

بررسی تاثیر تابع حساسیت طیفی در تهیه سری زمانی شاخص های گیاهی میان سنجنده های ماهواره های لندست و سنتینل-2

صدرا ایمانی فر^{*1}، مهدی حسنلو²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: sadra.imanyfar@ut.ac.ir

2- استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی: hasanlou@ut.ac.ir

چکیده:

توانمندی تکنیک های سنجش از دوری به منظور بررسی پدیده های طبیعی در جوامع علمی، به اثبات رسیده است. برخی از پدیده های طبیعی مانند پوشش گیاهی نیازمند مطالعات بلندمدت؛ فراتر از طول عمر یک ماهواره، می باشند. از سوی دیگر ترکیب داده های سنجنده های مختلف میتواند منجر به پیدایش تغییرات کاذب در شاخص های گیاهی گردد. در این شرایط باید با انجام کالیبراسیون نسبی (میان سنجنده ای)، حتی الامکان تاثیر عوامل مزاحم را کاهش داد. وجود شباهت هایی میان سری ماهواره های لندست و ماهواره نوظهور سنتینل-2، امکان ترکیب داده های این دو را فراهم آورده است. در این تحقیق با مدلی خطی، کالیبراسیون سنجنده های لندست (OLI, ETM+, ETM) نسبت به سنجنده سنتینل-2 با هدف حذف تغییرات کاذب ناشی از تفاوت های توابع حساسیت طیفی، صورت پذیرفت. در این میان از مدل های انتقال تابش PROSPECT5 و 4SAIL جهت شبیه سازی منحنی های رفتار طیفی استفاده شد. نتایج از قابلیت پیوستگی بالای مقادیر بازتابش مادون قرمز و شاخص NDVI میان این دو مجموعه، حکایت میکنند. مقدار r^2 برای شاخص NDVI حدود 0/99 بدست آمد. در طرف مقابل مقدار r^2 برای شاخص EVI حدود 0/55 حاصل شد، که نشان دهنده هماهنگی ضعیف میان لندست و سنتینل-2 در این شاخص است.

واژگان کلیدی: تابع حساسیت طیفی، شبیه سازی رفتار طیفی، کالیبراسیون نسبی

1- مقدمه

از مهمترین کاربردهای دانش سنجش از دور که ابزار اصلی آن تصاویر ماهواره ای میباشد، پایش روند تغییرات اجزای مختلف محیط زیست بشر است [1]. وضعیت پوشش های گیاهی و اقلیم مناطق مختلف کره زمین، همواره مدنظر محققین علوم زمین و شاخه های مرتبط بوده است. تصاویر ماهواره ای چند طیفی و فراطیفی امکان مناسبی را جهت بررسی میزان فعالیت فتوسنتز و همچنین پارامترهای مختلف بیوفیزیکی در پوششهای گیاهی فراهم آورده اند [2]. از جمله روش های پایش پوشش گیاهی توسط تصاویر ماهواره ای، استفاده از شاخص های گیاهی در طی زمان میباشد [3]. که به دلایل مختلف مانند سادگی الگوریتم ها از اقبال قابل توجهی در جوامع سنجش از دوری برخوردار بوده است. در این میان شاخص هایی چون NDVI و EVI از شاخص های پر کاربرد محسوب می گردند.

بررسی روند تغییرات پوشش های گیاهی مخصوصا در سطح جهانی معمولا نیازمند داده‌هایی در مقیاس‌های زمانی بزرگ (چندین دهه) میباشد، به طوریکه از محدوده زمانی فعالیت یک ماهواره سنجشی فراتر خواهد بود. با توجه به این واقعیت، استفاده از چندین سنجنده و ترکیب داده های آنها، در این حوزه از تحقیقات، ضروری می‌باشد.

ترکیب محصولات سنجنده های مختلف، چه در سطح مقادیر بازتابش و چه در سطوح پردازشی بالاتر (شاخص‌های گیاهی) با چالش‌های متعددی روبروست. به طور خلاصه وجود تفاوت و عدم هماهنگی میان سنجنده‌های مختلف از جهات متعدد، منجر به پیدایش این چالش‌ها گشته است. این تفاوت‌ها در جهات متعددی مانند: زمان تصویر برداری (و به دنبال آن وضعیت اتمسفر در لحظه تصویربرداری)، زاویه دید نسبت به منطقه، میزان خطای موجود در کالیبراسیون رادیومتریکی، میزان خطای موجود در فرآیند زمین مرجع سازی و تابع حساسیت طیفی مربوط به باند یکسان؛ وجود دارند. [4]

به بیانی ساده، ایراد در این است که تمامی ناهماهنگی های فوق میتوانند باعث ایجاد تغییر در مقدار شاخص در طی زمان (از یک اپک به اپک بعد) گردند، در صورتی که در واقع پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه هیچ گونه تغییری را تجربه نکرده است. از نگاهی دیگر میتوان تغییرات رخ داده در شاخص‌ها را، به دلیلی غیر از دلیل اصلی و مدنظر (تغییر پوشش گیاهی)، تغییرات کاذب یا مصنوعی نامید.

در زمینه تصاویر، با قدرت تفکیک مکانی متوسط، سری ماهواره‌های لندست (سنجنده‌های TM و ETM+ و OLI) با سابقه ای بیش از 30 سال پیش‌تاز بوده‌اند. اما با ارسال ماهواره sentinel-2A (حامل سنجنده MSI) در اواسط سال 2015 گزینه مشابهی در این زمینه پیش روی محققان قرار گرفت. چند تمایز اصلی این سنجنده با سنجنده‌های شناخته شده ماهواره های لندست (به منظور معرفی مختصر سنتینل) عبارتست از: 1) فاقد هر گونه باند حرارتی و پانکروماتیک 2) اخذ داده در 3 باند مجزا در محدوده 3 red edge (افزایش قدرت تفکیک مکانی در باندهای متناظر 10 متر و 20 متر).

در پروسه طراحی و کالیبراسیون این سنجنده سعی بر این بوده است که با سری تصاویر لندست هماهنگی وجود داشته باشد، به طوریکه در این راستا همکاری هایی میان آژانس فضایی اروپا و سازمان هوا فضای آمریکا (ناسا) صورت گرفته است [5]. بنابراین، با توجه به موارد مطرح شده، انتظار می‌رود که در تحقیقات آتی شاهد تلفیق داده ها و محصولات سنتینل و لندست برای کاربرد های مختلف باشیم. این موضوع ضرورت انجام بررسی‌های دقیقتری را در زمینه هماهنگی مقادیر بازتابش و شاخص گیاهی، میان این دو روشن می‌سازد.

هدف از این تحقیق نیز بررسی همین موضوع می‌باشد. در این پروژه از سنجنده های TM و ETM+ و OLI مربوط به ماهواره های لندست و سنجنده MSI مربوط به ماهواره سنتینل استفاده شده است. روند کار بدین صورت خواهد بود که در ابتدا با استفاده از مدل انتقال تابش PROSPECT5، تعداد بالایی رفتار طیفی انعکاسی و عبوری در مقیاس برگ پوشش گیاهی، شبیه‌سازی میشوند. در مرحله بعد هر دو منحنی (بازتابش و عبوری) به همراه رفتار بازتابش پس زمینه (خاک یا ...) وارد مدل انتقال تابش 4SAIL می‌گردند تا منحنی طیفی یک جهت-یک جهت و یک جهت-نیمکره در مقیاس تاج پوشش بدست آید. سپس با استفاده از توابع حساسیت طیفی باند های آبی، قرمز، مادون قرمز از سنجنده

های مورد مطالعه، مقادیر بازتابش مربوط به آن باند، شبیه سازی می‌گردد. با توجه به هدف تحقیق، اثر اتمسفر لحاظ نمی‌شود و برای آن مدل سازی صورت نمی‌گیرد. با استفاده از مقادیر بازتابش شبیه‌سازی شده، شاخص‌های گیاهی NDVI و EVI محاسبه می‌گردند. در نهایت با در نظر گرفتن سنجنده سنتینل به عنوان مرجع، معادله خط که در طی آن داده‌های سایر سنجنده‌ها بر تصاویر سنجنده سنتینل منطبق می‌شود، بدست می‌آید. مقادیر حدود 0/99 برای معیار r^2 برای شاخص NDVI، حکایت از قابلیت بالای این شاخص برای مطالعات سری زمانی میکند.

2- پیشینه تحقیق

تا کنون تحقیقات متعددی در این زمینه صورت پذیرفته است که در این نوشتار به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. پایش کمی و کیفی پوشش گیاهی با توجه به هدف مورد انتظار میتواند در سطوح مختلف از قدرت تفکیک مکانی صورت پذیرد. سری تصاویر سنجنده‌های AVHRR و MODIS و VIIRS (به ترتیب مربوط به ماهواره‌های NOAA و TERRA/AQUA و SUOMI NPP)، که از نقطه آغازین این مجموعه حدود 35 سال می‌گذرد، گزینه مناسبی جهت انجام این بررسی با تصاویر قدرت تفکیک پایین (مخصوصاً در سطح جهانی) میباشد [6]، [7].

در [3] بر مبنای همین مجموعه از تصاویر، به بررسی تاثیر وضعیت های مختلف اتمسفر بر مقادیر بازتابش و شاخص گیاهی برای سنجنده‌های فوق اقدام شده است. نتیجه این تحقیق، بیان گر حساسیت کمتر سنجنده‌های مادیس و VIIRS نسبت به سنجنده AVHRR، برای تاثیر بخار آب موجود در اتمسفر میباشد.

در تحقیقات صورت گرفته، اختلاف در مقادیر بازتابش، ناشی از تابع حساسیت طیفی حتی در سنجنده‌های یکسان از ماهواره‌های مختلف AVHRR، از -25٪ تا +12٪ برای باند قرمز و -2٪ تا +4٪ برای باند مادون قرمز، گزارش شده است [8]، [9].

در تحقیق دیگری [10]، به بررسی و مقایسه 21 سنجنده مورد استفاده در سنجش از دور از دیدگاه تابع حساسیت طیفی پرداخته شده است.

در [4]، از دیدگاه تابع حساسیت طیفی، سری زمانی شاخص NDVI میان سنجنده سنتینل و چند سنجنده دیگر مورد بررسی واقع شده است.

لازم به ذکر است، از ترکیب دو مدل PROSPECT و 4SAIL علاوه بر کاربرد برای شبیه سازی، در زمینه های مختلف دیگر مانند [20]، استفاده شده است.

تحقیق پیش رو، از این حیث که متمرکز بر قابلیت ارتباط (و ادامه پذیری مقادیر ناشی از) ماهواره لندست به ماهواره سنتینل میباشد، و از سوی دیگر بررسی شاخص LAI، متمایز است.

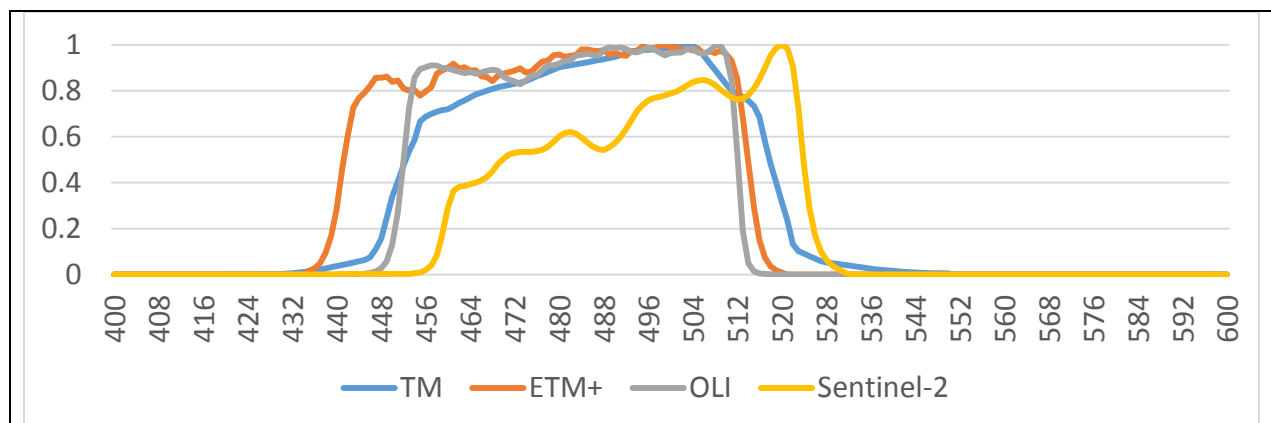
3- روش مورد استفاده و نتایج

کالیبراسیون سنجنده‌های مختلف نسبت به یکدیگر (یا به تعبیر دیگر نسبت به یک سنجنده مرجع)، در این متن کالیبراسیون نسبی نامیده می‌شود. در این پروسه عوامل مختلف که منجر به پیدایش تغییرات کاذب می‌شوند، توسط یک رابطه ریاضی مدلسازی می‌گردند و به نوعی اثر آن عوامل جبران می‌شود. به طور کلی مدل‌های ریاضی حتی در ساده‌ترین حالت خود یعنی مدل‌های خطی (مورد استفاده در این تحقیق)؛ دربردارنده پارامترهایی خواهند بود که باید برآورد گردند.

اولین راهی که برای برآورد این پارامترها به ذهن میرسد، استفاده از تصاویر اخذ شده توسط سنجنده‌های مورد مطالعه است. این روش که میتوان آن را روش مستقیم نامید، با محدودیت‌های جدی روبروست. این روش برای کالیبراسیون نسبی سنجنده‌هایی قابل تصور است که در زمان و مکان یکسانی دارای تصویر باشند. علاوه بر این، حتی با تحقق شرط پیشین، تاثیر سایر عوامل ناهماهنگی (مخصوصاً آن‌هایی که مربوط به خصوصیات سنسور است) کماکان باقی خواهد بود و در نتیجه این روش نمی‌تواند پاسخگوی هدف این تحقیق (بررسی تاثیر عامل تابع حساسیت به تنهایی) باشد.

روش دیگری برای کالیبراسیون نسبی موجود است که محدودیت‌های روش سابق را ندارد. مبنای این روش منحنی رفتار طیفی پوشش‌های گیاهی در حالات مختلف است، که میتواند از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی (طیف سنج) و یا تصویربرداری فراطیفی هوایی و یا شبیه‌سازی به کمک مدل‌های انتقال تابش فراهم شود [4].

همانطور که در قبل ذکر شد، در این تحقیق هدف بررسی تاثیر اختلاف موجود در تابع حساسیت طیفی سنجنده‌های مختلف در مقادیر بازتابش و شاخص‌های گیاهی می‌باشد. بنابراین از روش دوم به منظور کالیبراسیون نسبی استفاده شده است. همچنین از مدل‌های انتقال تابش در مقیاس برگ و تاج پوشش، به هدف شبیه‌سازی رفتار طیفی استفاده گشته است. توابع حساسیت مورد استفاده در این تحقیق از آدرس <http://landsat.usgs.gov/instructions.php> دریافت گردید. در (شکل 1) توابع حساسیت سنجنده‌های مختلف، جهت مقایسه بصری تفاوت‌های موجود، به نمایش درآمده است.



شکل 1. تابع حساسیت طیفی باند آبی در سنجنده‌های مورد مطالعه

خصوصیات طیفی (مثلا بازتابش و عبور) [11] تاج پوشش گیاهی به طور عمده ای تحت تاثیر خصوصیات طیفی برگ گیاه و پشت زمینه پوشش گیاهی، می‌باشد. ترکیبات شیمیایی (تراکم رنگدانه های موجود و ...) و خصوصیات فیزیکی (ساختار درونی) برگ، تعیین کننده نحوه تعامل آن با امواج الکترومغناطیس میباشد. مدل های انتقال تابشی این نحوه تعامل را فرموله میکنند و یا به بیانی دیگر توصیفی ریاضی از چگونگی این تعامل ارائه میدهند [12]. این مدل ها در دو مقیاس برگ و تاج پوشش گیاهی توسعه داده شده‌اند. سنسورهای فضایی در خوشبینانه ترین حالت، در مقیاس تاج پوشش گیاهی داده اخذ میکنند.

در این تحقیق برای شبیه سازی رفتار طیفی در مقیاس برگ از مدل PROSPRCT [12] استفاده شده است. اعتبار این مدل در تحقیقات دیگری مورد بررسی قرار گرفته است [13]. این مدل بر مبنای مدل تعمیم یافته صفحه ای، ارائه شده توسط allen [14]، بنا شده است [15]. در مدل allen، برگ به صورت یک یا چند صفحه جاذب، با سطحی ناهموار در نظر گرفته میشود به طوریکه امواج تابیده شده به صورت ایزوتروپیک بازتاب میشوند [16].

به طور کلی ورودی های این مدل در دو دسته تقسیم میشوند: 1) پارامتر ساختاری برگ (N) که همان تعداد لایه های تشکیل دهنده برگ میباشد. 2) پارامترهای بیوشیمیایی برگ که از این جمله میتوان به تراکم رنگدانه های مختلف (CHab, brown pigments, ...) در برگ اشاره داشت. [16]

در مقیاس تاج پوشش گیاهی نیز مدل های متعددی ارائه شده‌اند که در این تحقیق از مدل 4SAIL استفاده شده است. در واقع مدل 4SAIL یکی از حلقه های پایانی از زنجیره مدل‌هایی است که در سال 1981 میلادی با مدل SAIL [17]، [18] آغاز شده و پس از آن به صورت متوالی به مدل‌های دیگری با عنوان SAILH [19] و GeoSAIL++ و 4SAIL2 توسعه پیدا کرده‌اند.

این مدل نیازمند داشتن اطلاعاتی پیرامون خصوصیات طیفی پوشش گیاهی (خروجی مدل PROSPECT) و پشت زمینه آن (خاک) میباشد. علاوه بر موارد فوق تعیین هندسه سنجنده-شی-خورشید (وضعیت زاویه ارتفاعی خورشید و سنجنده و آزیموت نسبی این دو) و پارامترهای توصیفگر پوشش گیاهی در سطح تاج پوشش (LAI و ALA) و چند پارامتر دیگر نیز ضرورت دارد. پس از تعیین این موارد، 4SAIL میتواند منحنی بازتابش تاج پوشش را در یک جهت مشخص شبیه سازی نماید. علاوه بر این میتواند بازتابش نیم کره ای را نیز شبیه سازی کند.

با توجه به تحقیقات پیشین، بازه های مقادیر ورودی به مدل‌های 4SAIL و PROSPECT5 انتخاب شدند (جدول 1 و 2)، به گونه ای که تا حد امکان، حالات مختلف پوشش های گیاهی را دربرگیرد. با توجه به این که تعداد پارامتر های هر دو مدل مجموعاً 14 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 امکان شبیه سازی یک منحنی طیفی وجود دارد) به صورت چشمگیری بالا

خواهد بود (بیش از 6 میلیون حالت). این تعداد مستلزم حجم بالایی از پردازش خواهد بود که طبعاً زمان زیادی را می‌طلبد و از سوی دیگر هم ضرورتی بر انجام آن نیست.

یک راه حل این است که تعداد مقادیری که توسط پارامترهای مختلف پذیرفته میشود، کاهش یابد تا تعداد ترکیبات نهایی نیز کاهش یابد. این راه حل به دلیل اینکه داده‌های آموزشی را به حالات خاصی محدود میکند، مطلوب نیست. راه حل دیگر (مورد استفاده در این تحقیق) 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 پروسه شبیه‌سازی گردند. تصادفی بودن زیرمجموعه انتخابی که دارای بیست هزار عضو است، این انتظار را ایجاد میکند که حالات و وضعیت‌های مختلف، به نسبت تقریباً یکسانی در زیرمجموعه نهایی حضور داشته باشند.

جدول 1. پارامترهای ورودی به مدل‌های انتقال تابش *PROSPECT5* و *4SAIL*

model	Parameter	min	max	step
<i>PROSPECT5</i>	Leaf structure parameter(N)	1	2.5	0.5
	Chlorophyll(Cab)	20	100	10
	Carotenoids	5	5	Const.
	Brown pigments	0.25	0.75	0.25
	Dry matter content(Cm)	0.025	0.050	0.025
	Water thickness(Cw)	0.025	0.050	0.025
<i>4SAIL</i>	Leaf area index	0	6	1
	Average leaf angle	45	90	15
	Hot spot effect	0.05	0.05	Const.
	Soil coefficient	0	0	Const.
	observer zenith angle	0	45	15
	Solar zenith angle	0	45	15
	Diffuse/Direct radiation	10	50	10
	Azimuth	0	180	30

پس از آماده‌سازی منحنی‌های رفتار طیفی (20 هزار منحنی) مقادیر بازتابش باندهای آبی، قرمز و مادون قرمز، مربوط به هر یک از سنجنده‌های مورد مطالعه، با استفاده از تابع حساسیت طیفی، از رابطه زیر بدست می‌آید. [4]

$$\text{simulated band}_i \text{ reflectance value} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R(\lambda_i) * SRF(\lambda_i) d(\lambda_i)}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} SRF(\lambda_i) d(\lambda_i)}$$

تا بدین جا، 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. بنابراین باید سعی کرد تا منحنی‌های رفتار طیفی، به خوبی نماینده طیف های مختلف پوشش های گیاهی (تراکم، گونه و...) باشند تا نتایج نهایی از قابلیت تعمیم بالاتری برخوردار باشند.

پس از شبیه سازی مقادیر باندهای مدنظر برای هر سنجنده، شاخص های گیاهی EVI [21] و NDVI از طریق روابط زیر محاسبه میگردند.

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

$$EVI = 2.5 \times \left(\frac{(NIR - RED)}{(NIR - 6 \times RED - 7.5 \times BLUE)} \right)$$

تا کنون صرفاً به علت تفاوت در تابع پاسخ طیفی، مجموعه مقادیر بازتابش بانندی و شاخص، نسبت داده شده به یک منحنی طیفی توسط هر یک از سنجنده ها متفاوت از سایر سنجنده ها خواهد بود.

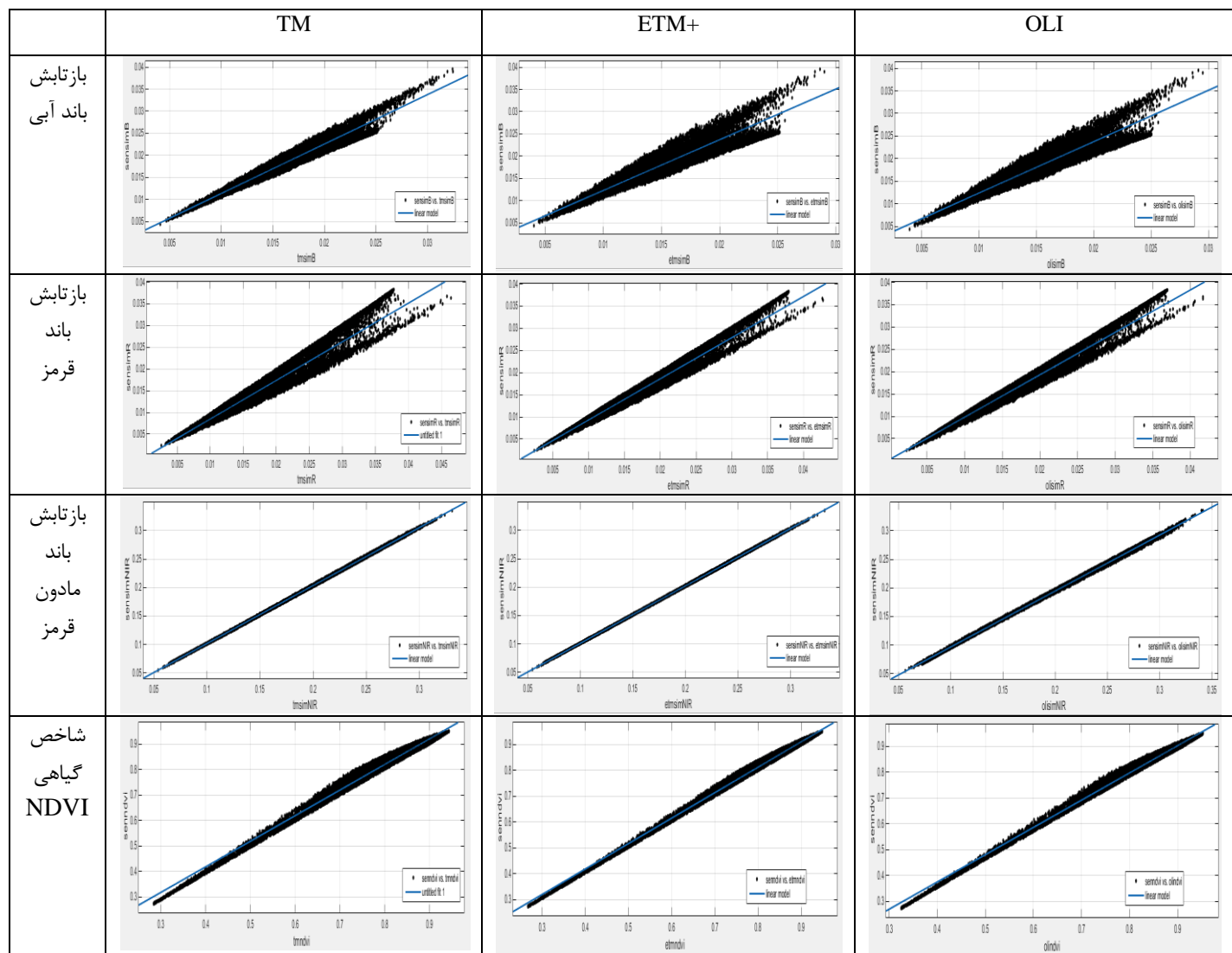
در مرحله بعد سنجنده MSI به عنوان مرجع در نظر گرفته میشود. به این معنا که معادلات کالیبراسیون نسبی، به منظور هماهنگ سازی (منطبق شدن) مقادیر بازتابش و شاخص گیاهی سایر سنجنده ها با سنجنده MSI محاسبه خواهند شد. در این تحقیق از معادله ساده خطی استفاده شده است و لزومی برای پیچیده سازی مدل تشخیص داده نشد. رابطه کلی به صورت زیر میباشد. با این تفاوت که متغیر موجود در معادله میتواند مقادیر بازتابش و یا شاخص گیاهی باشد.

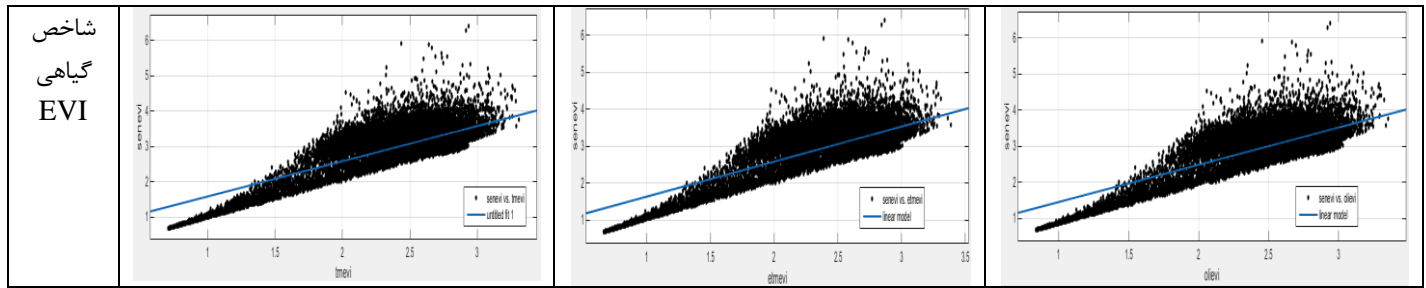
$$variable_{MSI} = a * variable_{landsat\ sensor} + b$$

نتایج حاصل در جدول 3 به صورت کمی و در شکل 3 به صورت بصری قابل ملاحظه است.

جدول 3. پارامتر های آماری معادلات کالیبراسیون نسبی، میان سنجنده سنتینل و سایر سنجنده ها مورد مطالعه

	پارامتر آماری	TM	ETM+	OLI
بازتابش باند آبی	شیب معادله خط R-square RMSE	1/122 0/9524 0/0011	1/141 0/8747 0/0017	1/138 0/8862 0/0016
بازتابش باند قرمز	شیب معادله خط R-square RMSE	0/8893 0/9386 0/0017	0/9285 0/9731 0/0011	0/9498 0/9729 0/0011
بازتابش باند مادون قرمز	شیب معادله خط R-square RMSE	1/001 1 0/00015	1/02 1 0/00008	0/9771 0/999 0/0017
شاخص گیاهی NDVI	شیب معادله خط R-square RMSE	1/003 0/9842 0/0148	0/9938 0/9928 0/00999	1/053 0/9913 0/011
شاخص گیاهی EVI	شیب معادله خط R-square RMSE	0/9963 0/5606 0/3858	0/9571 0/5463 0/392	1/032 0/5569 0/3874





شکل 3. نمودارهای پراکنش نقطه ای مقادیر بازتابش و شاخص گیاهی میان سنتینل و سنجنده های مختلف لندست

اولین نتیجه ای که میتواند بدست آید، هماهنگی بالای مقادیر بازتابش باند مادون قرمز می باشد، به طوریکه مقدار ضریب تعیین (r^2) برای این باند، به مقدار یک میل دارد. همانطور که از سطرهای مربوط به باند آبی و قرمز به وضوح قابل رویت است (شکل 3)، مجموعه نقاط فقط در اطراف یک خط پراکنده نشده اند. به بیانی دیگر در صورت برازش دو خط به مجموعه نقاط، به خروجی مطلوب تری دست پیدا می کردیم. این موضوع باید با دقت بیشتری بررسی شود، اما شاید علت آن وابستگی ضرایب کالیبراسیون نسبی به پوشش زمینی باشد.

نکته دیگری که به صورت بصری قابل درک است، نمودار توزیع نقاط مربوط به شاخص EVI است. با توجه به مقادیر کمی و آماری در ارتباط با EVI، مقادیر نسبتاً پایین ضریب تعیین، مشاهده می گردد. این نکته، سری محصولات EVI (از سنجنده های لندست به سنتینل) را دچار خلل میکند. شاید بتوان علت امر را در نقش آفرینی مقادیر بازتابش، مربوط به باند آبی در معادله این شاخص دانست. چرا که میزان ناهماهنگی مربوط به باند آبی، در مجموع نسبت به سایر باند ها، مقدار بالاتری را داراست.

اما نکته مثبت و مهمی که از این تحقیق حاصل گشت، امکان تشکیل دادن سری محصولات NDVI از سنجنده های لندست به سنتینل میباشد. همانطور که مشاهده میشود، مقادیر ضریب تعیین (r^2) حدود 0/99 حاصل شده است. مقدار این پارامتر آماری برای سنجنده های OLI و ETM+ به بالاتر از 0/99 میرسد که شاید با توجه به دقت مورد نیاز در برخی از کاربردها، حتی عدم اعمال معادله کالیبراسیون به مقادیر شاخص گیاهی، به سری زمانی خدشه ای وارد نسازد.

4- نتیجه گیری:

سطح زمین بیش از 30 سال است که توسط انواع سنجنده ها، مشاهده و اندازه گیری می شود. ارسال سنجنده MSI (بر روی سکوی سنتینل-2) در سال 2015، توسط سازمان فضایی اروپا؛ منجر به افزایش پویایی زنجیره 30 ساله تصاویر اپتیک با قدرت تفکیک مکانی متوسط (لندست) شد. تلفیق داده ها و محصولات این دو سنجنده حتی در ساده ترین

حالت خود، نیازمند انجام تحقیقاتی است تا صدمه‌ای بر نتایج نهایی از آسیب‌های محتمل، وارد نگردد. در این مقاله تاثیر عامل تابع حساسیت طیفی (به تنهایی) بر روی پیوستگی داده‌ها و محصولات این دو ماموریت فضایی (لندست و سنتینل-2) در سری‌های زمانی، بررسی شد. با استفاده از مدل‌های انتقال تابش، 20000 منحنی طیفی در سطح تاج پوشش گیاهی شبیه سازی شد و پس از آن به وسیله تابع حساسیت طیفی سنجنده‌ها، مقادیر بازتابش باندهای شبیه سازی شد. همانطور که در نتایج به نمایش درآمد، هماهنگی بیشتر مقادیر باند مادون قرمز، به صورت قابل توجهی نسبت به دو باند دیگر مشهود است (همچنین نتایج، نشان دهنده هماهنگی بالاتر باند RED نسبت به باند BLUE میباشد). علاوه بر این، پیوستگی مقادیر دو شاخص پرکاربرد NDVI و EVI نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج از هماهنگی مقادیر NDVI و در نقطه مقابل آن، ناهماهنگی و عدم انطباق شاخص EVI حکایت میکنند.

مواردی به عنوان پیشنهاد، برای مراحل آتی این تحقیق بیان میگردد. به نظر میرسد با ارزیابی نتایج این تحقیق (معادلات کالیبراسیون نسبی) روی منحنی‌های طیفی اندازه‌گیری شده در مقیاس تاج پوشش، امکان سنجش میزان اعتبار نتایج حاصل فراهم گردد. بنابراین پیشنهاد میگردد که معادلات حاصل از این تحقیق بر روی این داده‌های واقعی نیز اعمال گردند.

علاوه بر مورد فوق، پیشنهاد میشود قبل از مرحله تعیین مقادیر ورودی به مدل‌های انتقال تابش، آنالیز حساسیت صورت پذیرد تا مقادیر ورودی از منطق مستحکم تری برخوردار گردد.

پیشنهاد دیگر در ارتباط با بررسی اثر اتمسفر در کنار تابع حساسیت طیفی میباشد. این اقدام باعث میشود نتایج تحقیق با واقعیت تصاویر اخذ شده، سازگاری بیشتری داشته باشد.

پیشنهاد پایانی، در ارتباط با انجام مقایسه‌ای میان روش‌های مستقیم و غیر مستقیم در زمینه انجام کالیبراسیون نسبی می‌باشد.

5- تقدیر و تشکر:

در این تحقیق از ابزار ARTMO استفاده شده است. این ابزار تحت نرم افزار متلب بوده و با بهره‌مندی از محیط گرافیکی، زمینه مناسبی جهت برخی از پردازش‌ها از جمله شبیه‌سازی مقادیر طیفی، در اختیار این تحقیق قرار داد. در همین راستا از آقای Dr. Ir. Jochem Verrelst قدردانی به عمل 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] J. Verrelst, G. Camps-Valls, J. Muñoz-Marí, J. P. Rivera, F. Veroustraete, J. G. P. W. Clevers, and J. Moreno, "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.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] "ESA NASA collaboration fosters comparable land imagery."
- [6] M. Vargas, T. Miura, N. Shabanov, and A. Kato, "An initial assessment of Suomi NPP VIIRS vegetation index EDR: SUOMI NPP VIIRS VEGETATION INDEX EDR," *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 118, no. 22, pp. 12,301–12,316, Nov. 2013.
- [7] T. Miura, J. P. Turner, and A. R. Huete, "Spectral Compatibility of the NDVI Across VIIRS, MODIS, and AVHRR: An Analysis of Atmospheric Effects Using EO-1 Hyperion," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 3, pp. 1349–1359, Mar. 2013.
- [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] 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.
- [11] E. M. Middleton and E. A. Walter-Shea, "Optical properties of canopy elements in the boreal forest," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. "Quantitative Remote Sensing for Science and Applications", International, 1995*, vol. 1, pp. 789–793 vol.1.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] S. Jacquemoud, W. Verhoef, F. Baret, C. Bacour, P. J. Zarco-Tejada, G. P. Asner, C. François, and S. L. Ustin, "PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, pp. S56–S66, Sep. 2009.
- [17] 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.
- [18] W. Verhoef, "Earth observation modeling based on layer scattering matrices," *Remote Sens. Environ.*, vol. 17, no. 2, pp. 165–178, Apr. 1985.
- [19] 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.
- [20] H. Croft, J. M. Chen, Y. Zhang, A. Simic, T. L. Noland, N. Nesbitt, and J. Arabian, "Evaluating leaf chlorophyll content prediction from multispectral remote sensing data within a physically-based modelling framework," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 102, pp. 85–95, Apr. 2015.
- [21] X. Gao, "Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination," *Remote Sens. Environ.*, vol. 74, no. 3, pp. 609–620, Dec. 2000.