۰ میکروگرم بر متر مکعب، (د): ۱۵۰۰ میکروگرم بر متر مکعب

۲-۲- اندازه‌گیری طیفی

پس از طی دوره تنش در گلخانه، نمونه‌ها به آزمایشگاه طیف‌سنجی منتقل شدند. اندازه‌گیری‌های طیفی از نمونه‌ها در اتاق تاریک به منظور جلوگیری از ورود نور اضافی و به حداقل رساندن اثرات تابش پراکنده با استفاده از دستگاه طیف‌سنج^۱ Fieldspec3 صورت گرفت. این دستگاه، اندازه‌گیری طیفی را در محدوده ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و نمونه‌گیری طیفی را با فاصله ۱/۴ نانومتر در محدوده ۱۰۰۰-۳۵۰ و ۲ نانومتر در محدوده ۲۵۰۰-۱۰۰۰ نانومتر انجام می‌دهد. حسگر فیبر نوری با میدان دید ۸ درجه در پیستول جایگذاری شد و با استفاده از سه پایه در ارتفاع ۹۰ سانتیمتری به‌طور عمود از سطح گلدان قرار گرفت. در این تنظیمات طیف‌سنج دارای میدان مشاهداتی دایره‌ای شکل، به قطر ۱۲/۵۸ سانتی‌متر در سطح گلدان است.

از لامپ هالوژن ۱۵۰ وات و با زاویه ۷۵ درجه و در ارتفاع ۹۵ سانتیمتری به عنوان منبع نور مصنوعی استفاده شد. با توجه به این‌که اندازه‌گیری‌های اولیه که به‌وسیله طیف‌سنج انجام می‌شود توسط نمونه و منبع نور تحت تاثیر قرار می‌گیرد. نقطه مرکز گلدان با مرکز نور و مرکز میدان دید^۲ تنظیم و اطمینان حاصل شد که FOV سنجنده به‌طور کامل توسط گلدان پوشش داده می‌شود. در این روش شرایط نوری ثابت بوده و میزان بازتابندگی متفاوت بسته به سطح برگ و شکل برگ گونه‌ها تغییر می‌نماید. به‌منظور دستیابی به یک میانگینی از اختلاف‌ها در جهات تاج‌پوشش^۳، پس از هر بار اندازه‌گیری، گلدان به اندازه ۴۵ درجه چرخانده و دوباره اندازه‌گیری انجام گرفت [۱۳]. در شکل (۲) نحوه انجام طیف‌سنجی نشان داده شده است.



شکل ۲: نحوه اندازه‌گیری طیفی در اتاق تاریک

۲-۳- پیش‌پردازش داده‌ها

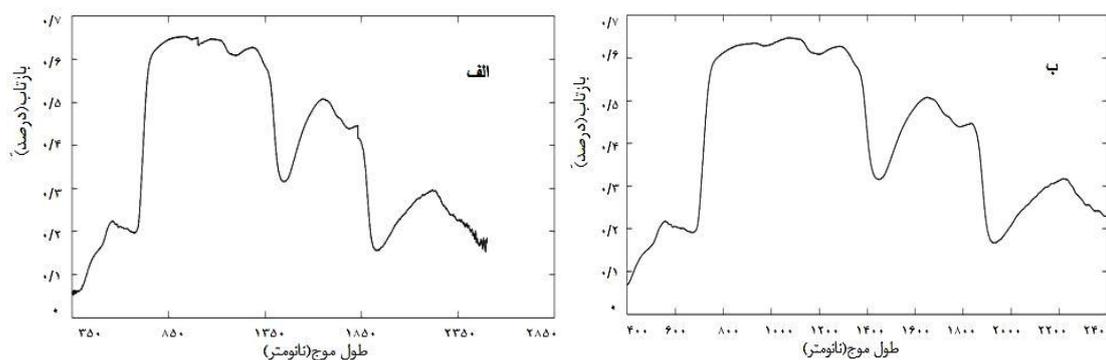
برای هر تاج‌پوشش از نمونه‌ها، ۵ الی ۸ تکرار در اندازه‌گیری طیفی بدست آمد. افتادگی در دو محدوده ۱۰۰۰ و ۱۸۳۰ نانومتر بدلیل تفاوت در جنس آشکارسازهای موجود در دستگاه طیف‌سنج می‌باشد که از طریق نرم‌افزار ViewSpecPro

^۱ Spectroradiometer

^۲ Field of View (FOV)

^۳ Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

اصلاح گردید. تمام طیف‌های بدست آمده به محیط نرم افزار MATLAB2015 منتقل شد. به دلیل میزان نویز بالا، محدوده‌های طیفی کمتر از ۴۰۰ نانومتر و بیش‌تر از ۲۴۰۰ نانومتر از تمام طیف‌ها حذف گردید و ۲۰۰۰ طول‌موج برای ادامه کار باقی ماند. فیلتر ساویزکی گولای^۱ [۱۴] با اندازه پنجره ۱۵ و چند جمله‌ای درجه ۲ [۶]، به منظور رفع خطاهای احتمالی دستگاه و شرایط اندازه‌گیری طیف‌های الکترومغناطیس بر روی ماتریس بازتاب‌های طیفی اجرا شد. سپس تمام داده‌ها وارد نرم‌افزار Unscrambler شده و با استفاده از تحلیل واریانس، تعدادی از منحنی‌های طیفی به عنوان داده‌های پرت حذف شدند. در نهایت از تکرارهای هر نمونه میانگین‌گیری شد و ۲۰ طیف از ۲۰ نهال اندازه‌گیری شده ایجاد شد. شکل (۳) یک منحنی طیفی قبل از پیش‌پردازش و بعد از پیش‌پردازش را در این مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۳: منحنی بازتاب طیفی (الف): ثبت شده با دستگاه طیف‌سنج (ب): پس از انجام پیش‌پردازش

۲-۴- شاخص‌های گیاهی باریک‌باند

شاخص‌های گیاهی، برای به حداکثر رساندن حساسیت به ویژگی‌های پوشش گیاهی و به حداقل رساندن عوامل محیطی مخدوش‌کننده مانند بازتاب خاک پس‌زمینه، جهت و یا اثرات جوی طراحی شده‌اند [۱۵] اغلب شاخص‌های موجود، تنها به یک ناحیه خاص یا یکی از ویژگی‌های اصلی فیزیولوژیکی مانند کلروفیل، محتوای آب، یا ساختار گیاهان مربوط است. اما استرس می‌تواند بر مناطق طیفی متفاوت و ویژگی‌های فیزیولوژیکی متفاوت اثرگذار باشد. بنابراین، این امر می‌تواند در توسعه شاخص‌ها بر اساس ترکیبی از باندهایی از مناطق طیفی حساس به ویژگی‌های مختلف گیاهان که متاثر از تنش هستند، مفید واقع شود [۱۶].

در این پژوهش با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، ۴ شاخص گیاهی باریک‌باند که رابطه خوبی را با پارامترهای بیوشیمیایی و بیوفیزیکی و استرس گیاه نشان داده‌اند، برای تمام حالات جفت‌بندی ممکن بین ۴۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر منحنی‌های طیفی محاسبه شد. شاخص‌های محاسبه شده در این تحقیق شامل دو شاخص نسبتی یعنی شاخص گیاهی اختلاف تفاضلی^۲ (DVI) و شاخص گیاهی اختلاف تفاضلی نرمال‌شده^۳ (NDVI) و دو شاخص تعدیل‌کننده اثر خاک یعنی دومین شاخص تعدیل‌کننده اثر خاک^۴ (SAVI2) و شاخص عمودی گیاهی^۵ (PVI) هستند. معادلات و منابع این شاخص‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. پس از محاسبه هر یک شاخص‌ها در تمامی جفت طول‌موج‌های ممکن، همبستگی آن‌ها با میزان غلظت تنش اعمال شده محاسبه گردید. سپس بیشترین میزان همبستگی و جفت طول موج مربوطه آن و همچنین محدوده‌های دارای همبستگی بالا مشخص شدند.

¹ Savitzky and Golay

² Difference Vegetation Index

³ Normalized Difference Vegetation Index

⁴ Second soil Adjusted Vegetation Index

⁵ Perpendicular Vegetation Index

جدول ۱: معادله شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در پژوهش حاضر. ρ نشان دهنده بازتاب، λ_1 و λ_2 طول موج و a و b ضرایب به دست آمده از خط خاک با استفاده از دو طول موج λ_1 و λ_2 است.

نام اختصاری	شاخص گیاهی	فرمول محاسبه شده	مرجع
DVI	شاخص اختلاف تفاضلی	$\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}$	ریچاردسون و اورت
NDVI	شاخص اختلاف تفاضلی نرمال شده	$\frac{\rho_{\lambda_1} - \rho_{\lambda_2}}{\rho_{\lambda_1} + \rho_{\lambda_2}}$	رئوز و همکاران (۱۹۷۴)
PVI	شاخص طیفی عمودی	$\frac{\rho_{\lambda_1} - a\rho_{\lambda_2} - b}{\sqrt{1 + a^2}}$	ریچاردسون و وای گند (۱۹۷۷)
SAVI2	دومین شاخص تعدیل کننده اثر خاک	$\frac{\rho_{\lambda_1}}{\rho_{\lambda_2} + (b/a)}$	میجر و همکاران (۱۹۹۰)

۲-۵- اعتبارسنجی پیش‌بینی غلظت گرد و غبار با استفاده از شاخص‌های باریک‌باند

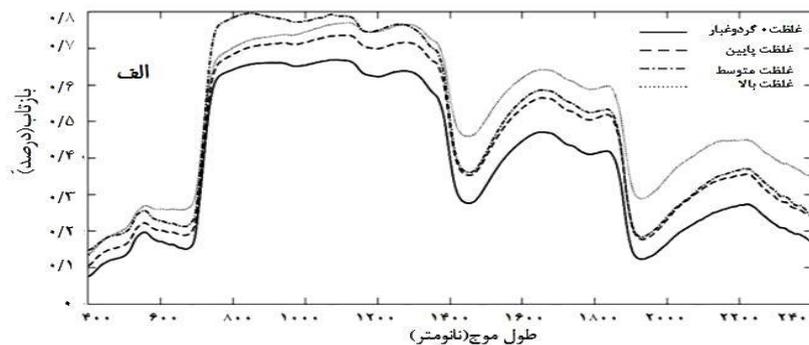
مدل‌های رگرسیونی، روش‌های تجربی معمولی برای ارتباط دادن متغیرهای گیاهی و داده‌های بدست‌آمده از سنجش از دور به شمار می‌آیند [۱۷]. در این تحقیق برای یافتن این ارتباط، از رگرسیون خطی استفاده گردید و ارزیابی صحت تخمین غلظت گردوغبار با استفاده از شاخص‌های باریک‌باند با استفاده از روش اعتبار متقابل^۱ (Cross validation) شد. در روش Cross validation، که یک روش آماری برای ارزیابی الگوریتم‌های تعلیمی می‌باشد، هر یک از نمونه‌ها با استفاده از نمونه‌های دیگر تخمین زده می‌شوند. در این پژوهش، برای ۲۰ نمونه، هر بار مدل رگرسیونی برای ۱۹ مشاهده اجرا می‌شود و غلظت گردوغبار نمونه مورد پیش‌بینی و میزان خطای آن محاسبه می‌شود. برای اعتبارسنجی مدل در این پیش‌بینی، از روش ریشه میانگین مربعات خطای نسبی اعتبار متقاطع^۲ (RMSE_{CV}) استفاده شد. RMSE_{CV} با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$RMSE_{CV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

۳- نتایج و بحث

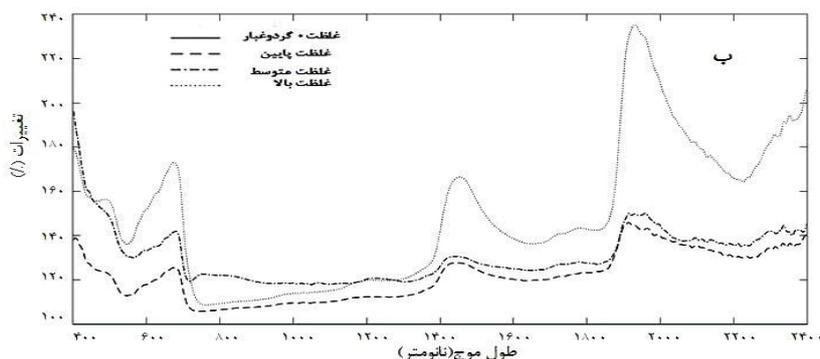
۳-۱- اثر تنش گرد و غبار بر منحنی بازتاب طیفی

به منظور نمایش اثر گردوغبار بر الگوی رفتار طیفی نهال بلوط ایرانی، از تکرار نمونه‌های طیفی مربوط سطوح تنش میانگین گیری شد و در شکل (۴)، به دو صورت منحنی رفتار طیفی و تغییرات سطوح تنش نسبت به سطح شاهد نمایش داده شده است.



¹ Cross Validation

² Cross-Validated Root Mean Square Error



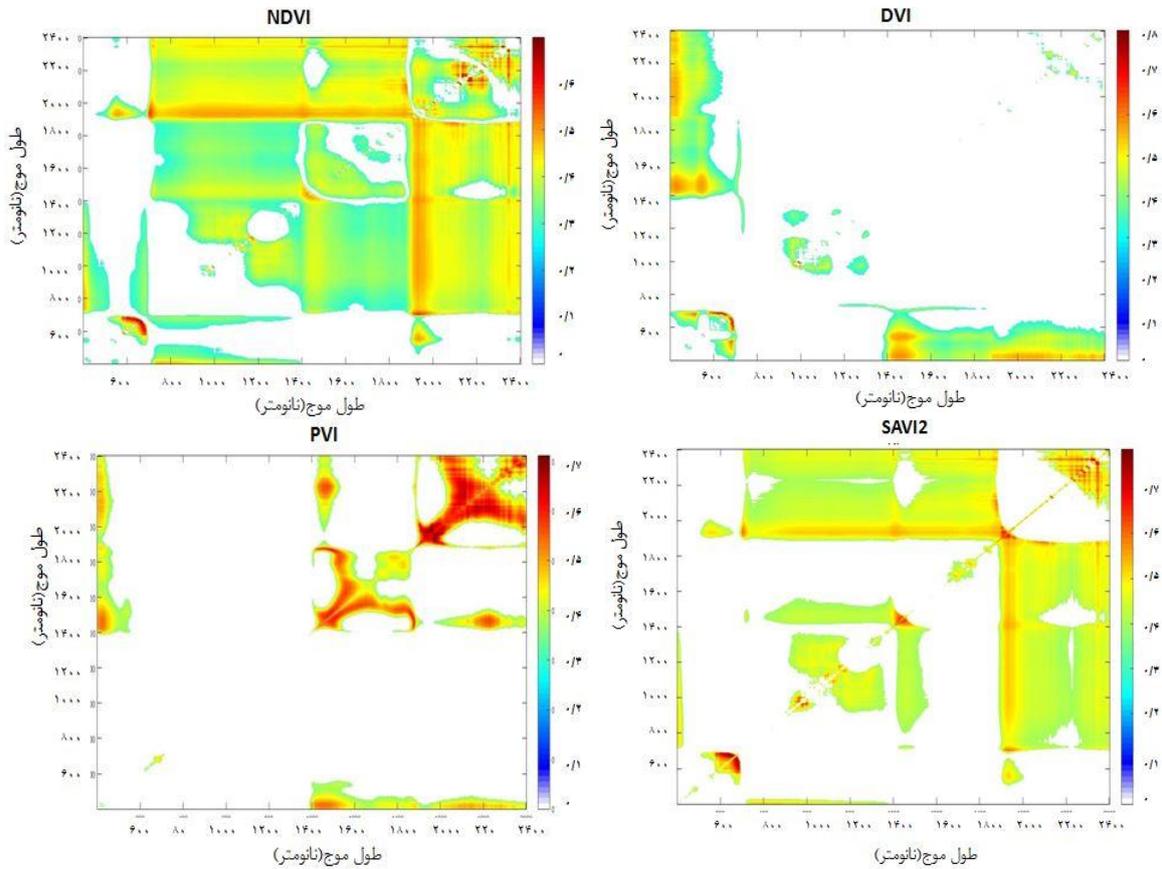
شکل ۴: (الف) منحنی رفتار طیفی و (ب) تغییرات بازتاب طیفی نهال‌ها در غلظت‌های گرد و غبار (بدون گرد و غبار یا شاهد)، ۳۵۰ و ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر متر مکعب

تفسیر بصری این الگوی طیفی نشان می‌دهد که میزان بازتاب در تمام طول موج‌ها با افزایش غلظت گردوغبار اعمال شده تغییری افزایشی یافته است. این تغییرات به ترتیب در پیک‌های جذب آب بارز محدوده ۲۱۷۰-۱۸۷۰، پیک جذب کلروفیل قرمز محدوده ۷۵۰-۵۵۰ نانومتر، پیک جذب آب محدوده ۱۶۰۰-۱۳۷۰ نانومتر بیشترین مقدار و در محدوده NIR کمترین و نامنظم‌ترین تغییر را دارند. به طور کلی تغییرات در طول موج‌های محدوده SWIR بیشترین مقدار را دارد.

۳-۲- ارتباط شاخص‌های باریک‌باند با تنش گرد و غبار

برای یافتن رابطه تنش گرد و غبار با شاخص‌های گیاهی، ابتدا شاخص‌ها برای مقادیر بازتاب تمامی حالات دوتایی ممکن از طول موج‌ها در ۲۰۰۰ طول موج طیفی بین ۴۰۰ تا ۲۴۰۰ نانومتر محاسبه گردید. سپس رگرسیون بین شاخص ایجاد شده و مقادیر تنش، اندازه‌گیری و ضریب قطعیت بین آن‌ها بدست آمد. نتایج ضریب قطعیت بین این دو پارامتر به صورت ماتریس 2000×2000 و پلات دو بعدی در آمد. با توجه به ضریب قطعیت (R^2) بدست آمده، بهترین جفت‌باند و بهترین ناحیه جهت ایجاد مناسب‌ترین شاخص‌های باریک‌باند از این ماتریس‌ها استخراج شد. در ادامه، این ارتباط در پلات‌های دو بعدی نمایش داده شده است. به صورتیکه نواحی طیفی به ترتیب از رنگ سرد به رنگ گرم، از R^2 پایین به R^2 بالا نمایش داده شده است (شکل ۵).

بر اساس شکل (۴)، طول موج‌هایی که در آزمایش بیشتر تحت تاثیر استرس قرار گرفته اند یا به عبارتی دیگر دارای ضریب R^2 بالاتری هستند، رنگ مایل به قرمز تیره را به خود اختصاص داده‌اند و محدوده‌هایی از طول موج که همبستگی کمتری با میزان غلظت گردوغبار داشته‌اند به رنگ روشن‌تر نشان داده شده است. ضمن اینکه مقادیر دارای $R^2 > (0.5 \times \text{حداکثر } R^2)$ در هر شاخص صفر در نظر گرفته شده‌اند و در واقع پلات‌ها نشان‌دهنده محدوده‌های مهم و تاثیرپذیر از تنش گردوغبار می‌باشند. اهمیت این موضوع در بررسی تصاویر ماهواره‌های ابرطیفی و هایپراسپیکترال منطقه خاصی از سطح زمین که تحت تنش گردوغبار است می‌باشد و حتی می‌توان برای طراحی باندهای سنجنده‌ها به منظور تشخیص گیاهان تحت گرد و غبار از نتایج این مطالعه استفاده کرد.



شکل ۵: نمایش دو بعدی میزان R^2 بین شاخص‌های باریک‌باند و مقادیر تنش، به صورت تیکه مقادیر $R^2 > (0.5 \times \text{حداکثر } R^2)$ در هر شاخص صفر در نظر گرفته شده است.

بر اساس تصاویر پلات‌های دوبعدی به دست آمده از آزمایش مشاهده شد که محدوده طیفی SWIR و مرئی بیشترین و محدوده NIR کمترین میزان R^2 را برای نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده‌اند. صحت تخمین میزان گردوغبار توسط شاخص‌های باریک‌باند با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع ارزیابی شد. در این روش پارامترهای R^2_{CV} و $RMSE_{CV}$ به دست آمده، میزان صحت آزمایش را نشان می‌دهد. با استفاده از این روش، بهترین شاخص برای بررسی تاثیر گردوغبار بر روی گیاه مشخص می‌شود. در این روش مقادیر R^2_{CV} و $RMSE_{CV}$ به دست آمده، میزان دقت آزمایش را نشان می‌دهد. با استفاده از این روش هم بهترین شاخص برای بررسی تاثیر گردوغبار بر روی گیاه مشخص می‌شود و هم گونه‌هایی که بیشترین همبستگی را داشته‌اند مشخص می‌شود. بیشترین R^2 بدست آمده و بهترین ترکیبات باندی جهت محاسبه شاخص‌ها و نتایج اعتبارسنجی آن‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: موقعیت بهترین باندها و مقادیر R^2 برای تخمین غلظت گردوغبار

VI	λ_1 (nm)	λ_2 (nm)	R^2	R^2_{cv}	$RMSE_{cv}$
DVI	۹۸۸	۹۹۷	۰/۸۰	۰/۷۵	۰/۲۷
NDVI	۲۱۹۸	۲۲۱۶	۰/۷	۰/۶۴	۰/۳۳
PVI	۱۹۵۶	۱۹۷۵	۰/۷۱	۰/۶۴	۰/۳۳
SAVI2	۶۴۶	۶۷۶	۰/۷۹	۰/۷۴	۰/۲۸

همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده است، باندهای بهینه معرفی شده شاخص‌های مذکور، در محدوده طیفی SWIR و مرئی می‌باشند. از بین شاخص‌های محاسبه شده، شاخص نسبتی DVI ارتباط بالایی ($R^2=0/8$) در محدوده NIR و مرئی با مقادیر تنش نشان داده است و همچنین دارای صحت بالاتری ($RMSE_{cv}=0/27$ و $R^2_{cv}=0/75$) نسبت به دیگر شاخص‌هاست. سپس به ترتیب شاخص SAVI2 در محدوده مرئی، شاخص PVI در محدوده طیفی SWIR و در آخر شاخص NDVI در محدوده طیفی SWIR ارتباط خوبی را با مقادیر تنش نشان داده‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از جمع‌آوری داده‌های آزمایشی طیف‌سنجی، به منظور استخراج اطلاعات و بررسی رفتار بازتابندگی نهال بلوط ایرانی تحت تنش گردوغبار استفاده شده است. برای اندازه‌گیری طیفی از دستگاه اسپکترورادایومتر Fieldspec3 استفاده شد. در بازتابندگی نهال بلوط، تحت تاثیر گردوغبار با غلظت‌های مختلف، تغییرات قابل توجهی مشاهده شد. به علت اینکه گیاهان موجودات زنده و بسیار تاثیرپذیر از عوامل محیطی هستند، هر گیاه به صورت منفرد بخصوص در گیاهان درختی، دارای رفتار خاص خود هستند اما با فرض اینکه نهال‌های دو ساله‌ی مورد آزمایش در شرایط یکسان، اثرات مشابهی در طیف خود بجای می‌گذارند، الگوی رفتار طیفی تکرارهای هر نمونه میانگین‌گیری شده و سپس میانگین نمونه‌های تحت مقادیر یکسان تنش برای مقایسه سطوح مختلف تنش استفاده شدند. بنابراین تفسیر بصری این الگوی طیفی ممکن است به تنهایی دارای خطای بالایی باشد. در نتیجه از شاخص‌های گیاهی برای مدلسازی اثر گردوغبار استفاده شد. نتایج نشان داد شاخص نسبتی DVI و شاخص تعدیل‌کننده اثر خاک SAVI2 به عنوان مناسب‌ترین شاخص برای مطالعه اثر گردوغبار بر بلوط ایرانی هستند و جفت باندهای بهینه معرفی شده آن‌ها به ترتیب در محدوده‌های جذب آب (باند مرکزی جذبی ۹۷۰ در بسیاری از مطالعات به عنوان باند حساس به میزان آب انتخاب شده) و جذب کلروفیل قرمز می‌باشد.

مراجع

- [1] A. Shahsavani, K. Naddafi, and N. J. Haghighifard, "Characterization of ionic composition of TSP and PM 10 during the Middle Eastern Dust (MED) storms in Ahvaz , Iran," pp. 6683–6692, 2012.
- [2] G. B. Bonan, "Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests.," Science (80-.), vol. 320, no. 5882, pp. 1444–1449, 2008.
- [۳] م. ر. م. مهاجر، جنگل‌شناسی و پرورش جنگل. انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
- [4] G. G. , Wang, "Effects of prescribed fires on the first-year establishment of white oak (Quercus alba L.) seedlings in the Upper Piedmont of South Carolina, USA.," For. Ecol. Manage., p. 328_337, 2005.
- [5] G. P. Asner, "Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance (vol 64, pg 234, 1997)," Remote Sens. Environ., vol. 64, no. 2, p. 234, 1997.
- [6] R. Darvishzadeh, Hyperspectral remote sensing of vegetation parameters using statistical and physical models, vol. Ph.D. 2008.
- [7] Y. Kim, D. M. Glenn, J. Park, H. K. Ngugi, and B. L. Lehman, "Hyperspectral image analysis for water stress detection of apple trees," Comput. Electron. Agric., vol. 77, no. 2, pp. 155–160, 2011.
- [8] Z. Wang, A. K. Skidmore, T. Wang, R. Darvishzadeh, and J. Hearne, "Applicability of the PROSPECT model for estimating protein and cellulose + lignin in fresh leaves," Remote Sens. Environ., vol. 168, no. July, pp. 205–218, 2015.
- [9] R. A. Bigler C., Bräker O.U., Bugmann H., Dobbertin M., "Drought as an inciting mortality factor in Scots Pine stands of the Valais, Switzerland.," Ecosystems, p. 9, 2006.
- [10] A. Das, J. Battles, P. J. Van Mantgem, and N. L. Stephenson, "Spatial Elements of Mortality Risk in Old-Growth Forests Author (s): Adrian Das , John Battles , Phillip J . van Mantgem and Nathan L . Stephenson Published by : Wiley Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/27650680> REFERENCES Linked references are av," vol. 89, no. 6, pp. 1744–1756, 2016.

- [11] A. Ramoelo, S. Dzikiti, H. Van Deventer, A. Maherry, M. Azong, and M. Gush, "Potential to monitor plant stress using remote sensing tools," *J. Arid Environ.*, vol. 113, pp. 134–144, 2015.
- [12] T. Masila, M. O. Udoto, and J. Obara, "Manuscript Info," vol. 3, no. 2, pp. 95–104, 2015.
- [۱۳] ح. بهرامی, "بررسی تاثیر ریزگردها بر بازتابندگی طیفی تاج پوشش گندم." سنجش از دور و GIS ایران, ۱۳۹۴.
- [14] M. J. E. G. Abraham. Savitzky, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures," *Anal. Chem.*, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639, 1964.
- [15] H. Fang and S. Liang, *Leaf Area Index Models*, no. January. Elsevier Inc., 2008.
- [16] S. Hamzeh, A. A. Naseri, S. K. Alavipanah, B. Mojaradi, H. M. Bartholomeus, J. G. P. W. Clevers, and M. Behzad, "International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Estimating salinity stress in sugarcane fields with spaceborne hyperspectral vegetation indices," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 21, pp. 282–290, 2013.
- [۱۷] م. میرزایی, "انتخاب شاخص های فراطیفی (باریک باند) بهینه برای تخمین محتوای آبی گیاهان, با در نظر گرفتن شرایط متفاوت تراکم تاج پوشش گیاه و خاک پس زمینه," سنجش از دور و GIS ایران, ۱۳۹۰ جلد ۳, شماره ۱, ص ۱۹-۱.