

بررسی تاثیر تفاوت توابع حساسیت طیفی سنجنده سنتینل-۲ با سنجنده‌های مختلف ماهواره‌ای، در مطالعات سری زمانی شاخص‌های طیفی به‌منظور پایش پوشش گیاهی

صدرا ایمانی فر^۱، مهدی حسنلو^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۲

چکیده

پایش کمی و کیفی پوشش‌های گیاهی از کاربردهای اصلی دانش سنجش‌ازدور می‌باشد. تشخیص روند تغییرات پوشش گیاهی، مخصوصاً در مقیاس جهانی و منطقه‌ای نیازمند مطالعات بلندمدت؛ فراتر از طول عمر یک ماهواره، می‌باشد. از سوی دیگر ترکیب داده‌های سنجنده‌های مختلف می‌تواند منجر به پیدایش تغییرات کاذب در مقادیر بازتابش بانندی و به دنبال آن شاخص‌های طیفی گردد. از مهم‌ترین دلایل تغییرات کاذب در مطالعات چندسنجنده‌ای، تفاوت تابع حساسیت طیفی سنجنده‌های مورد مطالعه است. در این شرایط باید با انجام کالیبراسیون نسبی، حتی‌الامکان تاثیر این عامل را کاهش داد. در این تحقیق با به‌کارگیری روابط چندجمله‌ای، کالیبراسیون سنجنده‌های لندست (OLI,ETM+,ETM) و اسپات-۵ (HRG) نسبت به سنجنده سنتینل-۲ با هدف حذف تغییرات کاذب، صورت پذیرفته است. در این میان از مدل‌های انتقال تابش PROSPECT4 و 4SAIL جهت شبیه‌سازی منحنی‌های رفتار طیفی و به دنبال آن از مدل اختلاط طیفی خطی برای اضافه نمودن اثر خاک، استفاده شد. سپس مقادیر شاخص‌های طیفی که در زمینه پوشش گیاهی کاربرد (NDWI,EVI,NDVI) هستند و باندهای بازتابشی مورد نیاز برای محاسبه آن شاخص‌ها (آبی، قرمز، فروسرخ نزدیک، فروسرخ کوتاه)، برای هر یک از رفتارهای طیفی شبیه‌سازی شدند. بررسی‌ها نشان داد معادلات خطی به‌خوبی می‌توانند مقادیر سنجنده‌های مختلف را نسبت به سنجنده MSI کالیبره نمایند. به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، از اندازه‌گیری‌های سنجنده هوایی AVIRIS به همراه بخشی از داده‌های شبیه‌سازی شده، بهره‌برداری شد. طبق نتایج در میان شاخص‌ها، انجام پیش‌پردازش کالیبراسیون نسبی، برای شاخص EVI، از ضرورت بیشتری برخوردار است و در طرف مقابل در میان مقادیر بازتابشی، باند فروسرخ از همبستگی بالاتری نسبت به سایر مقادیر برخوردار است. مقادیر معیارهای R^2 و NRMSE به‌دست‌آمده، گویای این نکته‌اند که مقادیر باندهای بازتابشی و شاخص‌های گیاهی از هماهنگی بالایی برخوردار هستند به‌طوری‌که حتی در برخی از موارد، عدم اعمال کالیبراسیون نسبی، ممکن است اختلالی به سری زمانی وارد نسازد.

کلیدواژه‌ها: کالیبراسیون نسبی، تابع حساسیت طیفی، سنتینل-۲، پایش پوشش گیاهی.

*نویسنده مکاتبه کننده: تهران، کارگرمالی، بالاتر از جلال آل احمد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، طبقه یک

تلفن: ۶۱۱۱۴۵۲۵

Email: hasanlou@ut.ac.ir

۱- مقدمه

از کاربردهای اصلی دانش سنجش از دور که ابزار آن تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد، پایش روند تغییرات اجزای مختلف محیط‌زیست بشر است [۱]. پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای محیط‌زیست، حدود ۷۰ درصد از سطح خشکی‌ها را دربرگرفته است [۲]. پوشش‌های گیاهی در چرخه‌های اقلیمی، چرخه‌های هیدرولوژی و به‌طور کلی‌تر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی، از اهمیت قابل توجهی برخوردار هستند [۳]. بنابراین، نظارت بر روند تغییرات پوشش‌های گیاهی چه در بعد کمی و چه در بعد کیفی، اهمیت بالایی دارد. در میان روش‌های مختلف برای دستیابی به این مهم، تصاویر ماهواره‌ای، امکان مناسبی را جهت نظارت مداوم ایجاد نموده‌اند [۴]. سنجنده‌های فضابرد اپتیکی، رفتار طیفی پوشش‌های گیاهی را با توان تفکیک‌های مختلفی (از دیدگاه طیفی) اندازه‌گیری می‌کنند. رفتار طیفی، گویای نکات متعددی راجع به میزان فعالیت، سلامت و همچنین پارامترهای مختلف بیوفیزیکی پوشش‌های گیاهی است. از جمله روش‌های پایش پوشش گیاهی توسط تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از شاخص‌های طیفی در طی زمان می‌باشد [۵]، که به دلایل مختلف مانند سادگی الگوریتم‌ها با اقبال قابل توجهی در جوامع سنجش از دوری روبرو بوده است. بررسی روند تغییرات پوشش‌های گیاهی مخصوصاً در سطوح جهانی و منطقه‌ای، نیازمند داده‌هایی در مقیاس‌های زمانی بزرگ (چندین دهه) می‌باشد، به‌طوری‌که از محدوده زمانی فعالیت یک ماهواره سنجشی بیشتر خواهد بود. با توجه به این واقعیت استفاده از چندین سنجنده و ترکیب داده‌های آن‌ها، برای شکل‌گیری سری زمانی، ضروری به نظر می‌رسد. اما ترکیب داده‌های سنجنده‌های مختلف، چه در سطح مقادیر بازتابش و چه در سطوح پردازشی بالاتر (شاخص‌های طیفی) با چالش‌های متعددی

روبروست که علت آن، عدم هماهنگی میان سنجنده‌های مختلف از دیدگاه‌های متفاوت می‌باشد [۳ و ۶]. این ناهماهنگی‌ها می‌توانند در مواردی همچون: زمان تصویربرداری (و به دنبال آن وضعیت اتمسفر در لحظه تصویربرداری، نوردهی خورشید)، زاویه دید نسبت به منطقه، میزان خطای موجود در کالیبراسیون رادیومتریک، میزان خطای موجود در فرآیند زمین‌مرجع‌سازی و تابع حساسیت طیفی مربوط به باند یکسان؛ به وقوع بپیوندند [۶]. به بیانی ساده، ایراد در این است که تمامی ناهماهنگی‌های فوق می‌توانند باعث ایجاد تغییراتی در سری زمانی (از یک دوره زمانی به دوره زمانی بعد) گردند، در صورتی که پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه، هیچ‌گونه تغییری را تجربه نکرده و صرفاً سنجنده مورد استفاده تغییر نموده است [۶]. تغییرات رخ داده در سری زمانی که به دلیلی غیر از موضوع مورد بررسی باشند، را می‌توان تغییرات کاذب یا مصنوعی دانست.

روش اصولی برای محاسبه شاخص‌های طیفی بدین صورت است که باید ابتدا درجات خاکستری^۱ به بازتابندگی بالای اتمسفر^۲ تبدیل شده و سپس با حذف اثر اتمسفر، بازتابش سطح محاسبه گردد. بعد از این مرحله می‌توان شاخص‌های مختلف را محاسبه نمود. در ادامه با در کنار هم قرار دادن تصاویر به‌دست آمده از شاخص‌ها؛ به‌طوری‌که تطابق هندسی^۳ میان آن‌ها محقق شده باشد، سری زمانی شکل خواهد گرفت. طی نمودن مسیر پردازشی مذکور برای دستیابی به سری زمانی، اثر اکثر عوامل پیدایش تغییرات کاذب را جبران و خنثی می‌سازد؛ اما در این بین، تاثیر تابع حساسیت طیفی کماکان باقیست. تا به امروز، سری سنجنده‌های مربوط به

¹ Digital number

² Top of atmosphere radiance

³ Registration

(مربوط به ماهواره سنتینل-۲)، به‌عنوان هدف در نظر گرفته شده است.

تاکنون محققین متعددی در این حوزه از پژوهش (بررسی هماهنگی میان سنجنده‌ها)، فعالیت نموده‌اند و سنجنده‌های مختلف را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که در این مقاله به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. تریشچنکو^۶ و همکاران [۸] دریافتند که تاثیر تابع حساسیت طیفی بر ناهماهنگی مقادیر بازتابش سطحی و بازتابش بالای اتمسفر و شاخص NDVI^۷، حتی در میان سنجنده‌های مجموعه AVHRR^۸ مقدار قابل توجهی است، به گونه‌ای که می‌توان آن را مدلسازی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که با در نظر گرفتن سنجنده AVHRR/NOAA-9 به‌عنوان مرجع، اختلاف در مقدار بازتابش باندهای قرمز و فروسرخ به ترتیب برابر با ۲۵٪ تا ۱۲٪ و ۲٪ تا ۴٪ می‌باشد. همچنین مقدار مطلق تغییرات در شاخص NDVI از ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ گزارش شده است. تحقیق دیگری نیز توسط پژوهشگر مذکور در همین زمینه صورت پذیرفته است که طی آن، این بررسی‌ها برای ماهواره‌های اخیر AVHRR نیز صورت گرفته است [۹]. ناهماهنگی‌هایی این‌چنینی میان سنجنده‌های AVHRR و سایر سنجنده‌های مورد استفاده برای پوشش گیاهی، نیز وجود دارد و در تحقیقات متعدد دیگری به آن پرداخته شده است. به‌عنوان نمونه در [۸ و ۱۰] محققین، ترکیب داده‌های سنجنده‌های AVHRR و Vegetation را مورد بررسی قرار داده‌اند و همچنین [۱۲، ۱۱، ۸ و ۵] تشکیل سری زمانی از داده‌های مادیس (Modis^۹) به همراه AVHRR مورد تحقیق بوده است. گونتر^{۱۰} و مایر^۱ نیز در تحقیقی

ماهواره‌های لندست (سنجنده‌های TM^۱ و ETM^۲+ و OLI^۳) که از نقطه آغازین آن بیش از ۳۰ سال می‌گذرد؛ از سنجنده‌های پرکاربرد در زمینه پایش پوشش گیاهی بوده‌اند. با ارسال ماهواره سنتینل-۲ (حامل سنجنده MSI^۴) در اواسط سال ۲۰۱۵، گزینه مشابهی پیش روی محققان قرار گرفته است. در فرآیند طراحی و کالیبراسیون سنجنده MSI، سعی بر این بوده است که با سری تصاویر لندست، هماهنگی وجود داشته باشد، به‌طوری‌که در این راستا همکاری‌هایی میان آژانس فضایی اروپا (ایسا) و سازمان هوا فضای آمریکا (ناسا) صورت گرفته است. بنابراین، انتظار می‌رود که در آینده پیش رو، تحقیقات متعددی در زمینه ترکیب داده‌ها و محصولات سنتینل-۲ و لندست، به‌منظور کاربردهای مختلف، صورت گیرد. از طرف دیگر آژانس فضایی کشور فرانسه نیز از حدود ۳۰ سال پیش، اولین حلقه از زنجیره ماهواره‌های اسپات را در مدار قرار داد که این زنجیره تا به امروز ادامه یافته و به اسپات ۶ و اسپات ۷ رسیده است. در این میان سنجنده سنتینل-۲، شباهت‌هایی از حیث توان تفکیک مکانی و پارامترهای مداری (زاویه میل)، با سنجنده اسپات ۵ دارد. اتفاقاً زمان شروع کار سنتینل-۲ و پایان فعالیت اسپات ۵ تقریباً در یک بازه زمانی قرار می‌گیرند (اواسط سال ۲۰۱۵). بنابراین داده‌های سنتینل-۲، از ظرفیت خوبی برای ادامه سری زمانی داده‌های اسپات ۵، برخوردارند [۷]. در پژوهش پیش‌رو، بررسی هماهنگی مقادیر (بازتابشی و طیفی) سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI (مربوط به ماهواره‌های لندست) و سنجنده HRG1^۵ (مربوط به ماهواره اسپات ۵) با سنجنده

⁶ Trishchenko

⁷ Normalized Difference Vegetation Index

⁸ Advanced Very High Resolution Radiometer

⁹ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

¹⁰ GUNTHER

¹ Thematic Mapper

² The Enhanced Thematic Mapper Plus

³ Operational Land Imager

⁴ Multispectral Imager

⁵ High Geometric Resolution

ماهواره اسپات-۵) با سنجنده MSI (مربوط به ماهواره سنتینل-۲) می‌باشد.

پس از مقدمه که در بخش اول ارائه شده است، در بخش دوم تحقیق، چهارچوب نظری پژوهش مورد بحث قرار گرفته است. در طی این بخش، به مباحثی همچون مدل‌های انتقال تابش و مدل اختلاط طیفی و روش‌های تحلیل حساسیت پرداخته شده است. سپس در بخش سوم، توضیحاتی در ارتباط با روند پیاده‌سازی و جزئیات آن ارائه شده است. در این بخش اشاره شده است که برای دستیابی به هدف پژوهش، وجود تعداد قابل توجهی رفتار طیفی، مربوط به حالات مختلف پوشش‌های گیاهی ضروری می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های انتقال تابش در مقیاس‌های برگ (مدل پراسپکت ۴^۷ [۱۴]) و تاج پوشش (مدل فورسیل^۸ [۱۵])، مجموعه عظیمی از رفتارهای طیفی پوشش‌های گیاهی شبیه‌سازی شده است. برای انجام فرآیند شبیه‌سازی، ورودی‌های متعدد مربوط به مدل‌های فوق، باید مقداردهی شوند. پیش از تعیین مقادیر ورودی مدل‌ها، تحلیل حساسیت به‌منظور توجیه منطقی مقادیر ورودی، صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، رفتار طیفی خاک نیز با رفتارهای طیفی پوشش‌های گیاهی، ترکیب می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از توابع حساسیت طیفی باندهای آبی، قرمز، فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ کوتاه؛ مقادیر بازتابش بانندی و به دنبال آن شاخص‌های طیفی، شبیه‌سازی می‌گردند. شاخص‌های طیفی مورد بررسی در این تحقیق به‌گونه‌ای انتخاب شدند که دو بعد مهم از پوشش‌های گیاهی را دربرگیرند که عبارتند از سبزی‌نگی (EVI, NDVI) و رطوبت (NDWI). در نهایت با در نظر گرفتن سنجنده MSI به‌عنوان مرجع، ضرایب معادلات کالیبراسیون (که در طی آن مقادیر سایر سنجنده‌ها نسبت به سنجنده

هماهنگی میان داده‌های سنجنده^۲ MERIS را با AVHRR مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳]. گونسامو^۳ و چن^۴ در تحقیق دیگری به مقایسه مقادیر بازتابش باندهای قرمز، فرورسرخ، فرورسرخ کوتاه و همچنین شاخص NDVI برای ۲۱ سنجنده مختلف پرداخته‌اند [۳]. همچنین در پژوهش دیگری ترکیب داده‌های سنتینل-۲ با سایر سنجنده‌ها برای تشکیل سری زمانی شاخص NDVI مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. تحقیقات فوق و به‌طور کلی اکثر قریب به‌اتفاق تحقیقات این حوزه، بیشتر بر روی سری زمانی شاخص‌های گیاهی (توصیف‌کننده سبزی‌نگی پوشش گیاهی مخصوصاً NDVI) متمرکز بوده‌اند و به شاخص‌های طیفی که توصیف‌کننده رطوبت پوشش‌های گیاهی هستند (همچون NDWI^۵) آن‌گونه که باید پرداخته نشده است. بنابراین در تحقیق پیش‌رو این شاخص نیز، مورد بررسی قرار گرفته است. تمایز دیگر موجود در این تحقیق این است که تمرکز روی سنجنده‌های باتوان تفکیک متوسط می‌باشد و در این راستا سعی شده است که تمام سنجنده‌های سری لندست که در سه دهه اخیر در مدار قرار گرفته‌اند و سنجنده اسپات-۵ نسبت به سنجنده نوظهور سنتینل-۲، مورد بررسی قرار گیرند که طبق بررسی‌های صورت گرفته، تا کنون به این مجموعه از سنجنده‌ها، در یک پژوهش، پرداخته نشده است. البته باید توجه داشت که در مطالعات داخلی نیز چندان به این مسئله پرداخته نشده است. هدف این پژوهش، بررسی هماهنگی مقادیر (بازتابشی و طیفی) سنجنده‌های TM⁺، ETM⁺ و OLI (مربوط به ماهواره‌های لندست) و سنجنده HRG1^۶ (مربوط به

^۱ MAIER

^۲ Medium Resolution Imaging Spectrometer

^۳ Gonsamo

^۴ Chen

^۵ Normalized Difference Water Index

^۶ High Geometric Resolution

^۷ PROSPECT4

^۸ 4SAIL

مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹]. این مدل بر مبنای مدل تعمیم یافته صفحه‌ای، ارائه شده توسط آلن^۲ [۲۰]، بنا شده است [۲۱]. در مدل آلن، برگ به صورت یک یا چند صفحه جاذب، با سطحی ناهموار در نظر گرفته می‌شود به طوری که امواج تابیده شده به صورت ایزوتروپیک بازتاب می‌شوند [۱۶]. به طور کلی ورودی‌های این مدل به دو دسته تقسیم می‌شوند: (۱) پارامتر ساختاری برگ (N) که همان تعداد لایه‌های تشکیل دهنده برگ می‌باشد. (۲) پارامترهای بیوشیمیایی برگ که از این جمله می‌توان به تراکم رنگدانه‌ها ($CHab$) در برگ اشاره داشت [۱۶].

در مقیاس تاج پوشش گیاهی نیز مدل‌های متعددی ارائه شده‌اند که در این تحقیق از مدل فورسیل استفاده شده است. در واقع مدل فورسیل یکی از حلقه‌های پایانی از زنجیره مدل‌هایی است که در سال ۱۹۸۱ میلادی با مدل سیل [۲۲ و ۲۳] آغاز شده و پس از آن به صورت متوالی به مدل‌های دیگری با عناوین سیل اچ^۳ [۲۴] و ژئو سیل^۴ و سیل پلاس پلاس^۵ و فورسیل و فورسیل^۲ توسعه پیدا کرده‌اند. این مدل نیازمند داشتن اطلاعاتی پیرامون خصوصیات طیفی پوشش گیاهی (خروجی مدل پراسپکت) و پشت زمینه آن (خاک یا چمن یا برف یا ..) می‌باشد. علاوه بر موارد فوق تعیین هندسه سنجنده شیئی-خورشید (وضعیت زاویه ارتفاعی خورشید و سنجنده و آزیموت نسبی این دو) و مقداردهی به پارامترهای توصیف کننده پوشش گیاهی، در سطح تاج پوشش (ALA^6 و LAI^7) و چند پارامتر دیگر نیز ضرورت دارد. پس از تعیین این موارد، فورسیل می‌تواند منحنی بازتابش تاج پوشش را در یک جهت مشخص شبیه‌سازی نماید. علاوه بر این

MSI کالیبره می‌شود)، به دست می‌آیند. در بخش چهارم پژوهش نیز اعتبارسنجی نتایج تحقیق توسط مجموعه‌ای از رفتارهای طیفی، که شامل رفتارهای طیفی که در مقیاس تاج پوشش اندازه‌گیری شده‌اند و رفتارهای طیفی که شبیه‌سازی شده‌اند، می‌باشند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مبانی نظری تحقیق

در ادامه به معرفی شبیه‌سازی رفتارهای طیفی و تحلیل حساسیت پرداخته می‌شود.

۲-۱- شبیه‌سازی رفتارهای طیفی

شبیه‌سازی رفتارهای طیفی با مدل‌های مختلفی صورت می‌پذیرد، در ادامه این مدل‌ها معرفی می‌گردند.

۲-۱-۱- مدل‌های انتقال تابش

مدل‌های انتقال تابش^۱، از زمان آغاز کار سنجش از دور اپتیکی، کمک قابل توجهی را در زمینه درک و تفسیر رفتار طیفی گیاهان با توجه به پارامترهای بیوفیزیکی آن‌ها داشته‌اند [۱۶]. این مدل‌ها به بیانی در صدد توصیف ریاضی نحوه تعامل امواج با محیط گیاهی (جذب انرژی و پراکنش آن) می‌باشند. این مدل‌ها در زمینه‌های مختلفی از جمله؛ طراحی شاخص‌های گیاهی، انجام تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای بیوفیزیکی و همچنین توسعه روش‌های معکوس به منظور بازیابی پارامترهای بیوفیزیکی [۴]، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان مدل‌های متعددی که در دهه‌های اخیر توسعه داده شده‌اند، خانواده مدل‌های سیل در مقیاس تاج پوشش و خانواده مدل‌های پراسپکت در مقیاس برگ، با اقبال قابل توجهی از سوی پژوهشگران مواجه شده‌اند [۱۶ و ۱۷]. در این تحقیق نیز برای شبیه‌سازی رفتار طیفی در مقیاس برگ از مدل پراسپکت [۱۸] استفاده شده است. اعتبار این مدل در تحقیقات دیگری

^۱ Radiative Transfer Model

^۲ Allen

^۳ SAILH

^۴ GeoSAIL

^۵ SAIL++

^۶ Average Leaf Angle

^۷ Leaf Area Index

۲-۲- تحلیل حساسیت

یکی از ابعاد مهم استفاده از مدل‌های انتقال تابش، تعیین مقادیر پارامترهای ورودی به صورت معقول و منطقی است. برای این منظور باید دانست که تغییر هر یک از پارامترهای ورودی (همچون تراکم رنگدانه‌ها و ...) کدام قسمت از رفتار طیفی را و به چه میزانی تغییر خواهد داد [۲۷]. به عبارت دیگر هر قسمت از رفتار طیفی نهایی (به عنوان خروجی مدل‌های انتقال تابش) به کدام یک از پارامترهای ورودی حساس تر است (و با تغییر آن، بیشتر تغییر می‌کند). تحلیل حساسیت، فرآیندی است که برای تعیین پارامترهای کلیدی و به دنبال آن تعیین مقادیر ورودی انجام می‌پذیرد. در این بخش از مقاله توضیحاتی در مورد تحلیل حساسیت و روش‌های آن، بدون ورود به مبانی ریاضی بحث، ارائه می‌گردد.

تحلیل حساسیت اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای مدل را می‌سنجد و بدین وسیله تعیین می‌کند کدام متغیر تاثیر بیشتری را در خروجی مدل (رفتار طیفی انعکاسی) داراست. بدین ترتیب می‌توان متغیرهای با درجه اهمیت پایین را ثابت در نظر گرفت و در عین حال مطمئن بود که این کار چندان آسیبی به جامع بودن رفتارهای طیفی وارد نخواهد کرد. به طور کلی روش‌های تحلیل حساسیت را می‌توان به دو دسته موضعی و سراسری تقسیم نمود [۲۸]. در حالت موضعی به بیان ساده، تمامی پارامترهای ورودی به استثنای پارامتر مورد مطالعه، ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها همان یک پارامتر تغییر داده می‌شود و به دنبال آن تاثیر تغییرات آن در خروجی مدل سنجیده می‌شود. ایراد این روش، علی‌رغم سادگی آن، در آنجاست که اطلاعاتی در اختیار قرار می‌دهند که صرفاً محدود به یک نقطه از تابع (مدل) خواهد بود. در نتیجه هر چه مدل پیچیده تر باشد و تعداد ورودی‌های آن بیشتر باشد (مخصوصاً در صورت وجود ارتباطی غیرخطی میان ورودی‌ها و

می‌تواند بازتابش نیم کره‌ای را نیز شبیه‌سازی کند، که در این تحقیق صرفاً از بازتابش یک جهته استفاده شده است.

۲-۱-۲- مدل اختلاط طیفی

به دلیل محدودیت توان تفکیک مکانی سنجنده‌ها، عمدتاً پیکسل‌ها به صورت مختلط می‌باشند. لذا رفتار طیفی هر پیکسل ترکیبی از رفتارهای طیفی متعدد، که هر یک از آن‌ها مربوط به ماده یا پوشش زمینی متفاوتی است، می‌باشد [۲۵]. یکی از حوزه‌های تحقیقاتی در سنجش از دور، در جستجوی پاسخ دقیق همین سوال است که چه پوشش‌هایی (مواد یا رفتارهای طیفی) و هر یک به چه نسبتی، با یکدیگر ترکیب شده‌اند. مدل‌های متعددی تاکنون برای پاسخگویی به این سوال ارائه شده است. در این مقاله از این مدل‌ها استفاده شده است، اما نه به منظور تفکیک طیف ثبت شده؛ بلکه به منظور اختلاط طیف‌های شبیه‌سازی شده با رفتار طیفی خاک. چراکه در پوشش‌های گیاهی، مخصوصاً مناطق جنگلی تنک (که غالب جنگل‌های ایران از این طبقه‌اند) معمولاً رفتارهای طیفی ثبت شده توسط سنجنده، ترکیبی از رفتار طیفی گیاه و رفتار طیفی خاک (به عنوان پشت زمینه) می‌باشد. مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل خطی است که در رابطه (۱) قابل مشاهده است [۲۶].

$$r = Mf + e \quad (1)$$

در این رابطه r ، بردار طیفی است که توسط سنجنده به هر پیکسل نسبت داده می‌شود و ابعاد آن برابر تعداد باندهای سنجنده است. M ، ماتریسی است که هر یک از سطرهای آن بردار طیفی مربوط به پوشش‌های خالص موجود در منطقه است. f نیز برداری است که به تعداد پوشش‌های خالص، درایه دارد و سهم هر یک از آن‌ها را از رفتار طیفی پیکسل (r) مشخص می‌سازد. e بخشی از رفتار طیفی پیکسل (r) است که توسط رابطه (۱) مدل نشده است.

(یا شاخص مرتبه کلی) برای قضاوت نهایی استفاده می‌شود [۳۳]. این شاخص مشارکت متغیری مثل x_1 را در تغییرات و واریانس خروجی بیان می‌دارد به گونه‌ای که در بردارنده تمامی تغییرات ناشی از x_1 ؛ به تنهایی و تعاملات x_1 با تمامی دیگر متغیرها (مانند v_{12} و v_{123} و ...)، خواهد بود.

۳- روش پیشنهادی و پیاده‌سازی

در این بخش به دو بحث پرداخته می‌شود که عبارتند از: ضرورت انجام کالیبراسیون نسبی و کالیبراسیون نسبی سنجنده‌های مورد مطالعه. ابتدا ضرورت انجام کالیبراسیون نسبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لذا بررسی اینکه عدم انجام کالیبراسیون نسبی تا چه میزان می‌تواند در سری زمانی اختلال ایجاد کند، موضوع مورد تحقیق می‌باشد. این مورد را طور دیگر هم می‌توان بیان نمود، آیا بزرگی تغییرات کاذب (ناشی از تفاوت SRFها) نسبت به تغییرات طبیعی سری زمانی، مقداری قابل چشم‌پوشی خواهد بود یا خیر؟ ابتدا تخمینی از میزان بزرگی تغییرات طبیعی که در سری زمانی شاخص‌های مورد مطالعه (NDVI, EVI, NDWI)، رخ می‌دهد، به دست آمد. بدین منظور تصاویر انتهایی تابستان سنجنده ETM+، از قسمتی از مناطق جنگلی زاگرس (شهرستان ملکشاهی واقع در استان ایلام)، در طی ۱۳ سال (از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۱)، اخذ شد و سری زمانی شاخص‌های مدنظر (NDVI, EVI, NDWI) تشکیل شد [۳۴]. در شکل (۱) سری زمانی شاخص NDVI، به عنوان نمونه به نمایش درآمده است.

سپس قسمتی (۹۰۰ پیکسل لندست) از جنگل‌های بیوره (مشخص شده با مستطیل قرمز) به عنوان ناحیه مورد مطالعه انتخاب شد. چون تصاویر تمامی دوره‌ها مربوط به سنجنده یکسانی است، انتظار می‌رود تغییرات شاخص‌ها از هر سال (دوره) تا سال بعد، طبیعی (یا واقعی و غیرکاذب) باشند.

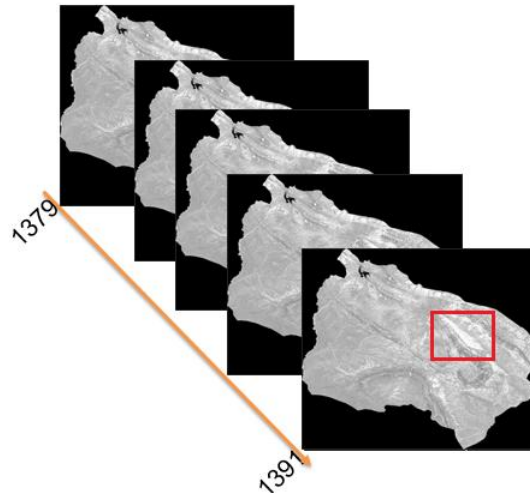
خروجی)، کارآیی روش‌های موضعی کاهش می‌یابد [۲۹] و [۳۱].

برخلاف روش‌های موضعی، روش‌های سراسری به جای سنجش حساسیت مدل در یک نقطه از فضای مقادیر پارامترهای ورودی، حساسیت را در تمام فضای پارامترهای ورودی، می‌سنجند [۳۰]. به بیانی ساده برای سنجش تاثیر تغییرات یک متغیر بر خروجی مدل، به نوعی متوسط‌گیری میان حالات متعدد که در طی آن سایر متغیرها هم در حال تغییر هستند، انجام می‌گیرد. با توجه به پیچیدگی و تعداد بالای پارامترهای ورودی در مدل‌های انتقال تابشی، استفاده از روش سراسری برای حساسیت‌سنجی، ارجحیت دارد [۳۲]. در این تحقیق از روش‌های سراسری واریانس محور، جهت انجام تحلیل حساسیت بهره‌برداری شده است. روش‌های واریانس محور، بدین صورت عمل می‌کنند که در طی آن‌ها، واریانس و تغییرات خروجی مدل، به المان‌های متعددی (مرتبط با ورودی‌ها) که دارای مراتب مختلف هستند، تجزیه می‌گردد. مثلاً جزء مرتبه اول v_1 ، از کل واریانس خروجی، توصیف‌کننده تاثیر متغیر x_1 (به تنهایی) روی خروجی، در کل فضای ورودی‌ها (x_2, x_3, \dots) می‌باشد. اجزای مرتبه دوم به بالاتر (مانند v_{12} و v_{123} و ...) تاثیر تعاملات میان متغیرهای مختلف را در واریانس خروجی (در اینجا رفتار طیفی) توصیف می‌کنند. با تقسیم این مولفه‌ها (v_{123} و v_{12} و v_1) به واریانس کل خروجی، شاخص‌های حساسیت به دست خواهند آمد. اما همان گونه که مشخص است با افزایش تعداد پارامترها تعداد این شاخص‌ها به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ مثلاً برای ۱۰ پارامتر، ۱۰۲۳ شاخص حساسیت خواهیم داشت که از نظر محاسباتی نیز موضوع قابل توجهی است. به همین دلیل معمولاً از شاخص تاثیر کلی^۱

¹ Total-order index

بردار تغییرات آن ۱۲ عنصر خواهد داشت). سپس RMSE این بردار (برای هر یک از ۹۰۰ پیکسل) محاسبه شد و در پایان میانگینی از (RMSE های) ۹۰۰ پیکسل به دست آمد که در جدول (۱) قابل مشاهده است.

سپس برای به دست آوردن تخمینی از بزرگی تغییرات طبیعی، کافی است برای هر یک از پیکسل‌ها، بردار تغییرات هر یک از شاخص‌ها محاسبه شود. توضیح اینکه بردار تغییرات از طریق گرفتن مشتق از بردار مقادیر هر یک از شاخص‌ها به دست می‌آید (اگر بردار مقادیر، دارای ۱۳ عنصر باشد،



شکل ۱: سری زمانی شاخص NDVI شهرستان ملکشاهی

جدول ۱: بزرگی تغییرات طبیعی شاخص‌های مورد مطالعه

شاخص	بزرگی تغییرات طبیعی
NDVI	۰/۰۴۶
EVI	۰/۰۲۳
NDWI	۰/۰۲۵

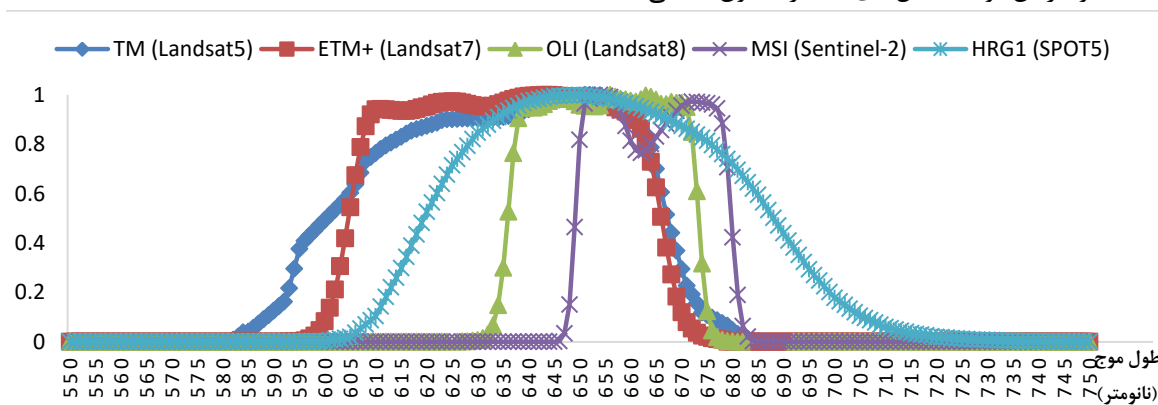
تعیین‌کننده ضرورت یا عدم ضرورت انجام کالیبراسیون نسبی (به‌عنوان یکی از مراحل اصلی پیش‌پردازش) باشد.

کالیبراسیون سنجنده‌های مختلف نسبت به یکدیگر (یا به تعبیر دیگر نسبت به یک سنجنده مرجع)، کالیبراسیون نسبی نامیده می‌شود. در این فرآیند عوامل مختلف که منجر به پیدایش تغییرات کاذب می‌شوند، توسط یک رابطه ریاضی مدلسازی می‌گردد و به‌نوعی اثر آن عوامل جبران می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، فرض بر این است که قبل از شکل‌گیری سری زمانی از

بررسی‌های صورت گرفته در این مطالعه، نشان داده است بزرگی تغییرات کاذب (ناشی از SRF) به‌طور متوسط حدود ۰/۰۱ می‌باشد. البته این مقدار کاملاً وابسته به سنجنده‌های مورد مطالعه است و برای سنجنده‌های متفاوت، باید مجدد مورد ارزیابی قرار گیرد. توضیح تفصیلی این بررسی‌ها و پردازش‌ها، به همراه جزییات در ادامه مقاله ارائه شده است. در اینجا اشاره‌ای به نتایج جهت مقایسه شده است. قطعاً در نظر گرفتن این دو مقدار (بزرگی تغییرات کاذب و طبیعی) در یک پروژه، در کنار اینکه پروژه مذکور به چه سطحی از دقت نیاز دارد، می‌تواند

تصحیح می‌گردد همان تابع حساسیت طیفی است. (شکل (۲)). تابع حساسیت طیفی حساسیت نسبی آشکارسازهای سنجنده نسبت به انرژی دریافتی در طول موج‌های مختلف را توصیف می‌کند [۳].

سنجنده‌های مختلف، درجات خاکستری به‌مقدار بازتابش سطح، تبدیل شده باشند. لذا اکثر عوامل پیدایش تغییرات کاذب؛ همچون وضعیت اتمسفر و ... برطرف شده‌اند. بنابراین عامل اصلی که کماکان باقیست و اثر آن توسط مدل‌های کالیبراسیون نسبی،



شکل ۲: تابع حساسیت طیفی باند قرمز سنجنده‌های مورد مطالعه

جدول ۲: پهنای باندهای بازتابشی برای سنجنده‌های مورد مطالعه

سنجنده باند	TM	ETM	OLI	MSI	HRG
آبی	۴۵۳-۵۱۹	۴۴۱-۵۱۴	۴۵۲-۵۱۲	۴۷۱-۵۲۵	۵۰۳-۵۸۸
قرمز	۶۲۷-۶۹۴	۶۳۱-۶۹۲	۶۳۶-۶۷۳	۶۵۰-۶۸۱	۶۲۰-۶۸۹
فروسرخ نزدیک	۷۷۷-۹۰۶	۷۷۲-۸۹۸	۸۵۱-۸۷۹	۷۸۳-۸۹۹	۷۹۱-۸۸۶
فروسرخ کوتاه	۱۵۶۸-۱۷۸۵	۱۵۴۷-۱۷۴۹	۱۵۶۶-۱۶۵۱	۱۵۷۰-۱۶۵۹	۱۵۸۲-۱۶۸۲

و یا برآورد) شوند. برای حل این ضرایب، وجود داده‌هایی که به بر مبنای آن‌ها معادلات مشاهدات شکل بگیرند، ضروری است. این داده‌ها را داده‌های آموزشی نیز می‌نامند. برای جمع‌آوری داده‌های آموزشی، دو روش کلی قابل تصور است. روش اول این است که برای برآورد ضرایب، از تصاویر اخذ شده توسط سنجنده‌های مورد مطالعه، استفاده گردد. این روش که می‌توان آن را "روش مستقیم" نیز نامید، با محدودیت‌های جدی روبروست. اولاً؛ این روش برای کالیبراسیون نسبی سنجنده‌هایی قابل تصور است که ترجیحاً در زمان و مکان یکسان، تصویر اخذ نموده باشند. ثانیاً؛ داده‌های آموزشی باید تا حد امکان تمامی حالات ممکن را

مثلاً مقدار تابع حساسیت طیفی باند قرمز از سنجنده HRG در طول موج ۶۵۰ نانومتر، دو برابر مقدار مربوط به ۶۲۰ نانومتر است. این یعنی مقدار این باند، دو برابر بیشتر تحت تاثیر انرژی دریافتی در ۶۵۰ نانومتر، (نسبت به ۶۲۰ نانومتر) است. در شکل (۲)، به‌عنوان نمونه، تابع حساسیت طیفی باند قرمز سنجنده‌های مورد مطالعه، به نمایش درآمده است. همچنین پهنای باند در نصف مقدار بیشینه^۱ برای سایر باندهای بازتابشی و سنجنده‌ها در جدول (۲) درج شده است.

مدل‌های ریاضی (مورد استفاده برای کالیبراسیون) در هر حال دارای ضرایبی هستند که باید حل

^۱ Full width at half maximum

مدل انتقال تابش ترکیبی پراسپکت ۴ + فورسیل^۱، از طریق روش‌های سراسری واریانس محور، صورت گرفت. در این تحقیق از شاخص کلی حساسیت استفاده شده است. پس از محاسبه این شاخص برای هر یک از پارامترهای مدل ترکیبی پراسپکت ۴ + فورسیل در طول موج‌های مختلف، نرمالیزاسیون هم صورت می‌گیرد تا مقایسه تاثیر و اهمیت یک کمیت در قسمت‌های مختلف رفتار طیفی بهتر انجام گیرد. نرمالیزاسیون به این دلیل انجام می‌شود که مجموع شاخص مرتبه کلی برای تمام متغیرها باید از یک بزرگتر باشد اما این مقدار لزوماً در قسمت‌های مختلف بازه طول موجی، مقدار ثابتی نیست. بنابراین نیاز به یکسان‌سازی مقیاس وجود دارد که این منظور با نرمالیزاسیون محقق می‌گردد. در شکل (۳) نتیجه محاسبات حساسیت سنجی به نمایش در آمده است.

اولین نکته که از شکل (۳) حاصل می‌گردد علی‌رغم تعداد زیاد پارامترهای ورودی مدل ترکیبی، تعداد قابل توجهی از پارامترهای ورودی، تاثیرگذاری به نسبت کمتری در رفتار طیفی نهایی دارند. از جمله این پارامترها می‌توان به پارامترهای هندسی (زوایای سه‌گانه) اشاره داشت. برخی از پارامترها مانند چگالی آب معادل^۲ در برخی بازه‌های طول موجی به هیچ‌عنوان تاثیرگذار نیستند. شاید بتوان کمیت‌های شاخص سطح برگ^۳ و توزیع زاویه‌ای برگ^۴ و کلروفیل^۵ را از مهم‌ترین پارامترها دانست که درصد بالایی از تغییرات رفتار طیفی را عهده‌دار هستند. در نهایت با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته و تحقیقات پیشین،

دربرگیرند. اخذ تصاویر ترجیحاً هم‌زمان (با فرض امکان)، آن‌هم از انواع حالات پوشش گیاهی (با مقادیر مختلف پارامترهای بیوفیزیکی) دور از ذهن به نظر می‌رسد. روش دوم که در این پژوهش، "غیر مستقیم" نامیده می‌شود، برای تهیه داده‌های آموزشی مورد نیاز، محدودیت‌های روش سابق را ندارد. مبنای این روش منحنی رفتار طیفی پوشش‌های گیاهی در حالات مختلف است، که خود می‌تواند از روش‌های متعددی به دست آید. این روش‌ها عبارتند از: ۱) تصویربرداری فراطیفی (هوایی یا فضایی)، ۲) اندازه‌گیری‌های میدانی (طیف‌سنج) و ۳) شبیه‌سازی (به کمک مدل‌های انتقال تابش در مقیاس برگ و تاج پوشش). در این تحقیق از میان سه روش فوق، روش سوم انتخاب شد. علت این است که داده‌های آموزشی، باید تا حد امکان دربردارنده تمامی حالات ممکن باشند تا نتایج نهایی از قابلیت تعمیم‌پذیری بالاتری برخوردار باشند. روش مستقیم گرچه مناسب برای حل مدل کالیبراسیون نیست، اما برای چک و اعتباربخشی به مدل حل شده می‌تواند روش بسیار مفیدی باشد. البته حالات اول و دوم از روش غیرمستقیم، نیز می‌توانند تا حدی هدف اعتباربخشی به مدل‌های کالیبراسیون را تامین سازند.

خصوصیات طیفی [۳۵] تاج پوشش گیاهی به‌طور عمده‌ای تحت تاثیر خصوصیات طیفی برگ گیاه و پشت زمینه پوشش گیاهی، می‌باشد. ترکیبات شیمیایی (تراکم رنگدانه‌های موجود و ...) و خصوصیات فیزیکی (ساختار درونی) برگ، تعیین‌کننده نحوه تعامل آن با امواج الکترومغناطیس می‌باشد. مدل‌های انتقال تابشی این نحوه تعامل را فرموله می‌کنند و یا به بیانی دیگر توصیفی ریاضی از چگونگی این تعامل ارائه می‌دهند. در گام اول، تحلیل حساسیت

¹ PROSPECT4+4SAIL

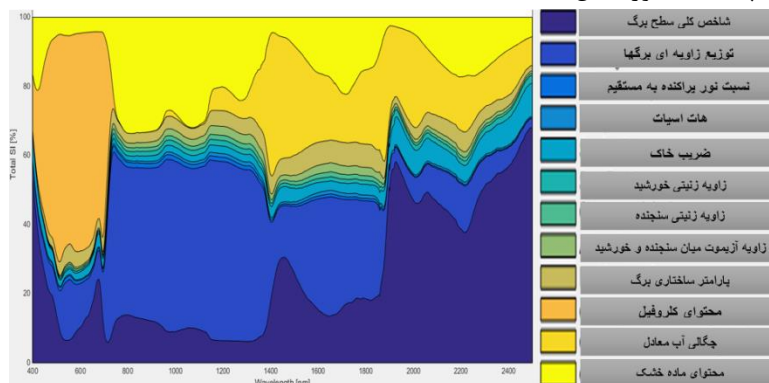
² Equivalent Water Thickness

³ Leaf Area Index

⁴ Leaf Distribution Angle

⁵ Chlorophyll

مقادیر پارامترهای ورودی بر روی مدل ترکیبی پراسپکت ۴ + فورسیل انتخاب شد. این مقادیر در جداول (۳ و ۴) قابل مشاهده است.



شکل ۳: شاخص مرتبه کلی حساسیت برای پارامترهای مختلف مدل ترکیبی پراسپکت ۴ + فورسیل.

جدول ۳: ورودی‌های مدل PROSPECT4

مدل	پارامتر	کمینه	بیشینه	تابع توزیع (تعداد نمونه)
PROSPECT4	پارامتر ساختاری برگ (N)	۱	۲/۵	یکنواخت (۳)
	کلروفیل (Cab)	۵	۷۵	گوسین (۹) $\sigma = 40 \mu = 35$
	محتوای ماده خشک (Cm)	۰/۰۰۱	۰/۰۳	یکنواخت (۳)
	چگالی آب (Cw)	۰/۰۰۱	۰/۰۵	یکنواخت (۳)

جدول ۴: ورودی‌های مدل 4SAIL

مدل	پارامتر	کمینه	بیشینه	تابع توزیع (تعداد نمونه)
4SAIL	شاخص کلی سطح برگ	۰/۱	۷	گوسین (۹) $\sigma = 5 \mu = 3$
	متوسط زاویه برگ	۴۰	۸۰	یکنواخت (۳)
	هات اسپات	۰/۰۰۱	۰/۱	یکنواخت (۳)
	ضریب خاک	۰	۱	یکنواخت (۳)
	زاویه زنبی سنجنده	۰	۴۵	یکنواخت (۶)
	زاویه زنبی خورشید	۰	۴۵	یکنواخت (۶)
	نسبت نور پراکنده به مستقیم	۵	۴۰	یکنواخت (۳)
	زاویه آزیموت میان سنجنده و خورشید	۰	۱۸۰	یکنواخت (۶)

شبیه‌سازی می‌گردد) به صورت چشم‌گیری بالا خواهد بود (بیش از ۸ میلیون حالت). این تعداد مستلزم حجم بالایی از پردازش خواهد بود به گونه‌ای که حجم نهایی مجموعه رفتارهای طیفی شبیه‌سازی شده (در فرمت

با توجه به اینکه تعداد پارامترهای هر دو مدل مجموعاً ۱۲ عدد است و از سوی دیگر تمامی ترکیبات ممکن میان مقادیر ورودی قابلیت بررسی را دارند، تعداد این ترکیبات (که به ازای هر یک از آن‌ها یک منحنی طیفی

متعلق به چهار طبقه کلی، با نام‌های آفوسول، اریدیوسول، انتیسول، اینسپیتیسول می‌باشند. کتابخانه طیفی استر [۳۶]، رفتارهای طیفی هر یک از این طبقات را ارائه نموده است. رفتارهای طیفی طبقات مذکور اخذ شدند و میانگین آن‌ها محاسبه شد تا به عنوان طیف خاک، مورد استفاده قرار گیرد. سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، جنگل‌ها را از نظر تراکم به سه دسته انبوه، نیمه انبوه و تنک طبقه‌بندی می‌کند. با توجه به این طبقه‌بندی، نسبت اختلاط طیف‌های پوشش گیاهی و طیف خاک، تعیین شد. نسبت‌های در نظر گرفته شده، در جدول (۵) قابل مشاهده است.

جدول ۵: نسبت‌های مورد استفاده برای اختلاط طیف‌های پوشش گیاهی و طیف خاک

پشت زمينه (خاک)	پوشش گیاهی	تنک	نسبت مورد استفاده
٪۸۰	٪۲۰	نیمه انبوه	
٪۵۰	٪۵۰	انبوه	
٪۲۰	٪۸۰		

بدین ترتیب برای هر یک از حالات فوق ۵۰ هزار رفتار طیفی شبیه‌سازی خواهند شد (در مجموع ۱۵۰۰۰۰ رفتار طیفی). بدین ترتیب انتظار می‌رود که رفتارهای طیفی شبیه‌سازی شده، به خوبی نماینده حالات مختلف پوشش‌های گیاهی (تراکم، گونه و...) باشند که این به معنای افزایش تعمیم‌پذیری نتایج پژوهش خواهد بود. لازم به ذکر است که ۸۰ درصد از این مجموعه برای حل معادلات در نظر گرفته شد و ۲۰ درصد باقیمانده برای اعتبارسنجی نتایج مورد استفاده قرار خواهد گرفت. پس از شبیه‌سازی منحنی‌های رفتار طیفی، مقادیر بازتابش باندهای آبی، قرمز و فروسرخ نزدیک و فروسرخ کوتاه، برای به هر یک از سنجنده‌های مورد مطالعه، از رابطه (۲) به دست می‌آید.

^۱ NetCDF). بیش از ۲۴۰ گیگابایت برآورد شد. یک راه‌حل این است که تعداد مقادیری که توسط پارامترهای مختلف پذیرفته می‌شود، کاهش یابند تا تعداد ترکیبات نهایی نیز کاهش یابد. این راه‌حل به دلیل اینکه داده‌های آموزشی را به حالات خاصی محدود می‌کند، مطلوب نیست. راه‌حل دیگر که این پیامد منفی را نیز ندارد بدین صورت است که در ابتدا تمامی ترکیبات ممکن ساخته شود و سپس به صورت کاملاً تصادفی، کسری از آن‌ها انتخاب شده و وارد فرآیند شبیه‌سازی گردند. تصادفی بودن زیرمجموعه انتخابی که دارای پنجاه‌هزار عضو (رفتار طیفی) است، این انتظار را ایجاد می‌کند که از حالات مختلف به نسبت تقریباً یکسانی در زیرمجموعه نهایی حضور داشته باشند. در گام بعد با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، رفتار طیفی پشت زمینه (خاک) نیز با مجموعه رفتارهای طیفی که تا کنون شبیه‌سازی شده‌اند، ترکیب می‌گردد. لازم به ذکر است به‌طور کلی در طبیعت، غالباً پشت زمینه پوشش گیاهی می‌تواند خاک، چمن و یا برف باشد. اما در این تحقیق صرفاً شبیه‌سازی برای پشت زمینه خاک صورت پذیرفته است. در حالتی که پشت زمینه، چمن (و مشابه آن) باشد، به دلیل اینکه پوشش چمن یا علف به نوعی زیرمجموعه پوشش گیاهی محسوب می‌گردد، رفتار طیفی چندان متفاوتی برای آن تصور نمی‌شود. در ارتباط با برف نیز گرچه رفتار طیفی متفاوتی را داراست، اما با توجه به شرایط آب و هوایی کشور ایران و مناطق اطراف، چنین شرایطی معمول نبوده و به ندرت به وقوع می‌پیوندد. در ارتباط با رفتار طیفی مورد استفاده برای خاک نیز باید اشاره داشت که خاک‌های موجود در سطح کره زمین، توسط سیستمی که توسط وزارت کشاورزی ایالات متحده ارائه شده است، به ۱۲ طبقه تقسیم می‌گردند. خاک‌های منطقه‌ای که شامل کشور ایران و مناطق اطراف می‌شود، عموماً

^۱ NetCDF

$$\frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R_i(\lambda) * SRF_i(\lambda) d(\lambda)}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} SRF_i(\lambda) d(\lambda)} = i \text{ باند } i \text{ شبیه‌سازی شده باند } i \text{ (رابطه ۲)}$$

انتخاب فرم کلی معادلات کالیبراسیون مرحله بعدی می‌باشد. استفاده از مدل‌های چندجمله‌ای از روش‌های رایج به منظور انجام کالیبراسیون نسبی بوده است. بعضاً از مدل‌های یک متغیره خطی ساده استفاده شده و در پاره دیگری از تحقیقات از مدل‌های چند متغیره (خطی و غیرخطی) استفاده شده است. در پژوهش دیگری در رابطه با موضوع مورد تحقیق، از مدل‌های خطی ساده (روابط ۶ و ۷) استفاده شده است [۴۰].

رابطه (۶)

$$band_{MSI} = Al_b * band_{other\ sensors} + Bl_b + \epsilon$$

رابطه (۷)

$$Index_{MSI} = Al_i * Index_{other\ sensors} + Bl_i + \epsilon$$

در روابط (۶ و ۷)، پارامترهای $band$ و $Index$ به ترتیب به مقادیر شبیه‌سازی شده برای باند بازتابشی و شاخص‌های طیفی اشاره دارد. پایین‌نویس‌های MSI و $other\ sensors$ به ترتیب اشاره به سنجنده مرجع و سایر سنجنده‌های مورد مطالعه دارد. Al و Bl نیز به ضرایب معادلات کالیبراسیون اشاره دارد که حالات مربوط به باند و شاخص، به ترتیب، با پایین‌نویس‌های b و i از یکدیگر تفکیک شده‌اند. علت استفاده از معادلات با درجه بالاتر، در برخی از تحقیقات را می‌توان این‌گونه تحلیل نمود که؛ رفتارهای طیفی که وارد پردازش می‌شوند در برخی از حالات (به خاطر سهم بیشتر رفتار طیفی خاک) به پوشش خاک نزدیک‌ترند تا به پوشش گیاهی. این واقعیت باعث می‌شود که الگوی توزیع نقاط مربوط به هر یک از پوشش‌ها متفاوت باشد (به گونه‌ای که دیگر نمی‌توان آن نقاط را با معادله خط مدل نمود). پس بنابراین برای اینکه قابلیت رابطه ریاضی مورد استفاده، برای مدل کردن ارتباط میان سنجنده‌ها افزایش یابد، باید جمله یا جملاتی را به مدل ریاضی

در رابطه (۲)، SRF نماد تابع حساسیت طیفی سنجنده، R نماد منحنی‌های طیفی شبیه‌سازی شده، λ نماد طول موج و پایین‌نویس i نیز نماد باند طیفی می‌باشند. شایان توجه است که سنجنده HRG مربوط به ماهواره اسپات ۵ در باند آبی داده‌ای اخذ نمی‌کند، بنابراین امکان محاسبه شاخص EVI^1 برای این سنجنده وجود نخواهد داشت. با استفاده از رابطه (۲)، به عنوان مثال برای باند قرمز تمامی سنجنده‌های مورد مطالعه، به تعداد منحنی‌های طیفی، مقدار بازتابش شبیه‌سازی شده است. در نتیجه متناظر با هر یک از منحنی‌های رفتار طیفی، یک معادله برای حل مدل ریاضی کالیبراسیون نسبی باند قرمز، شکل می‌گیرد. پس از شبیه‌سازی مقادیر باندهای مدنظر برای هر سنجنده، شاخص‌های گیاهی EVI [۳۷] و $NDVI$ [۳۸] و $NDWI^2$ [۳۹] از طریق روابط (۳ تا ۵) محاسبه می‌گردند.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR-RED}{NIR-6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$NDWI = \frac{NIR-SWIR1}{NIR+SWIR1} \quad \text{رابطه (۵)}$$

صرفاً به علت تفاوت در تابع حساسیت طیفی، مقادیری (بازتابش باندی و شاخص طیفی) که هر یک از سنجنده‌ها به یک منحنی طیفی نسبت می‌دهند، متفاوت خواهد بود. در مرحله بعد سنجنده MSI به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود. در این راستا معادلات کالیبراسیون نسبی، مقادیر سایر سنجنده‌ها را به منظور هماهنگ شدن با سنجنده MSI ، تغییر می‌دهند.

¹ Enhanced Vegetation Index

² Normalized Difference Water Index

گرایش پیدا کرده‌اند که شامل ترم‌های درجه اول و حتی دوم از کمیت NDVI می‌باشند (مانند روابط (۸) و (۹)).

چندجمله‌ای خطی یک متغیره اضافه نمود، که به نحوی معرف پوشش زمینی نیز باشند. به همین دلیل نیز پژوهشگران [۸] در تحقیقات پیشین، به سمت مدل‌هایی رابطه (۸)

$$band_{MSI} = An_b * band_{other\ sensors} + Bn_b * NDVI_{other\ sensors} + Cn_b * NDVI_{other\ sensors}^2 + Dn_b + \varepsilon$$

$$Index_{MSI} = An_i * Index_{other\ sensors} + Bn_i * Index_{other\ sensors}^2 + Cn_i + \varepsilon \quad (۹)$$

میان سنجنده‌های مورد مطالعه در جدول (۶) به نمایش درآمده است. بدین منظور از معیارهای RMSE و NRMSE و بازه تغییرات مطلق استفاده شده است. معیار NRMSE که بر حسب درصد محاسبه شده است، مشخص می‌کند که به‌طور کلی هر یک از مقادیر چند درصد از متناظر خود (در سنجنده MSI) بیشتر یا کمتر می‌باشند.

در روابط (۸) و (۹) نیز An و Bn نیز ضرایب معادلات کالیبراسیون می‌باشند که حالات مربوط به باند و شاخص، به ترتیب، با پایین نویسه‌های i و b از یکدیگر تفکیک شده‌اند. لازم به ذکر است که کمیت ε در روابط فوق (۶ تا ۹)، بیانگر آن بخشی از ارتباط میان سنجنده‌ها است، که مدل توانایی توصیف آن را ندارد. قبل از حل معادلات کالیبراسیون و ارائه نتایج مربوط به آن، میزان اختلاف موجود

جدول ۶: بیان آماری از اختلاف موجود میان سنجنده‌های مختلف با سنجنده MSI، قبل از اعمال معادلات کالیبراسیون

سنجنده باند/ شاخص		TM	ETM+	OLI	HRG
آبی	RMSE(NRMSE)	۰/۰۰۵ (-۹/۸٪)	۰/۰۰۹ (-۱۶/۳٪)	۰/۰۰۷ (-۱۳/۹٪)	--
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۷, -۰/۰۰۲]	[-۰/۰۱۲, -۰/۰۰۳]	[-۰/۰۱۰, -۰/۰۰۳]	
قرمز	RMSE-NRMSE	۰/۰۰۲ (۲/۱۴٪)	۰/۰۰۱ (۱/۰۷٪)	۰/۰۰۳ (-۲/۳۲٪)	۰/۰۰۳ (-۲/۶۳٪)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۱, ۰/۰۰۷]	[-۰/۰۰۱, ۰/۰۰۴]	[-۰/۰۰۵, ۰/۰۰۲]	[-۰/۰۰۴, ۰/۰۰۸]
فروسرخ نزدیک	RMSE-NRMSE	۰/۰۰۰۴ (-۰/۱۱٪)	۰/۰۰۰۶ (-۰/۱۸٪)	۰/۰۰۰۳ (-۰/۷۹٪)	۰/۰۰۰۵ (۰/۱۶٪)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۱۲, ۰/۰۰۰۱]	[-۰/۰۰۱۳, -۰/۰۰۰۳]	[-۰/۰۰۰۷, ۰/۰۰۰۴]	[-۰/۰۰۰۹, ۰/۰۰۰۹]
فروسرخ کوتاه	RMSE-NRMSE	۰/۰۰۳۱ (-۱/۱۲٪)	۰/۰۰۲۶ (-۰/۹۴٪)	۰/۰۰۱۱ (-۰/۴۱٪)	۰/۰۰۱۷ (-۰/۶۲٪)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۱۰۷, ۰/۰۰۳۲]	[-۰/۰۰۹۲, ۰/۰۰۲۱]	[-۰/۰۰۲۴, ۰/۰۰۰۴]	[-۰/۰۰۱۵, ۰/۰۰۴۲]
NDVI	RMSE-NRMSE	۰/۰۱ (-۲/۰۹٪)	۰/۰۰۵ (-۱/۰۱٪)	۰/۰۱۱ (۲/۳۴٪)	۰/۰۱۱ (-۲/۳۸٪)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۲۷, ۰/۰۰۳۷]	[-۰/۰۱۵, ۰/۰۰۳]	[-۰/۰۰۸, ۰/۰۱۸]	[-۰/۰۰۳, ۰/۰۱۱]
EVI	RMSE-NRMSE	۰/۰۱۶ (-۴/۷۵٪)	۰/۰۱۵ (-۴/۶۳٪)	۰/۰۱۰ (-۲/۸۷٪)	--
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۴۳, -۰/۰۰۱۱]	[-۰/۰۰۳۹, -۰/۰۰۰۴]	[-۰/۰۰۳۱, ۰/۰۰۷۸]	
NDWI	RMSE-NRMSE	۰/۰۰۰۶ (۵/۴۶٪)	۰/۰۰۰۵ (۴/۶۴٪)	۰/۰۰۰۶ (۵/۲۱٪)	۰/۰۰۰۳ (-۳/۱۵٪)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۰۶, ۰/۰۰۲۱۴]	[-۰/۰۰۰۵, ۰/۰۱۷۹]	[۰/۰۰۰۳, ۰/۰۰۷۵]	[-۰/۰۰۰۹, ۰/۰۰۰۳]

گرچه شاید تا حد اندکی نتایج را بهبود بخشند، اما کیفیت نتایج معادلات خطی به خوبی با حالات غیر خطی قابل رقابت است و نیازی به پیچیده کردن معادلات دیده نشده می شود؛ در نتیجه برای تمامی شاخص های طیفی از رابطه (۷) و همچنین برای مقادیر بازتابی نیز از رابطه (۶)، استفاده شد.

در جداول شماره های (۷ و ۸ و ۹) نمودارهایی برای نمایش بصری میزان همبستگی شاخص های مورد مطالعه در این مقاله میان سنجنده های مختلف و سنجنده سنتینل-۲ (به عنوان مرجع) آورده شده است. در هر سطر، خصوصیات آماری رگرسیون نیز برای مقایسه کمی، قرار داده شده است. بررسی های صورت گرفته نشان دادند که استفاده از معادلات غیرخطی

جدول ۷: نمودار پراکنش نقطه ای شاخص گیاهی NDVI میان MSI و سنجنده های مختلف و خصوصیات آماری

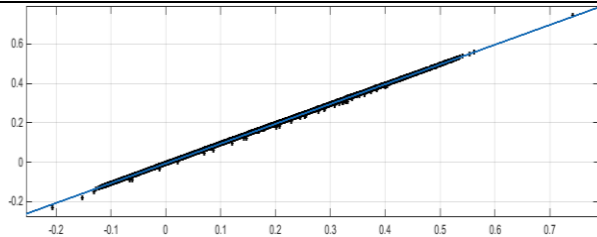
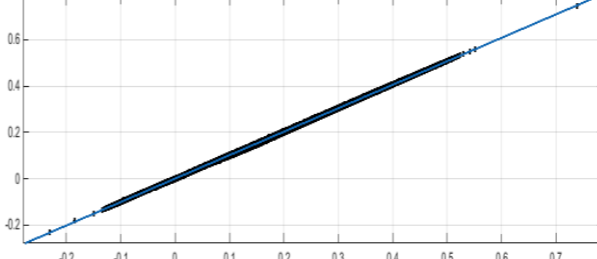
سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	(%)NRMSE	R ²
TM		۱،۰۳۸	-۰،۰۱۲	-۰،۰۸	۰،۹۹۹۶
ETM+		۱،۰۱۹	-۰،۰۰۷	-۰،۰۵۱	۰،۹۹۹۸
OLI		۱،۰۳۶	-۰،۰۲۶	۰،۰۵۴	۰،۹۹۹۸
HRG		۱،۰۵۵	-۰،۰۲۴	-۰،۰۴	۰،۹۹۹۳

جدول ۸: نمودار پراکنش نقطه‌ای شاخص گیاهی EVI میان MSI و سنجنده‌های مختلف و خصوصیات آماری

سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	(/.)NRMSE	R ²
TM		۱/۰۶	-۰/۰۰۷	-۱/۶۶	۰/۹۹۹
ETM+		۱/۰۴۳	-۰/۰۰۰۶	-۱/۳۲۲	۰/۹۹۹۲
OLI		۱/۰۵۳	-۰/۰۱۵	-۱/۴۲۲	۰/۹۹۹
HRG	---	—	—	—	—

جدول ۹: نمودار پراکنش نقطه‌ای شاخص گیاهی NDWI میان MSI و سنجنده‌های مختلف و خصوصیات آماری

سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	(/.)NRMSE	R ²
TM		۰/۹۸۹	۰/۰۰۰۳	۵/۵۶	۰/۹۸۹
ETM+		۰/۹۹	۰/۰۰۰۱	۴/۳۱	۰/۹۹۹۲

سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	(%)NRMSE	R ²
OLI		۱,۰۰۵	-۰,۰۰۶	۰,۸۷	۱
HRG		۱,۰۱۳	۰,۰۰۰۷	-۱,۴۴	۰,۹۹۹۹

در ادامه، نتایج مربوط به باندهای بازتابشی در جدول (۱۰) به نمایش درآمده است. در اینجا از نمایش بصری صرف نظر کرده و صرفاً کمیت‌های آماری جهت مقایسه ارائه شده است. همان‌طور که از اعداد و ارقام نمایان است، پیوستگی مقادیر باند فرسرخ، به صورت قابل ملاحظه‌ای از سایر باندها بیشتر می‌باشد.

جدول ۱۰: پارامترهای آماری ارتباط مقادیر بازتابش باندی سنجنده‌های مختلف با سنتینل-۲

سنجنده	باند	A	B	NRMSE(%)	R ²
TM	آبی	۱,۰۰۸	۰,۰۰۰۹	۱,۲	۰,۹۹۸۶
	قرمز	۱,۰۳۷	-۰,۰۰۰۶	-۰,۹۳	۰,۹۹۹۵
	فرسرخ	۱,۰۰۴	-۰,۰۰۱۲	-۰,۰۵۵	۱
	فرسرخ کوتاه	۰,۹۸۳۲	۰,۰۰۰۵	۱,۰۲	۰,۹۹۸۶
ETM+	آبی	۱,۱۶۱	۰,۰۰۱۱	۱,۸۶	۰,۹۹۶۶
	قرمز	۱,۰۲	-۰,۰۰۲۸	-۰,۵۸	۰,۹۹۹۸
	فرسرخ	۱,۰۰۳۵	-۰,۰۰۰۶	۰,۰۳	۱
	فرسرخ کوتاه	۰,۹۸۸۷	۰,۰۰۳۸	۰,۸۵	۰,۹۹۹۹
OLI	آبی	۱,۱۱۲۱	۰,۰۰۱۹	۱,۹	۰,۹۹۶۴
	قرمز	۱,۰۳۶۴	-۰,۰۰۲۲	-۰,۵۷	۰,۹۹۹۸
	فرسرخ	۱,۰۰۹۳	-۰,۰۰۵۴	-۰,۳۵۳	۰,۹۹۹۵
	فرسرخ کوتاه	۰,۹۹۶۶	۰,۰۰۰۲	-۰,۱۴	۱
HRG	آبی	--	--	--	--
	قرمز	۱,۰۵۷۶	-۰,۰۰۷۲	۱,۱۸	۰,۹۹۹۲
	فرسرخ	۱,۰۰۴۸	-۰,۰۰۱۹	۰,۱۱	۰,۹۹۹۹
	فرسرخ کوتاه	۱,۰۰۲۹	-۰,۰۰۲۲	-۰,۳۶	۰,۹۹۹۸

۴- اعتبارسنجی نتایج

در ادامه داده های مورد استفاده به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی انجام شده ارائه می شود.

۴-۱- داده های مورد استفاده

داده های به کار گرفته شده به منظور اعتبارسنجی نتایج در این تحقیق، استفاده از رفتارهای طیفی اندازه گیری شده در سطح تاج پوشش گیاهی می باشد. این اندازه گیری می تواند توسط سنجنده های فضا برد و یا هوا برد صورت پذیرد. در این ارتباط باید گفت که رفتار طیفی در مقیاس تاج پوشش، بر خلاف مقیاس برگ، از نظر فراوانی با محدودیت بیشتری روبروست. چراکه رفتارهای طیفی موجود در اکثر کتابخانه های طیفی، بیشتر در سطح برگ است تا در سطح تاج پوشش. یکی از مناسب ترین روش ها برای اندازه گیری رفتار طیفی در سطح تاج پوشش، استفاده از سنجنده های هوایی فراطیفی است. لذا در این مقاله نیز از داده های سنجنده AVIRIS^۱ که پوشش های گیاهی مختلف اخذ شده است، استفاده شد.

مرجع این داده ها، سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) می باشد [۴۱]. به طور کلی هر یک از رفتارهای طیفی اخذ شده از منبع مذکور، میانگین تعداد بالایی از پیکسل های اندازه گیری شده توسط سنجنده AVIRIS، از پوشش مدنظر می باشد. در این تحقیق از ۳۸ رفتار طیفی اندازه گیری شده در سطح تاج پوشش استفاده شده است. از طرفی چون رفتارهای طیفی موجود، نماینده تمامی حالات ممکن برای پوشش های گیاهی نیستند، به تنهایی برای ارزیابی نتایج کافی نیستند. بنابراین ۲۰٪ داده های شبیه سازی شده نیز به مجموعه داده های مورد استفاده برای اعتبارسنجی افزوده شد.

۴-۲- ارزیابی معادلات

داده های مورد استفاده برای ارزیابی نتایج، طبق روند گفته شده در قسمت قبل (بخش ۴-۱) آماده شدند. همان طور که مطرح شد، این داده ها ترکیبی از داده های شبیه سازی شده و اندازه گیری می باشند که مورد ارزیابی کیفیت قرار گرفته اند. در جدول (۱۱)، RMSE مدل های کالیبراسیون باندهای بازتابی مختلف و شاخص های گیاهی مورد مطالعه، ارائه شده است. مقادیر جدول (۱۱) از کیفیت قابل قبول نتایج این تحقیق حکایت می کنند.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

سطح زمین بیش از ۳۰ سال است که توسط انواع سنجنده ها، مشاهده و اندازه گیری می شود. ارسال سنجنده MSI (بر روی سکوی سنتینل-۲) در سال ۲۰۱۵، توسط سازمان فضایی اروپا؛ منجر به افزایش پویایی زنجیره تصاویر اپتیک با توان تفکیک مکانی متوسط (ماهواره های لندست و اسپات-۵) شده است. ترکیب داده ها و محصولات این دو مجموعه با سنجنده MSI حتی در ساده ترین حالت خود، نیازمند انجام تحقیقاتی است تا نتایج نهایی از آسیب های محتمل صدمه نینند. در این مقاله تاثیر عامل تابع حساسیت طیفی (به تنهایی) بر روی امکان پیوستگی داده ها و محصولات ماموریت های فضایی (سری لندست و اسپات-۵ با سنتینل-۲)، بررسی شد. با استفاده از مدل های انتقال تابش، بالغ بر پنجاه هزار منحنی طیفی در سطح تاج پوشش گیاهی شبیه سازی شد. سپس با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، رفتار طیفی خاک نیز با رفتارهای طیفی پوشش های گیاهی، ترکیب گشت و در نهایت صد و پنجاه هزار رفتار طیفی به دست آمد. سپس با استفاده از تابع حساسیت طیفی، مقادیر بانندی و به دنبال آن شاخص های طیفی محاسبه گشت. سرانجام با استفاده از روابط رگرسیون خطی برای

¹ Airborne Visible/Infrared Imaging Spectromete

صورت گرفته میان سازمان‌های سازنده سنجنده‌ها (ایسا و ناسا) در زمینه طراحی سنجنده‌ها، قابل پیش‌بینی بود. در میان شاخص‌های مورد مطالعه، انجام پیش‌پردازش کالیبراسیون نسبی، برای شاخص EVI، از ضرورت بیشتری برخوردار است.

شاخص‌های طیفی و مقادیر بازتابشی، نحوه ارتباط میان سنجنده‌های مختلف با سنجنده سنتینل-۲ تعیین شد. نتایج به‌طور کلی از همبستگی قابل‌توجهی میان محصولات و داده‌های سنجنده‌های مورد مطالعه با سنتینل-۲ حکایت می‌کنند (جداول ۷، ۸ و ۹). البته چنین نتیجه‌ای نیز تا حدی با توجه به همکاری‌های

جدول ۱۱: RMSE مدل‌های باندهای بازتابشی مختلف و شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه

سنجنده باند / شاخص	TM	ETM+	OLI	HRG
آبی	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	--
قرمز	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۱۴
فروسرخ	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۴
فروسرخ کوتاه	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱۰
NDVI	۰/۰۰۳۹	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۰۵
EVI	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۸	--
NDWI	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۶

برخوردار است. به‌طور کلی با توجه به همبستگی بالای به‌دست‌آمده برای تمامی شاخص‌ها و باندهای بازتابشی، این انتظار می‌رود که در برخی از حالات (با توجه به دقت مورد انتظار)، حتی عدم توجه به پیش‌پردازش کالیبراسیون نسبی، صدمه‌ای به سری زمانی شاخص‌ها وارد نسازد. به منظور اعتبارسنجی نتایج، صحیح‌ترین و کامل‌ترین روش، مقایسه تصاویر اخذشده (البته پس از تصحیح اتمسفری)، در زمان و از مکان یکسان می‌باشد. در این روش کافی است معادلات فوق به تصاویر سنجنده‌های مختلف اعمال گردد و سپس مقادیر نهایی با سنجنده MSI از سنتینل-۲ مقایسه شود. اما این فرآیند برای برخی از سنجنده‌ها غیرممکن و برای برخی دیگر دشوار می‌باشد، چراکه یافتن تصاویر هم‌زمان برای سنجنده‌هایی که بازه زمانی فعالیتشان هیچ اشتراکی نداشته است (مانند HRG و MSI)، ممکن نیست. این اقدام به‌عنوان یک پیشنهاد برای ادامه مسیر این تحقیق، باقی خواهد ماند.

این نتیجه‌گیری نیز از کنار هم قرار دادن مقدار RMSE مربوط به این شاخص، قبل از اعمال معادلات کالیبراسیون (جدول (۶)) و مقدار تغییرات طبیعی این شاخص (جدول (۱)) به‌دست می‌آید. چراکه نسبت بزرگی تغییرات کاذب این شاخص به بزرگی تغییرات طبیعی آن، از دیگر شاخص‌ها بیشتر است. از طرف دیگر از اعداد و ارقام جداول (۷ تا ۱۰)، این نتیجه به دست آمد که معادله ساده خط به‌خوبی می‌تواند اختلافات ناشی از تابع حساسیت طیفی را مدل نماید. این نتیجه، این‌گونه قابل توجیه است که توابع حساسیت طیفی سنجنده‌های مورد مطالعه، تاندازه‌ای با یکدیگر شباهت داشته‌اند که توزیع نقاط از الگوی خطی پیروی می‌کند و نیازی به پیچیده کردن روابط از طریق افزودن جمله‌ای که حاکی از پوشش منطقه باشد، وجود ندارد. نتیجه بارز جدول (۱۰) نیز این است که در میان باندهای بازتابشی، باند فروسرخ از همبستگی قابل‌توجهی، نسبت به باندها دیگر

سیاسگزاری

در این تحقیق از ابزار [۳۲ و ۴۲] ARTMO استفاده شده است. این ابزار تحت نرم افزار متلب بوده و با بهره‌مندی از محیط گرافیکی، زمینه مناسبی جهت

مراجع

برخی از پردازش‌ها از جمله شبیه‌سازی مقادیر طیفی، در اختیار این تحقیق قرار داد. در همین راستا از آقای دکتر Jochem Verrelst قدردانی به‌عمل می‌آید.

- [1] K. S. Willis, "Remote sensing change detection for ecological monitoring in United States protected areas," *Biol. Conserv.*, vol. 182, pp. 233–242, Feb. 2015.
- [2] L. J. Zhang, H. Z. Ma, X. B. Zhu, and L. Sun, "Retrieval of Vegetation Canopy Water Content Based on Spectral Index Method," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 295–298, pp. 2446–2450, Feb. 2013.
- [3] A. Gonsamo and J. M. Chen, "Spectral Response Function Comparability Among 21 Satellite Sensors for Vegetation Monitoring," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 3, pp. 1319–1335, Mar. 2013.
- [4] J. Verrelst et al., "Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation biogeophysical properties – A review," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 108, pp. 273–290, Oct. 2015.
- [5] W. J. D. van Leeuwen, B. J. Orr, S. E. Marsh, and S. M. Herrmann, "Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications," *Remote Sens. Environ.*, vol. 100, no. 1, pp. 67–81, Jan. 2006.
- [6] P. D'Odorico, A. Gonsamo, A. Damm, and M. E. Schaepman, "Experimental Evaluation of Sentinel-2 Spectral Response Functions for NDVI Time-Series Continuity," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 3, pp. 1336–1348, Mar. 2013.
- [7] "SPOT-5 - eoPortal Directory - Satellite Missions." [Online]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spot-5>. [Accessed: 17-Oct-2016].
- [8] Alexander P. Trishchenko, Josef Cihlar, and Zhanqing Li, "Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors," *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, pp. 1–18, 2002.
- [9] A. P. Trishchenko, "Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors: Extension to AVHRR NOAA-17, 18 and METOP-A," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 2, pp. 335–341, Feb. 2009.
- [10] E. Swinnen and F. Veroustraete, "Extending the SPOT-VEGETATION NDVI Time Series Back in Time With NOAA-AVHRR Data for Southern Africa," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 2, pp. 558–572, Feb. 2008.
- [11] K. Gallo, L. Ji, B. Reed, J. Eidenshink, and J. Dwyer, "Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 99, no. 3, pp. 221–231, Nov. 2005.
- [12] A. A. Gitelson and Y. J. Kaufman, "MODIS NDVI Optimization To Fit the AVHRR Data Series—Spectral Considerations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 66, no. 3, pp. 343–350, Dec. 1998.
- [13] K. P. Günther and S. W. Maier, "AVHRR compatible vegetation index derived from MERIS data," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 28, no. 3–4, pp. 693–708, Feb. 2007.
- [14] J.-B. Feret et al., "PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments," *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, no. 6, pp. 3030–3043, Jun. 2008.

- [15] W. Verhoef, L. Jia, Q. Xiao, and Z. Su, "Unified Optical-Thermal Four-Stream Radiative Transfer Theory for Homogeneous Vegetation Canopies," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, no. 6, pp. 1808–1822, Jun. 2007.
- [16] S. Jacquemoud et al., "PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, pp. S56–S66, Sep. 2009.
- [17] S. Jacquemoud et al., "PROSPECT+SAIL: 15 Years of Use for Land Surface Characterization," 2006, pp. 1992–1995.
- [18] S. Jacquemoud and F. Baret, "PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra," *Remote Sens. Environ.*, vol. 34, no. 2, pp. 75–91, Nov. 1990.
- [19] G. le Maire, C. François, and E. Dufrêne, "Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements," *Remote Sens. Environ.*, vol. 89, no. 1, pp. 1–28, Jan. 2004.
- [20] W. A. Allen, H. W. Gausman, A. J. Richardson, and J. R. Thomas, "Interaction of Isotropic Light with a Compact Plant Leaf," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 59, no. 10, p. 1376, Oct. 1969.
- [21] Y. Zeng, R. Shi, P. Liu, J. Ai, and C. Zhou, "Simulation and analysis of NDVI performance based on vegetation canopy radiative transfer model," 2015, p. 961017.
- [22] W. Verhoef, "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model," *Remote Sens. Environ.*, vol. 16, no. 2, pp. 125–141, Oct. 1984.
- [23] W. Verhoef, "Earth observation modeling based on layer scattering matrices," *Remote Sens. Environ.*, vol. 17, no. 2, pp. 165–178, Apr. 1985.
- [24] A. Kuusk, "The Hot Spot Effect in Plant Canopy Reflectance," in *Photon-Vegetation Interactions*, D. R. B. Myneni and A. P. D. J. Ross, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 1991, pp. 139–159.
- [25] N. Keshava and J. F. Mustard, "Spectral unmixing," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 19, no. 1, pp. 44–57, Jan. 2002.
- [26] C. Shi and L. Wang, "Linear Spatial Spectral Mixture Model," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 6, pp. 3599–3611, Jun. 2016.
- [27] A. Saltelli, S. Tarantola, and K. P.-S. Chan, "A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output," *Technometrics*, vol. 41, no. 1, pp. 39–56, Feb. 1999.
- [28] J. Morio, "Global and local sensitivity analysis methods for a physical system," *Eur. J. Phys.*, vol. 32, no. 6, pp. 1577–1583, Nov. 2011.
- [29] J. Yang, "Convergence and uncertainty analyses in Monte-Carlo based sensitivity analysis," *Environ. Model. Softw.*, vol. 26, no. 4, pp. 444–457, Apr. 2011.
- [30] A. Saltelli, Ed., *Global sensitivity analysis: the primer*. Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley, 2008.
- [31] J. Nossent, P. Elsen, and W. Bauwens, "Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model," *Environ. Model. Softw.*, vol. 26, no. 12, pp. 1515–1525, Dec. 2011.
- [32] Verrelst, Jochem, Rivera, Juan Pablo, Mardashova, Maria, and Moreno, Jose, "ARTMO's Global Sensitivity Analysis (GSA) toolbox to quantify driving variables of leaf and canopy radiative transfer models." *EARSel eProceedings*, 2015.
- [33] T. Homma and A. Saltelli, "Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 52, no. 1, pp. 1–17, Apr. 1996.
- [34] S. Imanyfar, M. Hasanlou, M. Motagh, M. Rostamnia, "determination of the extent and severity of oak decline in malekhahi city using landsat imagery," presented at the the first national conference on geospatial information technology (NCGIT), 2016.
- [35] E. M. Middleton and E. A. Walter-Shea,



Effect of different SRFs on time series of spectral indices, between sentinel-2 and other sensors for the purpose of vegetation land cover monitoring

Sadra Imanyfar¹, Mahdi Hasanlou*²

1- MSc student of remote sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Assistant professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Quality and quantity of vegetation land cover is considered as one of the important aspects of environment. Detection of trends in natural phenomena such as vegetation, requires long-term studies, more than lifetime of a satellite. On the other hand, combining data from different sensors could lead to formation of false changes. One of the main causes of false changes is different spectral sensitivity functions (SRFs), among sensors under study. In this regard, the impact of these factors should be eliminated or reduced as much as possible by a procedure named relative calibration which is the main goal of this research. There are similarities between Landsat satellites series and SPOT-5 with Sentinel-2 in many aspects, so MSI (the Sentinel-2's sensor) has capacity for data continuity. In this study, by incorporating polynomial equations, Landsat sensors (OLI, ETM+, ETM) and SPOT-5 were calibrated relative to MSI. The combination of radiative transfer models; PROSPECT-4 for leaf and 4SAIL for canopy, were used to simulate 50000 top of canopy synthetic spectral signatures and then soil effect was combined with them using linear spectral mixture model. After all, 150000 signatures were simulated. These spectral signatures were transformed to equivalent reflectance values (Blue, Red, NIR and SWIR) and spectral indices (NDVI, EVI and NDWI). 80% of spectral signatures were selected randomly for solving relative calibration models. Also, for validation purpose, remained simulated (20%) and 38 top of canopy measured spectral signatures were used. According to the results, linear equation can model the difference (caused by SRF) between MSI and others quite well and there is no need for more complicated equations. In general, results of this research show high and acceptable correlation for all reflectance bands and indices. It is more necessary to perform a relative calibration pre-processing step for EVI time series. Amongst reflectance bands, NIR has the highest continuity.

Key words: Relative calibration, Spectral response function, Sentinel-2, Vegetation cover monitoring

Correspondence Address: Remote Sensing Department, Faculty of Surveying and Geoinformation Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran
Tel.: 021-61114525
Email: hasanlou@ut.ac.ir