نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال پنجم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۶
Vol.5, No.1, Spring 2017

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 باندی 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 پرکاربرد (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، کارگرشمالی، 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

۱- مقدمه

از کاربردهای اصلی دانش سنجش‌ازدور 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 قابل‌توجهی در جوامع سنجش‌ازدوری 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 ماهوارهٔ 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 رادیومتریکی، 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، درصورتی‌که پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه، هیچ‌گونه تغییری را تجربه نکرده و صرفاً سنجنده مورد استفاده تغییر نموده است[۶]. تغییرات رخ‌داده 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 بدین‌صورت است که باید ابتدا درجات خاکستری[1] به بازتابندگی بالای اتمسفر[2] تبدیل‌شده 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 به‌دست‌آمده از شاخص‌ها؛ به‌طوری‌که تطابق هندسی[3] 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

ماهواره‌های لندست (سنجنده‌های TM[1] و ETM+[2] و OLI[3]) که از نقطه آغازین آن بیش از ۳۰ سال می‌گذرد؛ از سنجنده‌های پرکاربرد در زمینه پایش پوشش گیاهی بوده‌اند. با ارسال ماهواره سنتینل-A۲ (حامل سنجنده MSI[4]) 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 اسپات۶ و اسپات۷ رسیده است. در این میان سنجنده سنتینل-۲، شباهت‌هایی از حیث توان تفکیک مکانی و پارامترهای مداری (زاویه میل)، با سنجنده اسپات۵ دارد. اتفاقاً زمان شروع کار سنتینل-۲ و پایان فعالیت اسپات۵ تقریباً در یک بازه زمانی قرار می‌گیرند (اواسط سال ۲۰۱۵). بنابراین داده‌های سنتینل-۲، از ظرفیت خوبی برای ادامه سری زمانی داده‌های اسپات۵، برخوردارند[۷]. در پژوهش پیش‌رو، بررسی هماهنگی مقادیر (بازتابشی و طیفی) سنجنده‌های TM، ETM+ و OLI (مربوط به ماهواره‌های لندست) و سنجنده HRG1[5] (مربوط به ماهواره اسپات۵) با سنجنده MSI (مربوط به ماهواره سنتینل-۲)، به‌عنوان هدف در نظر گرفته‌شده 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[6] و همکاران[۸] دریافتند که تاثیر تابع حساسیت طیفی بر ناهماهنگی مقادیر بازتابش سطحی و بازتابش بالای اتمسفر و شاخص NDVI[7]، حتی در میان سنجنده‌های مجموعه AVHRR[8] 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 پرداخته‌شده است. به‌عنوان نمونه در [۸ و ۱۰] محققین، ترکیب داده‌های سنجنده‌های AVHRR وVegetation را مورد بررسی قرار داده‌اند و همچنین در [۱۲، ۱۱، ۸ و ۵] تشکیل سری زمانی از داده‌های مادیس(Modis[9]) به همراه AVHRR مورد تحقیق بوده است. گونتر[10] و مایر[1] نیز در تحقیقی

[1] Thematic Mapper
[2] The Enhanced Thematic Mapper Plus
[3] Operational Land Imager
[4] Multispectral Imager
[5] High Geometric Resolution

[6] Trishchenko
[7] Normalized Difference Vegetation Index
[8] Advanced Very High Resolution Radiometer
[9] MOderate Resolution Imaging Spectroradiometer
[10] GUNTHER

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

هماهنگی میان داده‌های سنجنده MERIS[2] را با AVHRR مورد بررسی قرار داده‌اند[۱۳]. گونسامو[3] و چن[4] در تحقیق دیگری به مقایسه مقادیر بازتابش باندهای قرمز، فروسرخ، فروسرخ 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[5]) 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[6] (مربوط به ماهواره اسپات۵) با سنجنده MSI (مربوط به ماهواره سنتینل-۲) می‌باشد.

پس از مقدمه که در بخش اول ارائه‌شده 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 جزییات آن ارائه شده است. در این بخش اشاره‌شده 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[7] [۱۴]) و تاج پوشش (مدل فورسیل[8] [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، فروسرخ نزدیک و فروسرخ کوتاه؛ مقادیر بازتابش باندی 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 نظرگرفتن سنجنده MSI به‌عنوان مرجع، ضرایب معادلات کالیبراسیون (که در طی آن مقادیر سایر سنجنده‌ها نسبت به سنجنده

[1] MAIER
[2] Medium Resolution Imaging Spectrometer
[3] Gonsamo
[4] Chen
[5] Normalized Difference Water Index
[6] High Geometric Resolution
[7] PROSPECT4
[8] 4SAIL

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

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[1]، از زمان آغاز کار سنجش‌ازدور 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 به‌منظور بازیابی پارامترهای بیوفیزیکی[۴]، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان مدل‌های متعددی که در دهه‌های اخیر توسعه داده‌شده‌اند، خانواده مدل‌های سیل در مقیاس تاج پوشش و خانواده مدل‌های پراسپکت در مقیاس برگ، با اقبال قابل‌توجهی از سوی پژوهشگران مواجه شده‌اند [۱۶ و ۱۷]. در این تحقیق نیز برای شبیه‌سازی رفتار طیفی در مقیاس برگ از مدل پراسپکت [۱۸] استفاده‌شده است. اعتبار این مدل در تحقیقات دیگری مورد بررسی قرار گرفته است[۱۹]. این مدل بر مبنای مدل تعمیم‌یافته صفحه‌ای، ارائه‌شده توسط آلن[2] [۲۰]، بنا شده است[۲۱]. در مدل آلن، برگ به‌صورت یک یا چند صفحه جاذب، با سطحی ناهموار در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌که امواج تابیده‌شده به‌صورت ایزوترپیک بازتاب می‌شوند[۱۶]. به‌طورکلی ورودی‌های این مدل به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱)پارامتر ساختاری برگ (*N*) که همان تعداد لایه‌های تشکیل‌دهنده 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 ارائه‌شده‌اند که در این تحقیق از مدل فورسیل استفاده‌شده 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 پس‌ازآن به‌صورت متوالی به مدل‌های دیگری با عناوین سیل اچ[3] [۲۴] و ژئو سیل[4] و سیل پلاس پلاس[5] و فورسیل و فورسیل۲ توسعه پیداکرده‌اند. این مدل نیازمند داشتن اطلاعاتی پیرامون خصوصیات طیفی پوشش گیاهی (خروجی مدل پراسپکت) و پشت زمینهٔ آن (خاک یا چمن یا برف یا ..) می‌باشد. علاوه بر موارد فوق تعیین هندسه سنجنده شیئ-خورشید (وضعیت زاویه ارتفاعی خورشید و سنجنده و آزیموت نسبی این دو) و مقداردهی به پارامترهای توصیف‌کننده 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

[1] Radiative Transfer Model

[2] Allen
[3] SAILH
[4] GeoSAIL
[5] SAIL++
[6] Average Leaf Angle
[7] Leaf Area Index

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

می‌تواند بازتابش نیم‌کره‌ای را نیز شبیه‌سازی کند، که در این تحقیق صرفاً از بازتابش یک جهته استفاده‌شده است.

۲-۱-۲- مدل اختلاط طیفی

به دلیل محدودیت توان تفکیک مکانی سنجنده‌ها، عمدتاً پیکسل‌ها به‌صورت 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 سنجش‌ازدور، در جستجوی پاسخ دقیق همین سوال است که چه پوشش‌هایی (مواد یا رفتارهای طیفی) و هر یک به چه نسبتی، با یکدیگر ترکیب‌شده‌اند. مدل‌های متعددی تاکنون برای پاسخگویی به این سوال ارائه‌شده است. در این مقاله از این مدل‌ها استفاده‌شده است، اما نه به‌منظور تفکیک طیف ثبت‌شده؛ بلکه به‌منظور اختلاط طیف‌های شبیه‌سازی‌شده با رفتار طیفی خاک. چراکه در پوشش‌های گیاهی، مخصوصاً مناطق جنگلی تنک (که غالب جنگل‌های ایران از این طبقه‌اند) معمولاً رفتارهای طیفی ثبت‌شده توسط سنجنده، ترکیبی از رفتار طیفی گیاه و رفتار طیفی خاک (به‌عنوان پشت زمینه) می‌باشد. مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل خطی است که در رابطه (۱) قابل‌مشاهده است[۲۶].

$$r = Mf + e \qquad \text{رابطه (۱)}$$

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.

۲-۲-تحلیل حساسیت

یکی از ابعاد مهم استفاده از مدل‌های انتقال تابش، تعیین مقادیر پارامترهای ورودی به‌صورت 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]. به‌عبارت‌دیگر هر قسمت از رفتار طیفی نهایی (به‌عنوان خروجی مدل‌های انتقال تابش) به کدام‌یک از پارامترهای ورودی حساس‌تر 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 بدین‌وسیله 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 درعین‌حال مطمئن بود که این کار چندان آسیبی به جامع بودن رفتارهای طیفی وارد نخواهد کرد. به‌طورکلی روش‌های تحلیل حساسیت را می‌توان به دو دسته موضعی و سراسری تقسیم نمود[۲۸]. در حالت موضعی به بیان ساده، تمامی پارامترهای ورودی به‌استثنای پارامتر موردمطالعه، 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. درنتیجه هر چه مدل پیچیده‌تر باشد و تعداد ورودی‌های آن بیشتر باشد (مخصوصاً در صورت وجود ارتباطی غیرخطی میان ورودی‌ها و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

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

برخلاف روش‌های موضعی، روش‌های سراسری به‌جای سنجش حساسیت مدل در یک نقطه از فضای مقادیر پارامترهای ورودی، حساسیت را در تمام فضای پارامترهای ورودی، می‌سنجند[۳۰]. به‌بیانی ساده برای سنجش تاثیر تغییرات یک متغیر بر خروجی مدل، به‌نوعی 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، بدین‌صورت 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 اولv_1، از کل واریانس خروجی، توصیف‌کننده تاثیر متغیر x_1 (به‌تنهایی) 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_1وv_{12}وv_{123} و ....) به واریانس کل خروجی، شاخص‌های حساسیت به‌دست خواهند آمد. اما همان‌گونه که مشخص است با افزایش تعداد پارامترها تعداد این شاخص‌ها به شکل قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ مثلاً برای ۱۰ پارامتر، ۱۰۲۳ شاخص حساسیت خواهیم داشت که از نظر محاسباتی نیز موضوع قابل‌توجهی است. به‌همین دلیل معمولاً از شاخص تاثیر کلی[1] (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 به‌گونه‌ای که دربردارنده تمامی تغییرات ناشی از x_1 ؛ به‌تنهایی و تعاملات x_1 با تمامی دیگر متغیرها(مانند v_{12} و v_{123} و ...)، خواهد بود.

۳-روش پیشنهادی و پیاده‌سازی

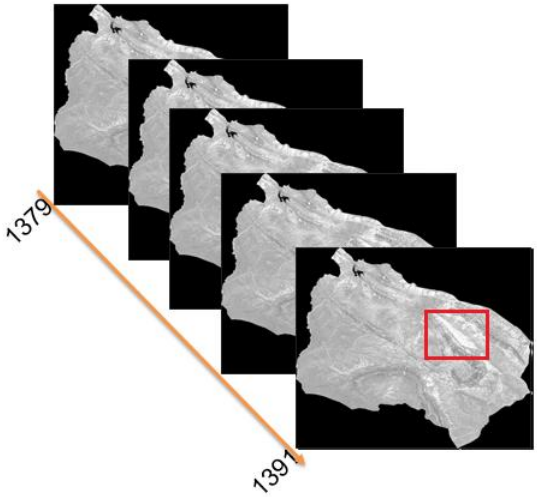
در این بخش به دو بحث پرداخته می‌شود که عبارتند از: ضرورت انجام کالیبراسیون نسبی و کالیبراسیون نسبی سنجنده‌های مورد مطالعه. ابتدا ضرورت انجام کالیبراسیون نسبی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لذا بررسی اینکه عدم انجام کالیبراسیون نسبی تا چه میزان می‌تواند در سری زمانی اختلال ایجاد کند، موضوع مورد تحقیق می‌باشد. این مورد را طور دیگر هم می‌توان بیان نمود، آیا بزرگی تغییرات کاذب (ناشی از تفاوت SRFها) نسبت به تغییرات طبیعی سری زمانی، مقداری قابل‌چشم‌پوشی خواهد بود یا خیر؟ ابتدا تخمینی از میزان بزرگی تغییرات طبیعی که در سری زمانی شاخص‌های موردمطالعه (NDVI,EVI,NDWI)، رخ می‌دهد، به‌دست آمد. بدین‌منظور تصاویر انتهای 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 (NDWI,EVI,NDVI) تشکیل شد[۳۴]. در شکل (۱) سری زمانی شاخص NDVI، به‌عنوان نمونه به نمایش درآمده است.

سپس قسمتی(۹۰۰ پیکسل لندست) از جنگل‌های بیوره (مشخص شده با مستطیل قرمز) به‌عنوان 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.

[1] Total-order index

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

سپس برای به‌دست 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 به‌دست می‌آید (اگر بردار مقادیر، دارای ۱۳ عنصر باشد، 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 به‌دست آمد که در جدول (۱) قابل مشاهده است.



شکل ۱ : سری زمانی شاخص NDVI شهرستان ملکشاهی

جدول ۱ : بزرگی تغییرات طبیعی شاخص‌های مورد مطالعه

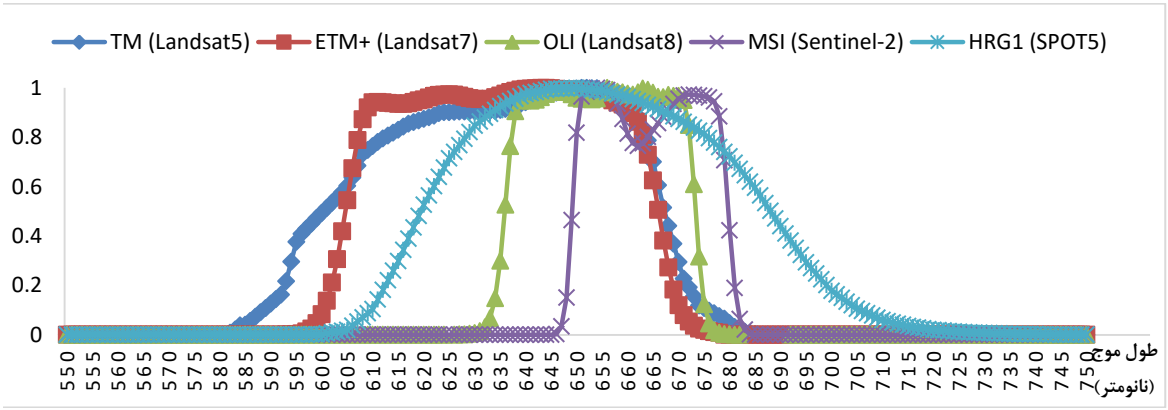
شاخص	بزرگی تغییرات طبیعی
NDVI	۰/۰۴۶
EVI	۰/۰۲۳
NDWI	۰/۰۲۵

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 ارائه‌شده است و 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 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

سنجنده‌های مختلف، درجات خاکستری به‌مقادیر بازتابش سطح، تبدیل‌شده 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، 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].



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

مثلا 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[1] برای سایر باندهای بازتابشی و سنجنده‌ها در جدول (۲) درج‌شده است.

مدل‌های ریاضی (مورد استفاده برای کالیبراسیون) در هر حال دارای ضرایبی هستند که باید حل (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. روشاول 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 قابل‌تصور است که ترجیحاً در زمان و مکان یکسان، تصویر اخذ نموده باشند. ثانیاً؛ داده‌های آموزشی باید تا حد امکان تمامی حالات ممکن را

[1] Full width at half maximum

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

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 به‌دست 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 حل‌شده 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.

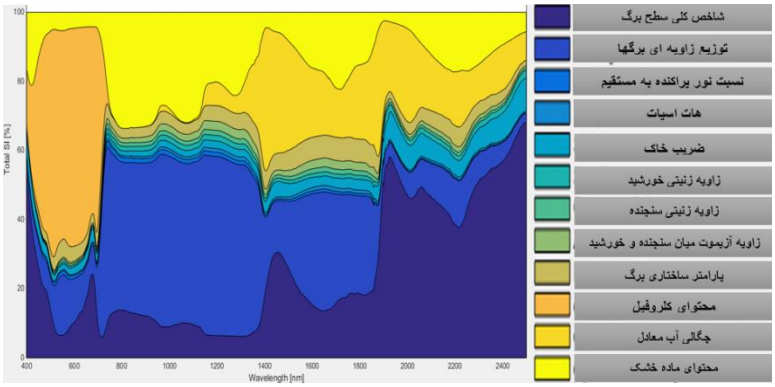
خصوصیات طیفی[۳۵] تاج پوشش گیاهی به‌طور عمده‌ای تحت تاثیر خصوصیات طیفی برگ گیاه و پشت زمینه پوشش گیاهی، می‌باشد. ترکیبات شیمیایی (تراکم رنگدانه‌های موجود و ...) و خصوصیات فیزیکی (ساختار درونی) برگ، تعیین‌کننده نحوه تعامل آن با امواج الکترومغناطیس می‌باشد. مدل‌های انتقال تابشی این نحوه تعامل را فرموله می‌کنند و یا به بیانی دیگر توصیفی ریاضی از چگونگی این تعامل ارائه می‌دهند. در گام اول، تحلیل حساسیت مدل انتقال تابش ترکیبی پراسپکت ۴ + فورسیل[1]، از طریق روش‌های سراسری واریانس محور، صورت گرفت. در این تحقیق از شاخص کلی حساسیت استفاده‌شده 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 حساسیت‌سنجی به نمایش در آمده است.

اولین نکته که از شکل (۳) حاصل می‌گردد علی‌رغم تعداد زیاد پارامترهای ورودی مدل ترکیبی، تعداد قابل‌توجهی 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[2] در برخی بازه‌های طول موجی به‌هیچ‌عنوان تاثیرگذار نیستند. شاید بتوان کمیت‌های شاخص سطح برگ[3] و توزیع زاویه‌ای برگ[4] و کلروفیل[5] 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،

[1] PROSPECT4+4SAIL
[2] Equivalent Water Thickness
[3] Leaf Area Index
[4] Leaf Distribution Angle
[5] Chlorophyll

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

مقادیر پارامترهای ورودی به مدل ترکیبی پراسپکت ۴ + فورسیل انتخاب شد. این مقادیر در جداول(۳و ۴) قابل‌مشاهده 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) ۳۵, σ=۴۰μ=
	محتوای ماده خشک(Cm)	۰/۰۰۱	۰/۰۳	یکنواخت(۳)
	چگالی آب (Cw)	۰/۰۰۱	۰/۰۵	یکنواخت(۳)

جدول ۴ : ورودی‌های مدل4SAIL

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

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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

.nc[1]) 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 بدین‌صورت است که در ابتدا تمامی ترکیبات ممکن ساخته شود و سپس به‌صورت کاملا تصادفی، کسری از آن‌ها انتخاب‌شده 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 شبیه‌سازی‌شده‌اند، ترکیب می‌گردد. لازم به ذکر است به‌طورکلی 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 به‌نوعی 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 به‌ندرت 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 ایالات‌متحده ارائه‌شده است، به ۱۲ طبقه تقسیم می‌گردند. خاک‌های منطقه‌ای که شامل کشور ایران و مناطق اطراف می‌شود، عموماً متعلق به چهار طبقه کلی، با نام‌های آلفوسول، اریدیسول، انتیسول، اینسپتیسول 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 به‌عنوان 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 گرفته‌شده، در جدول (۵) قابل‌مشاهده است.

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

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

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، به‌خوبی نماینده حالات مختلف پوشش‌های گیاهی (تراکم،گونه و..) باشند که این به‌معنای 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) به‌دست می‌آید.

[1] NetCDF

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

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

در رابطه (۲)، SRF نماد تابع حساسیت طیفی سنجنده، R نماد منحنی‌های طیفی شبیه‌سازی‌شده، λ نماد طول موج و پایین نویس i نیز نماد باند طیفی می‌باشند. شایان توجه است که سنجنده HRG مربوط به ماهواره اسپات۵ در باند آبی داده‌ای اخذ نمی‌کند، بنابراین امکان محاسبه شاخص EVI[1] برای این سنجنده وجود نخواهد داشت. با استفاده از رابطه (۲)، به‌عنوان‌مثال برای باند قرمز تمامی سنجنده‌های مورد مطالعه، به تعداد منحنی‌های طیفی، مقدار بازتابش شبیه‌سازی‌شده 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.

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

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

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

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 به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود. در این راستا معادلات کالیبراسیون نسبی، مقادیر سایر سنجنده‌ها را به‌منظور هماهنگ شدن با سنجنده MSI، تغییر می‌دهند.

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

رابطه (۶)
$band_{MSI} = Al_b * band_{other\ sensors} + Bl_b + \varepsilon$

رابطه (۷)
$Index_{MSI} = Al_i * Index_{other\ sensors} + Bl_i + \varepsilon$

در روابط(۶و ۷)، پارامترهای *band* و *Index* به ترتیب به مقادیر شبیه‌سازی‌شده 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 (به‌گونه‌ای 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

[1] Enhanced Vegetation Index
[2] Normalized Difference Water Index

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

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

رابطه (۸)

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

رابطه (۹)

$$Index_{MSI} = An_i * Index_{other\ sensors} + Bn_i * Index^2_{other\ sensors} + Cn_i + \varepsilon$$

در روابط (۸و ۹) نیز An و Bn نیز ضرایب معادلات کالیبراسیون می‌باشند که حالات مربوط به باند و شاخص، به ترتیب، با پایین نویسهای b و i از یکدیگر تفکیک‌شده‌اند. 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 میان سنجنده‌های مورد مطالعه در جدول (۶) به نمایش درآمده است. بدین منظور از معیارهای RMSEوNRMSE و بازه تغییرات مطلق استفاده‌شده است. معیار NRMSE که بر حسب درصد محاسبه‌شده است، مشخص می‌کند که به‌طورکلی هر یک از مقادیر چند درصد از متناظر خود(در سنجنده MSI) بیشتر یا کمتر می‌باشند.

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

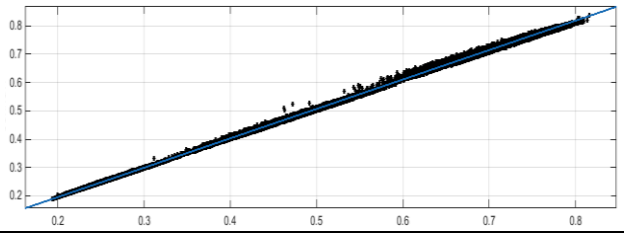
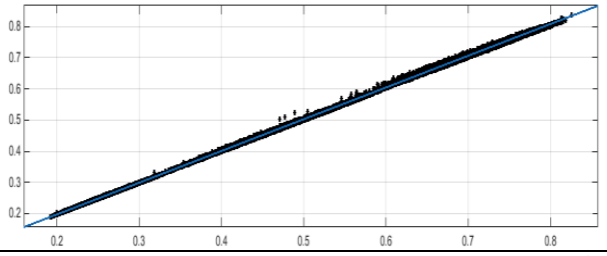
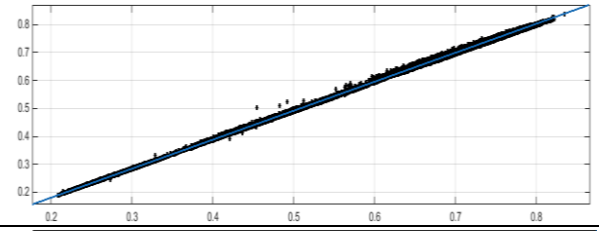
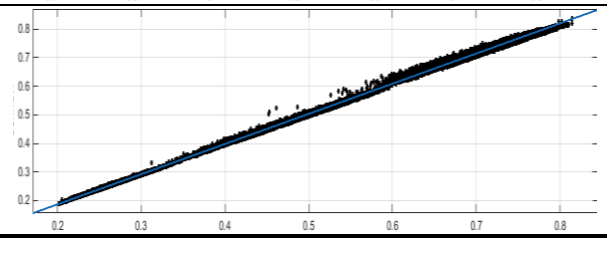
سنجنده / باند/ شاخص		TM	ETM+	OLI	HRG
آبی	RMSE(NRMSE)	۰/۰۰۵ (۹/۸٪-)	۰/۰۰۹ (۱۶/۳٪-)	۰/۰۰۷ (۱۳/۹٪-)	--
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۷ ,-۰/۰۰۲]	[-۰/۰۱۲,-۰/۰۰۳]	[-۰/۰۱۰ ,-۰/۰۰۳]	
قرمز	RMSE-NRMSE	۰/۰۰۲ (۲/۱۴٪)	۰/۰۰۱ (۱/۰۷٪)	۰/۰۰۳ (۲/۳۲٪-)	۰/۰۰۳ (۲/۶۳٪-)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۱,۰/۰۰۷]	[-۰/۰۰۱,۰/۰۰۴]	[-۰/۰۰۵,۰/۰۰۲]	[-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, ۰/۰۰۴۱]	[-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]	[-۰/۰۳, ۰/۰۱۱]
EVI	RMSE-NRMSE	۰/۰۱۶ (۴/۷۵٪-)	۰/۰۱۵ (۴/۶۳٪-)	۰/۰۱۰ (۲/۸۷٪-)	--
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۴۳,-۰/۰۰۱۱]	[-۰/۰۳۹,-۰/۰۰۴۳]	[-۰/۰۳۱, ۰/۰۰۷۸]	
NDWI	RMSE-NRMSE	۰/۰۰۶ (۵/۴۶٪-)	۰/۰۰۵ (۴/۶۴٪-)	۰/۰۰۶ (۵/۲۱٪-)	۰/۰۰۳ (۳/۱۵٪-)
	بازه تغییرات مطلق	[-۰/۰۰۶, ۰/۰۲۱۴]	[-۰/۰۰۵, ۰/۰۱۷۹]	[۰/۰۰۳, ۰/۰۰۷۵]	[-۰/۰۰۹, ۰/۰۰۳]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

در جداول شماره‌های(۷و ۸و ۹) نمودارهایی برای نمایش بصری میزان همبستگی شاخص‌های مورد مطالعه در این مقاله میان سنجنده‌های مختلف و سنجنده سنتینل-۲ (به‌عنوان مرجع) آورده شده است. در هر سطر، خصوصیات آماری رگرسیون نیز برای مقایسه کمی، قرار داده‌شده است. بررسی‌های صورت گرفته نشان دادند که استفاده از معادلات غیرخطی گرچه شاید تا حد اندکی نتایج را بهبود بخشند، اما کیفیت نتایج معادلات خطی به‌خوبی با حالات غیر خطی قابل رقابت است و نیازی به پیچیده کردن معادلات دیده نمی‌شود؛ در نتیجه برای تمامی شاخص‌های طیفی از رابطه (۷) و همچنین برای مقادیر بازتابشی نیز از رابطه (۶)، استفاده شد.

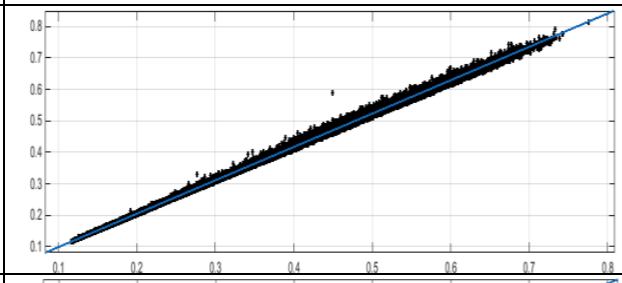
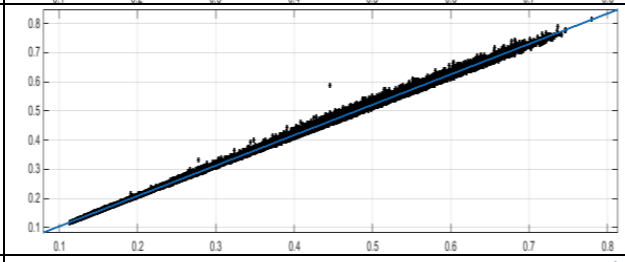
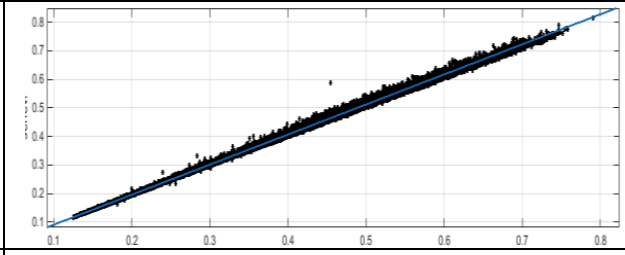
جدول ۷ : نمودار پراکنش نقطه‌ای شاخص گیاهی NDVI میان MSI و سنجنده‌های مختلف و خصوصیات آماری

سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	(٪)NRMSE	R^2
TM		۱٫۰۳۸	-۰٫۰۱۲	-۰٫۸	۰٫۹۹۹۶
ETM+		۱٫۰۱۹	-۰٫۰۰۷	-۰٫۵۱	۰٫۹۹۹۸
OLI		۱٫۰۳۶	-۰٫۰۲۶	۰٫۵۴	۰٫۹۹۹۸
HRG		۱٫۰۵۵	-۰٫۰۲۴	-۱٫۰۴	۰٫۹۹۹۳

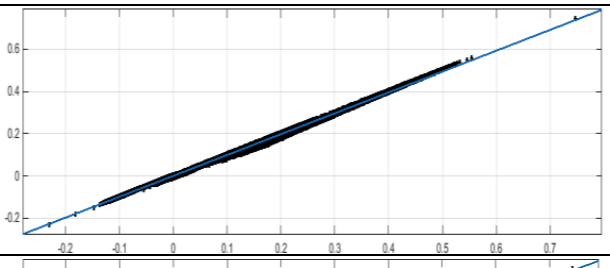
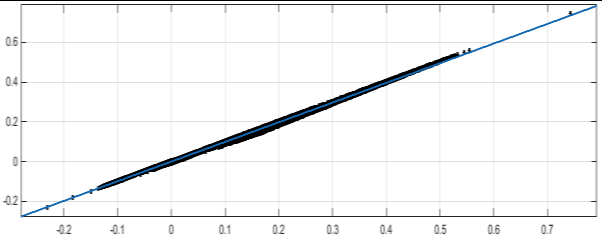
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

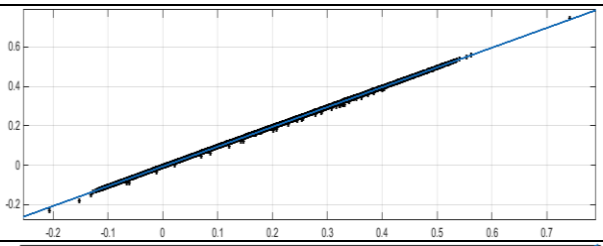
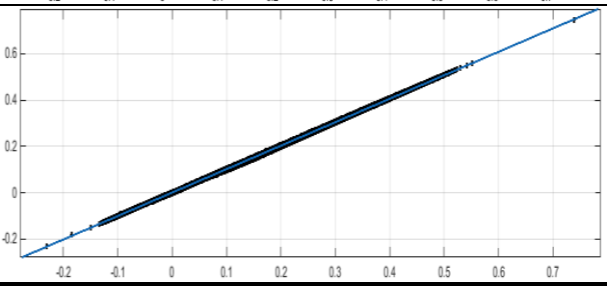
جدول ۸ : نمودار پراکنش نقطه‌ای شاخص گیاهی **EVI** میان **MSI** و سنجنده‌های مختلف و خصوصیات آماری

سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	(٪)NRMSE	R^2
TM		۱٫۰۶	-۰٫۰۰۷	-۱٫۴۶	۰٫۹۹۹
ETM+		۱٫۰۴۳	-۰٫۰۰۰۶	-۱٫۳۲۲	۰٫۹۹۹۲
OLI		۱٫۰۵۳	-۰٫۰۱۵	-۱٫۴۳۲	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	۵٫۰۵۶	۰٫۹۹۸۹
ETM+		۰٫۹۹	۰٫۰۰۰۱	۴٫۳۱	۰٫۹۹۹۲

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

سنجنده	نمایش بصری	خصوصیات آماری			
		A	B	NRMSE(٪)	R^2
OLI		۱٫۰۰۵	-۰٫۰۰۶	۰٫۸۳	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 ارائه‌شده است. همان‌طور که از اعداد و ارقام نمایان است، پیوستگی مقادیر باند فروسرخ، به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای 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	۱٫۰۸	۰٫۰۰۰۹	۱٫۲	۰٫۹۹۸۶
	قرمز	۱٫۰۳۷	-۰٫۰۰۶	-۰٫۹۳	۰٫۹۹۹۵
	فروسرخ	۱٫۰۰۴	-۰٫۰۰۱۲	-۰٫۰۵۵	۱
	فروسرخ کوتاه	۰٫۹۸۳۲	۰٫۰۰۵	۱٫۰۲	۰٫۹۹۸۶
ETM+	آبی	۱٫۱۶۱	۰٫۰۰۱۱	۱٫۸۶	۰٫۹۹۶۶
	قرمز	۱٫۰۲	-۰٫۰۰۲۸	-۰٫۵۸	۰٫۹۹۹۸
	فروسرخ	۱٫۰۰۳۵	-۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۳	۱
	فروسرخ کوتاه	۰٫۹۸۸۷	۰٫۰۰۳۸	۰٫۸۵	۰٫۹۹۹
OLI	آبی	۱٫۱۱۲۱	۰٫۰۰۱۹	۱٫۹	۰٫۹۹۶۴
	قرمز	۱٫۰۳۶۴	-۰٫۰۰۲۲	-۰٫۵۷	۰٫۹۹۹۸
	فروسرخ	۱٫۰۰۹۳	-۰٫۰۰۵۴	-۰٫۳۵۳	۰٫۹۹۹۵
	فروسرخ کوتاه	۰٫۹۹۶۶	۰٫۰۰۲	-۰٫۱۴	۱
HRG	آبی	--	--	--	--
	قرمز	۱٫۰۵۷۶	-۰٫۰۰۷۲	۱٫۱۸	۰٫۹۹۹۲
	فروسرخ	۱٫۰۰۴۸	-۰٫۰۰۱۹	۰٫۱۱	۰٫۹۹۹۹
	فروسرخ کوتاه	۱٫۰۰۲۹	-۰٫۰۰۲۲	-۰٫۳۶	۰٫۹۹۹۸

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

۴- اعتبارسنجی نتایج

در ادامه داده های مورد استفاده به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی انجام شده ارائه می‌شود.

۴-۱-داده‌های مورد استفاده

داده‌های به‌کارگرفته‌شده به‌منظور اعتبارسنجی نتایج در این تحقیق، استفاده از رفتارهای طیفی اندازه‌گیری شده در سطح تاج پوشش گیاهی می‌باشد. این اندازه‌گیری می‌تواند توسط سنجنده‌های فضابرد و یا هوابرد 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 کتابخانه‌های طیفی، بیشتر در سطح برگ است تا در سطح تاج پوشش. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری رفتار طیفی در سطح تاج پوشش، استفاده از سنجنده های هوایی فراطیفی است. لذا در این مقاله نیز از داده‌های سنجنده AVIRIS[1] که ا پوشش های گیاهی مختلف اخذشده است، استفاده شد.

مرجع این داده‌ها، سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) می‌باشد[۴۱]. به‌طورکلی هر یک از رفتارهای طیفی اخذشده از منبع مذکور، میانگین تعداد بالایی از پیکسل‌های اندازه‌گیری شده توسط سنجنده AVIRIS، از پوشش مدنظر می‌باشد. در این تحقیق از ۳۸ رفتار طیفی اندازه‌گیری شده در سطح تاج پوشش استفاده‌شده است. از طرفی چون رفتارهای طیفی موجود، نماینده تمامی حالات ممکن برای پوشش‌های گیاهی نیستند، به‌تنهایی برای ارزیابی نتایج کافی نیستند. بنابراین ۲۰٪ داده‌های شبیه‌سازی‌شده نیز به مجموعه داده‌های مورد استفاده برای اعتبارسنجی افزوده شد.

۴-۲- ارزیابی معادلات

داده‌های مورد استفاده برای ارزیابی نتایج، طبق روند گفته‌شده در قسمت قبل (بخش ۴-۱) آماده شدند. همان‌طور که مطرح شد، این داده‌ها ترکیبی از داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری می‌باشند که مورد ارزیابی کیفیت قرار گرفته‌اند. در جدول (۱۱)، RMSE مدل‌های کالیبراسیون باندهای بازتابشی مختلف و شاخص‌های گیاهی مورد مطالعه، ارائه‌شده است. مقادیر جدول (۱۱) از کیفیت قابل‌قبول نتایج این تحقیق حکایت می‌کنند.

۵-نتیجه‌گیری و پیشنهادات

سطح زمین بیش از ۳۰ سال است که توسط انواع سنجنده‌ها، مشاهده و اندازه‌گیری می‌شود. 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 (ماهواره‌های لندست و اسپات-۵) شده است. ترکیب داده‌ها و محصولات این دو مجموعه با سنجنده MSI حتی در ساده‌ترین حالت خود، نیازمند انجام تحقیقاتی است تا نتایج نهایی از آسیب‌های محتمل صدمه نبینند. در این مقاله تاثیر عامل تابع حساسیت طیفی (به تنهایی) بر روی امکان پیوستگی داده‌ها و محصولات ماموریت‌های فضایی (سری لندست و اسپات-۵ با سنتینل-۲)، بررسی شد. با استفاده از مدل‌های انتقال تابش، بالغبر پنجاه‌هزار منحنی طیفی در سطح تاج پوشش گیاهی شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از مدل اختلاط طیفی خطی، رفتار طیفی خاک نیز با رفتارهای طیفی پوشش‌های گیاهی، ترکیب گشت و درنهایت صد و پنجاه‌هزار رفتار طیفی به دست آمد. سپس با استفاده از تابع حساسیت طیفی، مقادیر باندی و به دنبال آن شاخص‌های طیفی محاسبه گشت. سرانجام با استفاده از روابط رگرسیون خطی برای

[1] Airborne Visible/Infrared Imaging Spectromete

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

شاخص‌های طیفی و مقادیر بازتابشی، نحوه ارتباط میان سنجنده‌های مختلف با سنجنده سنتینل-۲ تعیین شد. نتایج به‌طورکلی 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 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.

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	۰/۰۰۵
EVI	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۸	--
NDWI	۰/۰۰۵۵	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۶

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، تااندازه‌ای 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 برخوردار است. به‌طورکلی با توجه به همبستگی بالای به‌دست‌آمده برای تمامی شاخص‌ها و باندهای بازتابشی، این انتظار می‌رود که در برخی از حالات (با توجه به‌دقت 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 سنجنده های 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 سنجنده هایی 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]
[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

سپاسگزاری

در ایـــن تحقیـــق از ابـــزار ARTMO[۳۲ و ۴۲] استفاده‌شده است. این ابزار تحت نرم‌افزار متلب بـوده و با بهره‌مندی از محیط گرافیکی، زمینه مناسـبی جهـت برخی از پردازش‌ها از جمله شبیه‌سازی مقـادیر طیفـی، در اختیـار ایـن تحقیـق قـرار داد. در همـین راسـتا از آقای دکتر Jochem Verrelst قدردانی به‌عمل می‌آید.

مراجع

[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 bio-geophysical 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.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

[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 natinal conference on geospatial information technology(NCGIT), 2016.

[35] E. M. Middleton and E. A. Walter-Shea,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.5, No.1, Spring 2017

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 Imanyfar [1], 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

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-06]

[DOI: 10.29252/jgit.5.1.111]