

ارزیابی قابلیت باندهای رادار پولاریمتریک برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین

سامان نادىزاده شورابه- دانشجوی دکتری سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
سارا عطارچی* - استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
فؤاد مینایی- کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۷

چکیده

برخلاف سنجنده‌های اپتیکی که تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دود، مه، ابر، و میزان نور خورشید قرار می‌گیرند، سنجنده‌های راداری با روزه مجازی در همه ساعات شبانه‌روز و همه نوع شرایط آب و هوایی توانایی اخذ داده را دارند. بنابراین، هدف از این تحقیق ارزیابی قابلیت باندهای راداری برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین است. در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای لندست-۸ و باندهای پلاریمتریک VH و VV - سنتینل-۱ استفاده شده است. ارتباط ۱۸ شاخص طیفی استخراج شده از تصاویر اپتیکی با باندهای راداری در مناطق مختلف بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که از باندهای راداری با توجه به ماهیت منطقه مورد مطالعه خصوصیات متفاوتی می‌توان استخراج کرد؛ به طوری که در منطقه مورد مطالعه اول با کاربری زمین بایر شاخص LST، در منطقه مورد مطالعه دوم با کاربری زمین کشاورزی شاخص EVI، و در منطقه مورد مطالعه سوم با کاربری پوشش جنگلی متراکم شاخص MNDWI به ترتیب دارای همبستگی ۰٫۶۶۸، ۰٫۷۵۶، و ۰٫۸۰۳ با باندهای راداری است. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده در مواقعی که امکان استفاده از داده‌های اپتیکی وجود ندارد می‌توان از باندهای راداری به عنوان جایگزین مناسبی برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین استفاده کرد.

واژگان کلیدی: تحلیل رگرسیون، خصوصیات بیوفیزیکی، داده‌های اپتیکی، داده‌های راداری، شاخص‌های طیفی.

مقدمه

خصوصیات بیوفیزیکی پوشش گیاهی، دما، و رطوبت سطح از پارامترهای کلیدی برای کنترل و ارزیابی فرایندهای فیزیکی و شیمیایی سطح زمین محسوب می‌شوند. از خصوصیات بیوفیزیکی در کاربردهای مختلف مانند جزیره حرارتی شهری، تغییر اقلیم، و خشک‌سالی استفاده می‌شود (شوتا و کومار، ۲۰۱۵). شاخص‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی سطح زمین به طور گسترده با استفاده از انواع متفاوت داده‌های سنجش از دور با دقت‌های مختلف قابل ارزیابی‌اند (اوللا و همکاران، ۲۰۱۲؛ درویش‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹). دسترسی به اطلاعات بهنگام و آگاهی از میزان تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی نیاز اساسی مدیریت یکپارچه و توسعه پایدار است. در حال حاضر، داده‌های سنجش از دور به لحاظ ویژگی‌های منحصر به فرد خود همانند تکرارپذیری، چندطیفی بودن، و وسعت منطقه تحت پوشش اطلاعات مفیدی برای مطالعه پدیده‌های دینامیکی ارائه می‌دهند (بغدادی و زریبی، ۲۰۱۶). فناوری سنجش از دور همچنین اطلاعات ارزشمندی جهت درک و پایش الگوها و تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین فراهم می‌کند. از این داده‌ها می‌توان برای تعیین نوع و میزان تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح استفاده کرد (چن، ۲۰۱۶). با استفاده از داده‌های چندزمانه سنجش از دور با کمترین زمان و هزینه و با بالاترین سرعت می‌توان تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی و کاربری‌های

اراضی مناطق در مقیاس‌های مختلف را بررسی کرد (مقدم و همکاران، ۲۰۱۸). به منظور اندازه‌گیری و پایش خصوصیات بیوفیزیکی سطح با استفاده از قابلیت‌های سنجش از دور انعکاسی و حرارتی، مطالعات و بررسی‌های فراوانی انجام گرفته است (یو و همکاران، ۲۰۱۷؛ گارسیا-لاماس و همکاران، ۲۰۱۹).

هر یک از انواع سنجنده‌ها در بخش محدودی از طیف الکترومغناطیس فعالیت می‌کنند و در نتیجه اهداف زمینی پاسخ‌های متفاوتی در برابر آن‌ها از خود نشان می‌دهند. در واقع، می‌توان گفت که هر یک از سنجنده‌ها مزایا و معایب مختص به خود را دارند. استفاده هم‌زمان از چند سنجنده^۱ سبب می‌شود تا از خاصیت مکمل بودن داده‌های ماهواره‌ای استفاده شود. سنجنده‌هایی که در محدوده نوری^۲ عمل می‌کنند پُرکاربردترین سنجنده‌ها در مطالعات منابع زمینی‌اند؛ آرشپو طولانی، امکان دسترسی بهتر، و پردازش آسان دارند. باین‌حال، این سنجنده‌ها به دلیل کوتاه بودن طول موج دو محدودیت عمده دارند. امواج محدوده نوری طیف الکترومغناطیس قادر به نفوذ در پوشش گیاهی نیستند و در نتیجه سنجنده‌های نوری فقط امکان اخذ اطلاعات از سطح بالایی تاج پوشش را دارا هستند (پلوئو و همکاران، ۲۰۰۳). محدودیت دیگر آن وابستگی شدید عملکرد این سنجنده‌ها به شرایط آب و هوایی است. ابرها و فقدان نور خورشید از شرایط محدودکننده فعالیت این سنجنده‌هاست (جوشی و همکاران، ۲۰۱۶). در نتیجه، دسترسی به تصاویر فاقد پوشش ابر یکی از مشکلات استفاده از تصاویر نوری است. در مقابل سنجنده^۳ SAR یک نوع سنجنده تصویربرداری است که، به علت فعال بودن، مستقل از نور خورشید و پوشش ابر فعالیت می‌کند. سیستم SAR در طول موج‌های ۳ تا ۷۵ سانتی‌متر فعالیت می‌کند و عموماً قدرت تفکیک مکانی در حدود ۵ تا ۵۰ متر را دارد. سیستم SAR، به دلیل داشتن طول موج بلندتر نسبت به سنجنده‌های نوری، قدرت نفوذ بیشتری در داخل پدیده‌هایی نظیر پوشش گیاهی و خاک خشک را دارد و می‌تواند اطلاعات منحصر به فرد را از پدیده‌ها دریافت کند (سینحا و همکاران، ۲۰۱۵). یکی دیگر از مزیت‌های سیستم SAR، قابلیت تصویربرداری در شب و شرایط نامساعد جوی است و در نتیجه امکان استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در هر شرایط آب و هوایی برای کاربران را فراهم می‌کند (استولز و همکاران، ۲۰۱۸). در رابطه با قابلیت داده‌های راداری برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین مطالعاتی انجام شده است؛ در ادامه به مواردی از این مطالعات اشاره می‌شود:

رضانی و صاحبی (۱۳۹۴) در پژوهشی از داده‌های SAR و اپتیکی برای برآورد زیست‌توده جنگلی استفاده کردند. در این مطالعه از تصویر اپتیک AVNIR-2 و تصویر راداری PALSAR ماهواره ALOS استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که ترکیب داده‌های اپتیکی و راداری می‌تواند میزان زیست‌توده جنگل‌های انبوه و بلند را با دقت بالای ۷۰ درصد به دست آورد.

ملکی و همکاران (۱۳۹۷) از داده‌های اپتیک و رادار برای استخراج عوارض و پدیده‌های زمینی استفاده کردند. از تصویر پانزده‌متری باند پن کروماتیک لندست ۸ به عنوان تصویر اپتیک و تصویر باند C سنجنده سنتینل ۱- برای تصویر رادار با قدرت تفکیک ۲۲×۲۰ متری هر پیکسل استفاده شد. بالاترین صحت استخراج عوارضی چون مخروط‌افکنه و شیب و اریزه‌های نیز از تصویر راداری اصلاح شده به ترتیب ۸۲/۷۶ و ۸۳/۷۲ درصد است.

کیم و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی از شاخص پوشش گیاهی راداری (RVI)^۴ برای برآورد محتوای آب پوشش گیاهی در برنج و سویا استفاده کردند. نتایج نشان داد ارتباطی بسیار قوی (R=۹۸) بین باندهای راداری و محتوای آب

1. Multi-sensor approach
2. Optic
3. Synthetic Aperture Radar
4. Radar Vegetation Index

پوشش گیاهی وجود دارد. بر طبق یافته‌های این تحقیق، با استفاده از شاخص RVI می‌توان با دقت ۰/۲۱ کیلوگرم بر متر مربع محتوای آب پوشش گیاهی را برآورد کرد.

کومار و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از شاخص پوشش گیاهی راداری برای نظارت بر رشد مزارع سویا و پنبه به‌عنوان جای‌گزینی برای شاخص NDVI در شهر ناگپور هند پرداختند. در این مطالعه شاخص پوشش گیاهی RVI از تصاویر ماهواره رادارست ۲- و شاخص NDVI از تصاویر ماهواره مودیس استخراج شد. آن‌ها نتیجه گرفتند به‌دلیل اشباع‌شدن شاخص NDVI در پوشش گیاهی متراکم، شاخص RVI شاخص کارایی برای نظارت بر پوشش گیاهی است.

کیم و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی به مقایسه شاخص‌های پوشش گیاهی چندطیفی و رادار پرداختند. در این تحقیق، از داده‌های لندست ۸ و رادارست ۲- استفاده شد. نتایج نشان داد مقادیر شاخص‌های RVI، NDVI، و SAVI برای هر چهار نوع کاربری (شهر، جنگل، آب و مزارع برنج) الگوی مشابه داشتند. بنابراین، در شب و زمان ابرناکی آسمان داده‌های راداری می‌توانند جای‌گزینی برای داده‌های اپتیک در کاربردهای مختلف باشند.

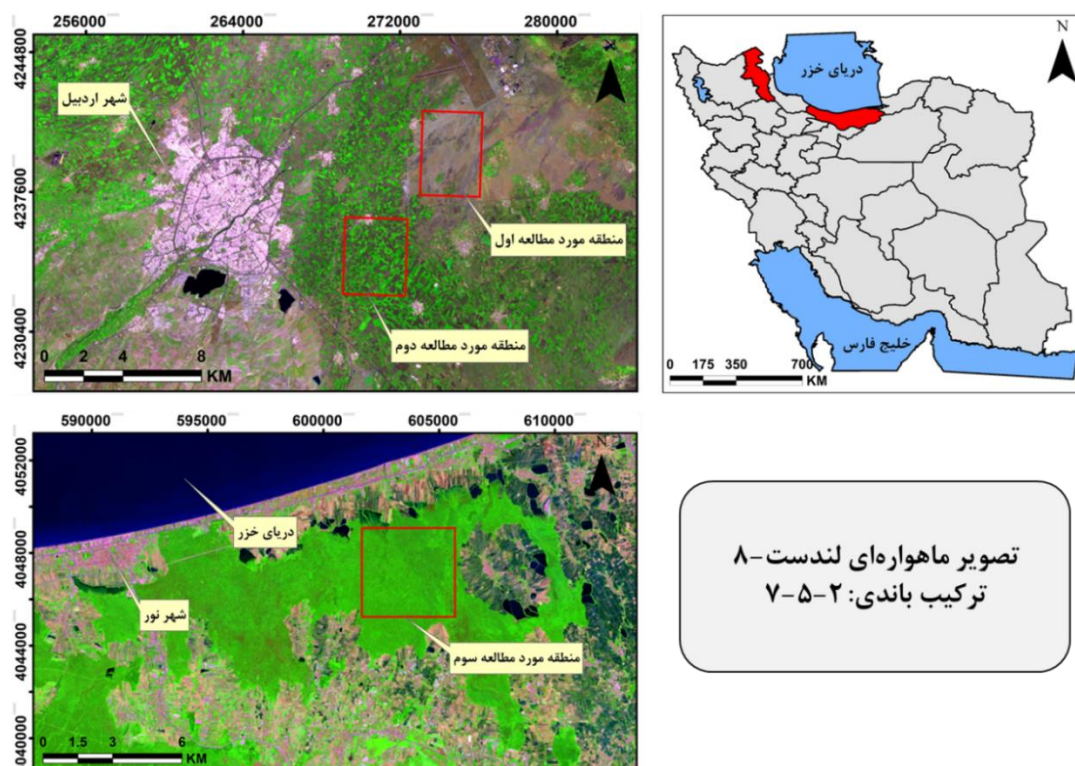
دی‌آلبان و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی از ترکیب داده‌های رادار و نوری برای بهبود طبقه‌بندی و تغییرات کاربری اراضی در جنوب میانمار استفاده کردند. در این پژوهش داده‌های لندست و ALOS-2/PALSAR-2 بررسی شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که ترکیب داده‌های رادار با داده‌های نوری-نسبت به زمانی که جداگانه مورد استفاده قرار می‌گیرند- دقت طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد.

به‌رغم ارتباط قوی بین خصوصیات بیوفیزیکی پدیده‌ها و شاخص‌های طیفی مستخرج از تصاویر اپتیک (گونن و همکاران، ۲۰۱۹؛ کیم و همکاران، ۲۰۱۴؛ لینگ و همکاران، ۲۰۰۹)، امکان استفاده از این شاخص‌ها با محدودیت مواجه است. سنجنده‌های اپتیک امکان اخذ تصویر در شرایط نامناسب نظیر وجود دود، مه، و ابر را ندارند. همچنین، طول موج‌های اپتیک قابلیت نفوذ به ساختار پدیده‌های طبیعی را ندارند. در مقابل، سنجنده‌های راداری با روزنه مجازی (SAR) در همه نوع شرایط آب و هوایی و در طی شبانه‌روز توانایی اخذ داده را دارند. به همین منظور، در این تحقیق، ارتباط شاخص‌های طیفی با میزان بازپخش پدیده‌ها در باندهای راداری بررسی شده است. هدف اصلی از این تحقیق، ارزیابی میزان کارایی باندهای راداری برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

به‌منظور بررسی جامع، در این پژوهش سه منطقه متفاوت با انواع متفاوت پوشش زمین به‌عنوان مناطق مورد مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. منطقه مورد مطالعه اول، که در شرق شهر اردبیل قرار گرفته است، دارای زمین بایر است. منطقه مورد مطالعه دوم در جنوب شرقی شهر اردبیل قرار گرفته که دارای کاربری کشاورزی است. منطقه مورد مطالعه سوم در استان مازندران، شهر نور، است. این منطقه دارای پوشش جنگلی کاملاً متراکم با رطوبت بالا است. مرز محدوده‌های مورد مطالعه با توجه به کاربری‌های اطراف آن انتخاب شده است. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

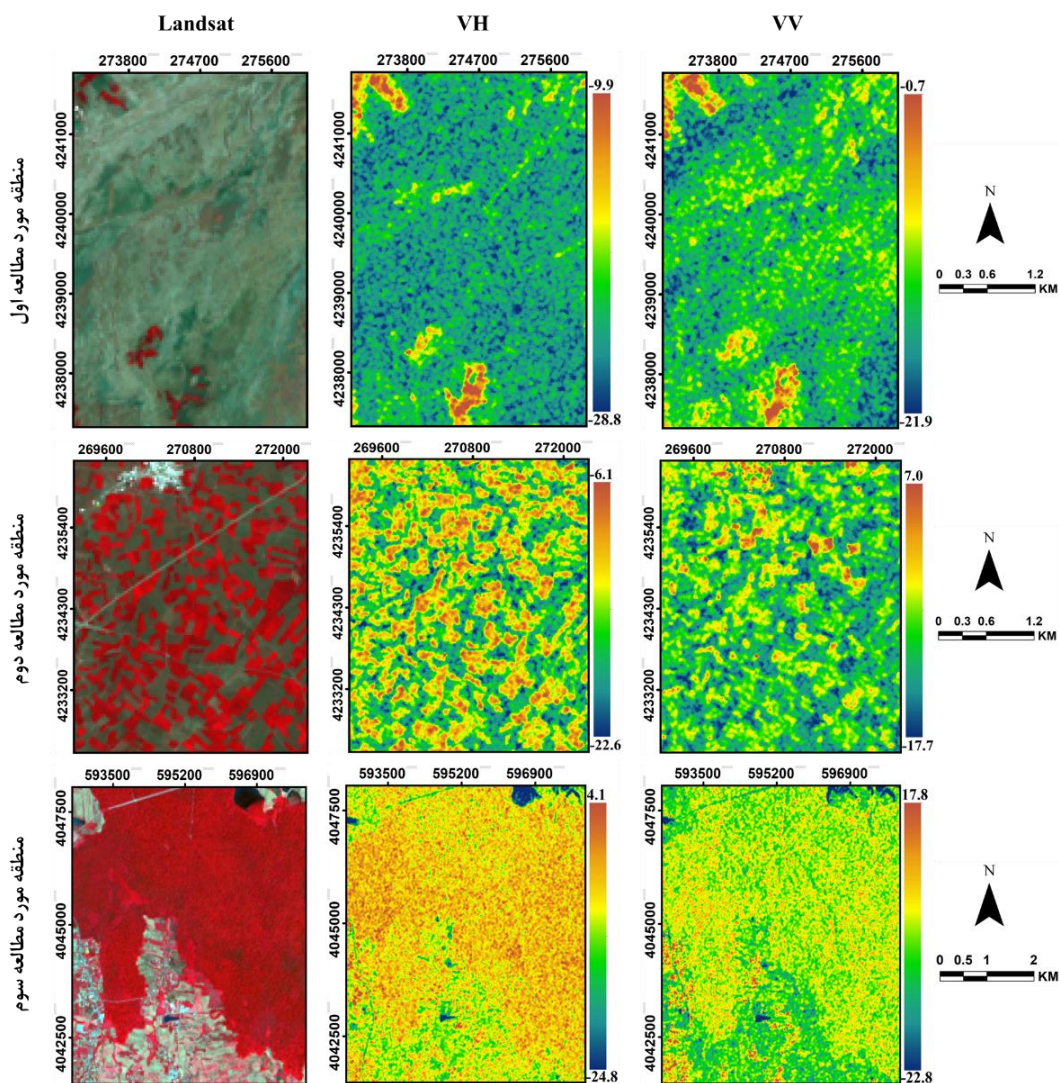


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

داده‌ها

در مطالعه حاضر از تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و سنتینل-۱ برای محدوده‌های مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۲). تصاویر لندست-۸ زمین مرجع شده و در سیستم تصویر UTM در ناحیه ۳۹N قرار دارند. این تصاویر دارای هفت باند (باند ۱ تا ۷) در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، یک باند (باند ۸) پن کروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر، یک باند (باند ۹) سیروس با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و دو باند (باند ۱۰ و ۱۱) مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر است. تصاویر یادشده در سایت^۱ USGS به صورت رایگان در دسترس‌اند. ماهواره سنتینل ۱ در باند C راداری به تصویربرداری از سطح زمین می‌پردازد و در چهار حالت مختلف (Strip, Map (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Wave Mode (WM)) تصویربرداری با قدرت تفکیکی در حد ۵ متر و پوششی در عرض ۴۰۰ کیلومتری را فراهم می‌آورد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع IW است که پیکسل‌سازی با طول و عرض ۵ تا ۲۰ متر دارند. محصول مورد استفاده^۲ GRD است که داده‌های سطح یک نام‌گذاری شده‌اند و حاوی اطلاعات شدت^۳ با پیکسل‌های مربعی ۱۰ × ۱۰ متر هستند و تا حدودی اثر اسپکل در آن‌ها کاهش یافته است. سیستم مختصات برای این داده‌ها WGS84 ellipsoid است. محصول GRD قطبش‌های VV و VH را در اختیار ما قرار می‌دهد. تصاویر سنتینل از سایت^۴ COAH، که زیر نظر سازمان فضایی اروپا کار می‌کند، تهیه شده است. جدول ۱ مشخصات داده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

1. United States Geological Survey
2. Ground Range Detected
3. Intensity
4. Copernicus Open Access Hub



شکل ۲. تصاویر مورد استفاده در این مطالعه (ترکیب باندی لندست ۳-۴-۵ و واحد تصاویر راداری دسی بل^۱ است)

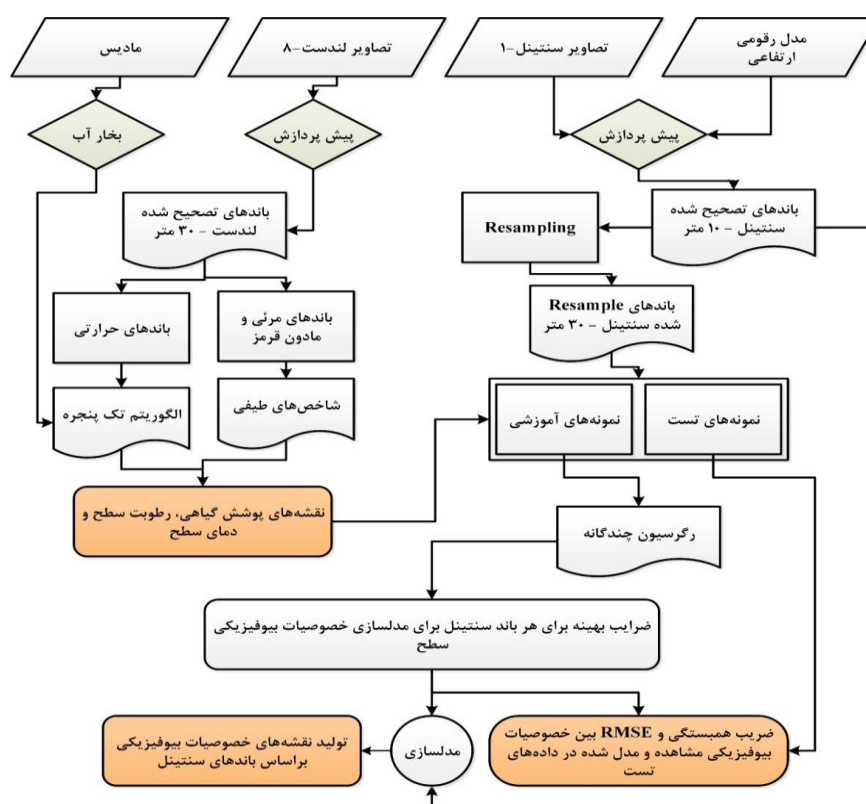
جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه	ماهواره	تاریخ اخذ تصویر	باندهای مورد استفاده	قدرت تفکیک	قدرت تفکیک نهایی*
منطقه مورد مطالعه اول و دوم	لندست-۸	۲۰۱۹/۰۶/۰۲	باندهای ۱ تا ۷ و باند ۱۰	۳۰ متر	۳۰ متر
منطقه مورد مطالعه سوم	سنتیل-۱	۲۰۱۹/۰۶/۲۴	VH, VV	۱۰ متر	۳۰ متر
هر سه منطقه	لندست-۸	۲۰۱۹/۰۸/۱۶	باندهای ۱ تا ۷ و باند ۱۰	۳۰ متر	۳۰ متر
هر سه منطقه	سنتیل-۱	۲۰۱۹/۰۸/۱۹	VH, VV	۱۰ متر	۳۰ متر
هر سه منطقه	SRTM	---	---	۳۰ متر	---
هر سه منطقه	MODIS	۲۰۱۹	MOD07	۵۰۰۰ متر	---

* قدرت تفکیک بعد از Resampling است.

روش تحقیق

در این پژوهش نخست مراحل پیش‌پردازش برای آماده‌کردن تصاویر شامل تصحیح اتمسفری (تصاویر لندست) و هندسی (تصاویر سنتینل) روی تصاویر اعمال شد. برای اجرای تصحیح اتمسفری از روش FLAASH استفاده شده است. در مرحله بعد برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح، شاخص‌های طیفی بر روی باندهای مرئی و مادون قرمز لندست اعمال شدند. برای محاسبه دمای سطح از الگوریتم تک‌پنجره استفاده شد. با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه، ضرایب بهینه برای هر باند سنتینل برای مدل‌سازی خصوصیات بیوفیزیکی سطح استخراج شد. در نهایت، با استفاده از ضرایب به‌دست‌آمده و باندهای سنتینل نقشه خصوصیات بیوفیزیکی سطح تهیه شد. شکل ۳ نمودار گردش کار را نشان می‌دهد. جزئیات کارهای انجام‌گرفته در ادامه توضیح داده شده است.



شکل ۳. فلوجارت روش پژوهش

پیش‌پردازش تصاویر راداری

تصحیحات تصاویر راداری شامل چهار نوع است: تصحیح مداری^۱، کالیبراسیون، سطح زمین، و اسپکل^۲. تصحیح مداری تصاویر راداری باعث می‌شود که در فرایند محاسبه اینترفرومتری^۳، زمین مکانی^۴، و نقشه ارتفاعی دیجیتالی مؤثر باشد (فیلیپونی، ۲۰۱۹). از کالیبراسیون برای تبدیل میزان شدت به ضریب بازپخش سیگما ناف^۵ استفاده می‌شود. به دلیل نحوه

1. Apply orbit file
2. Speckle
3. Interferometry
4. Geolocation
5. Sigma naught

برداشت تصاویر SAR، در ارتفاعات خیلی بلند و زمین‌های شیب‌دار، انحرافات شدید زمینی^۱ وجود دارد. پیش از اینکه تصاویر SAR به‌منظور تولید نقشه‌های دقیق سطحی و نمایش تغییرات استفاده شوند، این انحرافات باید توسط فرایندی به نام تصحیحات زمینی تصحیح شوند (هو و همکاران، ۲۰۱۸). اثر اسپکل همیشه در تصاویر راداری فعال و SAR وجود دارد و کیفیت این تصاویر را کاهش می‌دهد (لی و همکاران، ۱۹۹۹). بنابراین، ضروری است به‌منظور افزایش کیفیت تصویر، اثر اسپکل در تصاویر راداری کاهش یابد.

پیش‌پردازش تصاویر لندست

تصحیح اتمسفری

برای اجرای تصحیح اتمسفری از الگوریتم FLAASH استفاده شده است. در الگوریتم FLAASH نخست مقدار رادیانس برای هر پیکسل محاسبه می‌شود. بنابراین، برای تبدیل مقدار رقومی هر پیکسل به تابش طیفی در سنجنده (رادیانس) از رابطه ۱ استفاده می‌شود (بووری و همکاران، ۲۰۱۵):

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

در این رابطه، L_{λ} رادیانس طیفی در سنجنده $[W/(m^2 sr \mu m)]$ ، M_L فاکتور تبدیل ضربی که مقدار آن از سرآیند^۲ فایل تصاویر به‌دست می‌آید، ارزش پیکسل (DN) ۱۰، A_L ضریب تبدیل تجمیع‌کننده که مقدار آن از سرآیند فایل تصاویر به‌دست می‌آید.

محاسبه دمای سطح

از الگوریتم تک‌کاناله برای محاسبه دمای سطح در مطالعات متعددی استفاده شده است (سوبرینو و همکاران، ۲۰۰۴). رابطه کلی ارائه‌شده برای محاسبه دمای سطح در این الگوریتم به‌صورت رابطه ۲ است.

$$LST = \gamma \left[\frac{1}{LSE} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (2)$$

در رابطه ۲، LST دمای سطح، L_{sen} میزان انرژی ثبت‌شده در سنجنده برای باند حرارتی، LSE میزان توان تشعشی مربوط به طول موج باند حرارتی مورد استفاده، γ و δ دو پارامتر وابسته به تابع پلانک‌اند که به‌ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شود.

$$\gamma = \frac{T_{sen}^2}{b_{\lambda} L_{sen}} \quad (3)$$

$$\delta = -\gamma \times L_{sen} + T_{sen} \quad (4)$$

در رابطه فوق، T_{sen} دمای درخشندگی ثبت‌شده در سنجنده، L_{sen} میزان انرژی ثبت‌شده در سنجنده برای باند حرارتی، و b_{λ} ضریب ثابتی است که برای باند ۱۰ لندست ۸ برابر با ۱۳۲۴ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ψ_1, ψ_2, ψ_3 توابع ثابت اتمسفری‌اند که از طریق رابطه‌های ۵، ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند.

$$\Psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (۵)$$

$$\Psi_2 = -Ld \frac{Lu}{\tau} \quad (۶)$$

$$\Psi_3 = Ld \quad (۷)$$

در رابطه‌های ۵ تا ۷، τ قابلیت انتقال اتمسفر، Ld تابش رو به پایین اتمسفر، و Lu تابش رو به بالای اتمسفر است.

استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح

در سه دهه گذشته از شاخص‌های طیفی برای تخمین خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین بسیار استفاده شده است (جکسون و همکاران، ۲۰۰۴؛ لی و همکاران، ۲۰۱۴؛ احمدیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ جارچو و همکاران، ۲۰۱۷). سنجنده‌های ماهواره‌ای که دارای باندهای طیفی عریض‌اند از میانگین اطلاعات طیفی در سرتاسر باند برای تخمین ویژگی‌های سطح زمین استفاده می‌کنند. در این پژوهش، ۱۸ شاخص طیفی پُرکاربرد برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی محاسبه شده است. شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این پژوهش از محدوده‌های مختلف طیفی انتخاب شده‌اند تا ویژگی‌های متفاوت پدیده‌های زمین را شامل شوند. گروهی از این شاخص‌ها فقط مرتبط با کلروفیل گیاه‌اند؛ گروهی دیگر در ارتباط با کلروفیل و سایر رنگ‌دانه‌ها. همچنین، یک شاخص دیگر اثرهای پس‌زمینه خاک را در نظر می‌گیرد و برخی از شاخص‌ها مربوط به گروه‌های جذب آب‌اند. شاخص‌های طیفی مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. شاخص‌های مورد استفاده برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح

شاخص	معادله	منبع
DVI	$NIR - RED$	تاگر، ۱۹۷۹
EVI	$2.5 * \frac{NIR - RED}{(NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1)}$	جیانگ و همکاران، ۲۰۰۸
GDVI	$NIR - GREEN$	راوس و همکاران، ۱۹۷۴
GNDVI	$(NIR - GREEN)/(NIR + GREEN)$	لیمبورن و همکاران، ۲۰۰۰
GRVI	$(GREEN - RED)/(GREEN + RED)$	تاگر، ۱۹۷۹
GVI	$NIR - GREEN$	تاگر، ۱۹۷۹
IPVI	$(NIR)/(NIR + RED)$	کرپین، ۱۹۹۰
LAI	$(3.618 * EVI - 0.118) > 0$	بوگ و همکاران، ۲۰۰۲
MNDWI	$(GREEN - SWIR)/(GREEN + SWIR)$	زو، ۲۰۰۶
MTVI1	$1.2[1.2(NIR - GREEN) - 2.5(RED - GREEN)]$	هابودان و همکاران، ۲۰۰۴
MTVI2	$1.5[1.2(NIR - GREEN) - 2.5(RED - GREEN)](2NIR + 1) - (6NIR - 5RED) - 0.5$	هابودان و همکاران، ۲۰۰۴
NDBI	$(MIR - NIR)/(MIR + NIR)$	کاپلان و همکاران، ۲۰۱۸
NDVI	$(NIR - RED)/(NIR + RED)$	تاگر، ۱۹۷۹
SAVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} * (1 + L)$	هیت، ۱۹۸۸
SGI	میانگین رفلکتانس ۵۰۰ نانومتر تا ۶۰۰ نانومتر	آگاپیو و همکاران، ۲۰۱۲
SIPI	$(NIR - BLUE)/(NIR - RED)$	آگاپیو و همکاران، ۲۰۱۲
SR	NIR/RED	اردن، ۱۹۶۹
TDVI	$\sqrt{0.5 + \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}}$	باناری و همکاران، ۲۰۰۲

DVI: Difference Vegetation Index; **EVI:** Enhanced Vegetation Index; **GDVI:** Green Difference Vegetation Index; **GNDVI:** Green Normalized Difference Vegetation Index; **GRVI:** Green Ratio Vegetation Index; **GVI:** Green Vegetation Index; **IPVI:** Infrared Percentage Vegetation Index; **LAI:** Leaf Area Index **MNDWI:** Modified Normalized Difference Water Index; **MTVI1:** Modified Triangular Vegetation Index1; **MTVI2:** Modified Triangular Vegetation Index2; **NDBI:** Normalize Difference Built-up Index; **NDVI:** Normalized Difference Vegetation Index; **SAVI:** Soil Adjusted Vegetation Index; **SGI:** Sum Green Index; **SIPI:** Structure Insensitive Pigment Index; **SR:** Simple Ratio; **TDVI:** Transformed Difference Vegetation Index.

تحلیل رگرسیون

در این مطالعه ارتباط بین خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین و باندهای راداری بررسی شده است. برای در نظر گرفتن خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین از شاخص‌های طیفی جدول ۲ استفاده شده است. در این پژوهش برای یافتن ارتباط بین شاخص‌های طیفی استخراج شده از تصاویر لندست و باندهای راداری، از رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. برای اعتبارسنجی مدل‌ها، روش اعتبار متقاطع^۱ به کار برده شد. در روش یادشده هر یک از نمونه‌ها با استفاده از نمونه‌های دیگر تخمین زده می‌شود و خطای آن محاسبه می‌گردد. از مزایای این روش، توانایی آن در تشخیص داده‌های پرت^۲ و برآورد نارایب است (درویش‌زاده و همکاران، ۲۰۰۸). از همه شاخص‌های طیفی ذکر شده برای تحلیل رگرسیون استفاده شده است. توان تشریحی متغیرهای مستقل در مدل و دقت پیش‌بینی احتمالی مدل‌های تولیدشده با پارامترهای آماری ارزیابی شد. این پارامترها شامل خطای میانگین ریشه^۳ مربعات^۳ و ضریب همبستگی (R2) مدل‌های تولیدشده است. نخست ضریب همبستگی مدل‌های تولیدشده محاسبه شد. سپس، مدل‌ها از طریق آزمایش عملکرد مدل‌های تولیدشده در مقایسه با داده‌های تست (مقدار مشاهده شده) اعتبارسنجی شد. برای به دست آوردن مقدار خطای پیش‌بینی عملکرد مدل شده نسبت به عملکرد مشاهده شده، از RMSE به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری دقت رگرسیون استفاده شد. RMSE با استفاده از رابطه^۸ محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i^E - Y_i)^2 / N} \quad (8)$$

که در این معادله Y_i عملکرد مشاهده شده، Y_i^E مقدار عملکرد تخمین و مدل شده، و N تعداد نمونه‌هاست (داک ورت، ۱۹۹۸).

نتایج و بحث

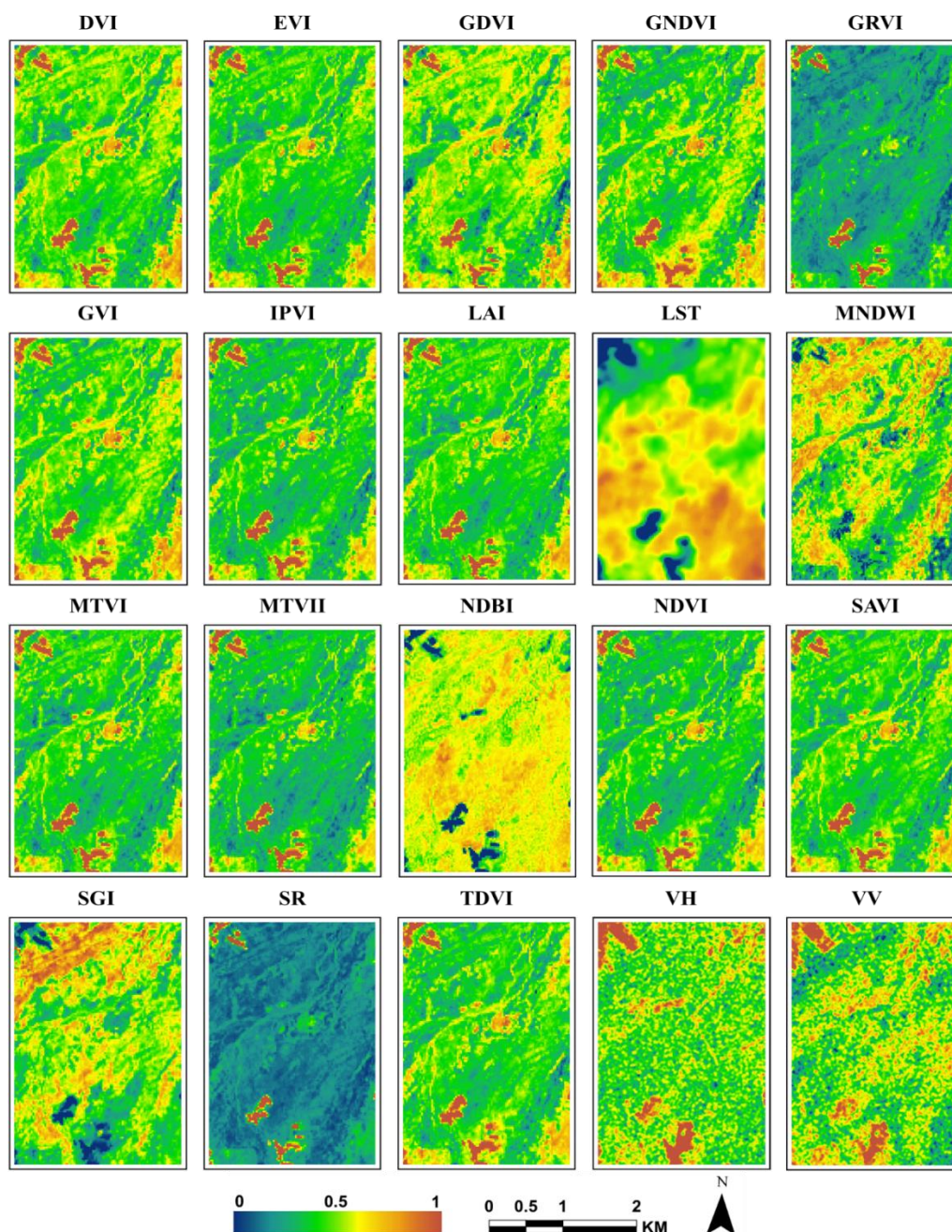
منطقه مورد مطالعه اول

در این پژوهش ۱۸ شاخص طیفی از تصویر لندست استخراج شد. نقشه این شاخص‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. ذکر این نکته لازم است که برخی از این شاخص‌ها نرمال شده‌اند و برخی دیگر نرمال شده نیستند. بنابراین، برای یکسان‌سازی و مقایسه پذیر بودن شاخص‌ها مقادیر همه شاخص بین صفر و یک نرمال شدند.

از طریق تحلیل رگرسیون ساده و محاسبه ضریب همبستگی بین شاخص‌های استخراج شده از لندست به عنوان متغیر وابسته و هر یک از باندهای راداری به عنوان متغیر مستقل، روابط ریاضی خطی حاصل شد که در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به معادلات رگرسیونی برای منطقه مورد مطالعه اول، بین باندهای راداری با شاخص‌های LST، NDBI و IPVI رابطه معنادارتری وجود دارد؛ در حالی که بین باندهای راداری با شاخص‌های GDVI، MNDWI، و SR رابطه ضعیفی برقرار است. اعتبارسنجی این مدل‌ها با استفاده از پارامتر آماری RMSE انجام شد که نتایج آن برای هر معادله در جدول ۳ ارائه شده است. به طور کلی، می‌توان گفت با استفاده از یک متغیر برای پیش‌بینی و تخمین شاخص‌ها نتایج قابل قبولی حاصل می‌شود. با توجه به امکان استخراج رطوبت خاک با استفاده از داده‌های رادار (رحمان

1. Cross Validation
2. Outlier
3. Root Mean Square Error

و همکاران، ۲۰۰۸؛ کیم و وان‌زیل، ۲۰۰۹) و همچنین تأثیر رطوبت خاک بر دمای خاک (برتولت و همکاران، ۲۰۱۸)، تغییرات مقادیر بازپخش باندهای راداری و LST با همدیگر رابطه معناداری دارند که به افزایش همبستگی بین این داده‌ها منجر شده است. با توجه به شکل ۴، مقادیر بالای شاخص‌های پوشش گیاهی (برای مثال NDVI، EVI، و DVI) نشان‌دهنده درصد پوشش گیاهی بالا در منطقه مورد مطالعه است. همچنین، با افزایش مقدار رطوبت سطح منطقه مورد مطالعه مقدار شاخص‌های مرتبط با رطوبت از جمله MNDWI افزایش می‌یابد. در مناطق ساخته‌شده شاخص NDBI دارای بیشترین مقدار است.



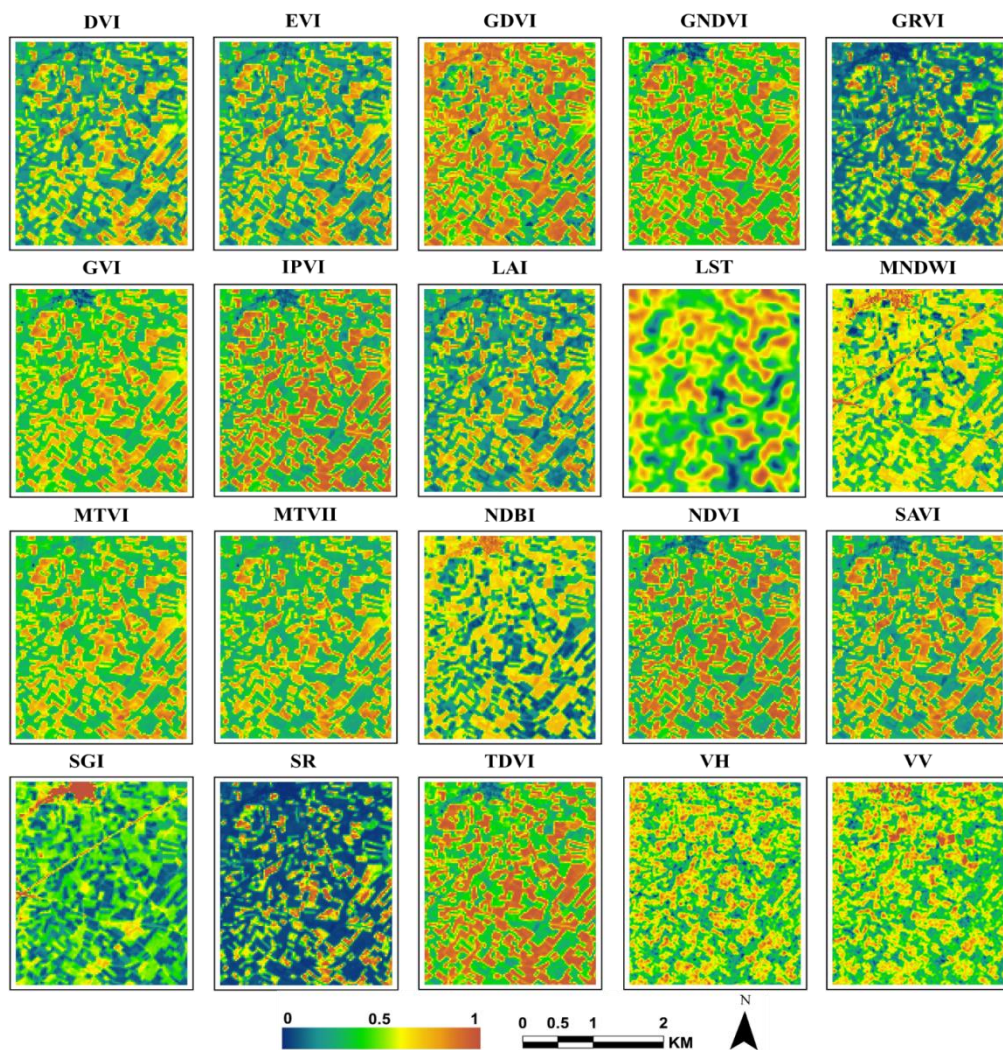
شکل ۴. نقشه شاخص‌های مورد استفاده برای منطقه مورد مطالعه اول با کاربری بایر

جدول ۳. مدل‌های رگرسیون تک‌متغیره برای بررسی قابلیت باندهای راداری در منطقه مورد مطالعه اول با کاربری بایر

متغیر وابسته	رابطه	R ²	RMSE
DVI	$Y = 0.180 + 0.185 * VH - 0.288 * VV + 0.584 * (VV*VH)$	0.527	0.22
EVI	$Y = 0.143 + 0.210 * VH - 0.272 * VV + 0.613 * (VV*VH)$	0.555	0.19
GDVI	$Y = 0.232 + 0.140 * VH - 0.265 * VV + 0.453 * (VV*VH)$	0.469	0.27
GNDVI	$Y = 0.197 + 0.195 * VH - 0.296 * VV + 0.791 * (VV*VH)$	0.552	0.19
GRVI	$Y = 0.018 + 0.170 * VH - 0.072 * VV + 0.223 * (VV*VH)$	0.544	0.20
GVI	$Y = 0.183 + 0.209 * VH - 0.259 * VV + 0.634 * (VV*VH)$	0.551	0.19
IPVI	$Y = 0.132 + 0.234 * VH - 0.286 * VV + 0.750 * (VV*VH)$	0.588	0.15
LAI	$Y = 0.143 + 0.210 * VH - 0.272 * VV + 0.613 * (VV*VH)$	0.555	0.19
LST	$Y = 0.885 + 0.316 * VH - 0.005 * VV + 0.822 * (VV*VH)$	0.668	0.12
MNDWI	$Y = 0.495 + 0.164 * VH - 0.592 * VV - 1.212 * (VV*VH)$	0.441	0.28
MTVII	$Y = 0.140 + 0.220 * VH - 0.307 * VV + 0.685 * (VV*VH)$	0.569	0.18
MTVI2	$Y = 0.085 + 0.223 * VH - 0.222 * VV + 0.531 * (VV*VH)$	0.574	0.17
NDBI	$Y = 0.975 - 0.448 * VH - 0.120 * VV + 0.011 * (VV*VH)$	0.618	0.14
NDVI	$Y = 0.132 + 0.234 * VH - 0.286 * VV + 0.750 * (VV*VH)$	0.588	0.15
SAVI	$Y = 0.159 + 0.218 * VH - 0.290 * VV + 0.670 * (VV*VH)$	0.557	0.19
SGI	$Y = 0.459 + 0.148 * VH - 0.118 * VV + 0.574 * (VV*VH)$	0.540	0.20
SR	$Y = -0.007 + 0.131 * VH - 0.030 * VV + 0.102 * (VV*VH)$	0.526	0.22
TDVI	$Y = 0.174 + 0.255 * VH - 0.332 * VV + 0.848 * (VV*VH)$	0.585	0.16

منطقه مورد مطالعه دوم

شکل ۵ نقشه شاخص‌های استخراج‌شده برای منطقه مورد مطالعه دوم را نشان می‌دهد. همه شاخص‌های مورد استفاده بین صفر و یک نرمال شده‌اند. بررسی رابطه بین شاخص‌های طیفی و باندهای راداری نشان می‌دهد که در این منطقه باندهای راداری قابلیت بسیار زیادی برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی دارند. از مجموع ۱۸ شاخص استفاده‌شده در این تحقیق، همبستگی بسیار زیادی بین باندهای راداری و سه شاخص EVI، MTVII، و MTVI2 وجود دارد. به عبارتی، امکان جای‌گزینی این شاخص‌ها با باندهای راداری وجود دارد. از ویژگی‌های بارز شاخص EVI دامنه تغییرات وسیع و سطح اشباع خیلی بالای آن است (روچا و شیور، ۲۰۰۹). با در نظر گرفتن سطح اشباع بالای باندهای اپتیکی نسبت به تغییرات پدیده‌های سطح زمین، همبستگی بسیار زیادی میان این شاخص و باندهای راداری گزارش شده است. همچنین، در بین شاخص‌های طیفی مورد مطالعه کمترین ارتباط باندهای راداری با شاخص‌های LST، SGI، و SR است. در جدول ۴ ضریب همبستگی بین شاخص‌های استخراج‌شده از لندست به‌عنوان متغیر وابسته و هر یک از باندهای راداری به‌عنوان متغیر مستقل نشان داده شده است. در باندهای راداری و باندهای اپتیکی مقادیر بالا و پایین به‌ترتیب نشان‌دهنده پوشش گیاهی و زمین بایر یا شخم‌زده‌اند.



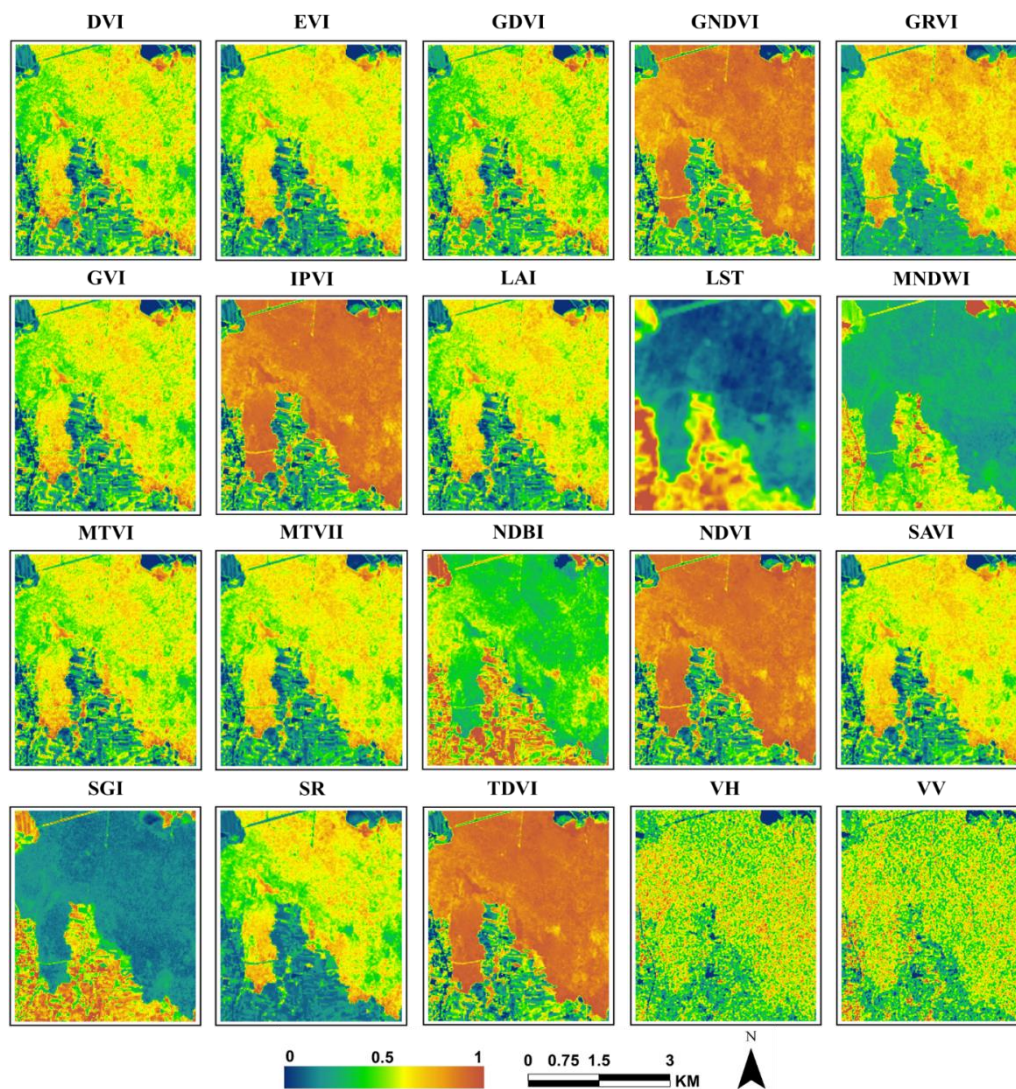
شکل ۵. نقشه شاخص‌های مورد استفاده برای منطقه مورد مطالعه دوم با کاربری کشاورزی

جدول ۴. مدل‌های رگرسیون تک‌متغیره برای بررسی قابلیت باندهای راداری در منطقه مورد مطالعه دوم با کاربری کشاورزی

متغیر وابسته	رابطه	R ²	RMSE
DVI	$Y = 1.235 - 1.695 * VH - 2.107 * VV + 3.169 * (VV * VH)$	0.752	0.05
EVI	$Y = 1.327 - 1.839 * VH - 2.280 * VV + 3.432 * (VV * VH)$	0.756	0.05
GDVI	$Y = 1.207 - 1.742 * VH - 2.140 * VV + 3.229 * (VV * VH)$	0.748	0.05
GNDVI	$Y = 1.332 - 1.370 * VH - 1.859 * VV + 2.411 * (VV * VH)$	0.715	0.07
GRVI	$Y = 0.987 - 1.597 * VH - 1.926 * VV + 3.228 * (VV * VH)$	0.698	0.08
GVI	$Y = 1.213 - 1.326 * VH - 1.763 * VV + 2.550 * (VV * VH)$	0.746	0.05
IPVI	$Y = 1.443 - 1.746 * VH - 2.265 * VV + 3.101 * (VV * VH)$	0.737	0.06
LAI	$Y = 1.335 - 1.883 * VH - 2.335 * VV + 3.516 * (VV * VH)$	0.756	0.05
LST	$Y = -0.014 + 1.111 * VH + 1.173 * VV - 1.692 * (VV * VH)$	0.566	0.20
MNDWI	$Y = 0.029 + 0.939 * VH + 1.317 * VV - 2.116 * (VV * VH)$	0.639	0.10
MTVII	$Y = 1.212 - 1.373 * VH - 1.722 * VV + 2.584 * (VV * VH)$	0.754	0.05
MTVI2	$Y = 1.257 - 1.640 * VH - 2.034 * VV + 3.198 * (VV * VH)$	0.754	0.05
NDBI	$Y = -0.317 + 1.503 * VH + 1.890 * VV - 2.476 * (VV * VH)$	0.729	0.06
NDVI	$Y = 1.443 - 1.746 * VH - 2.265 * VV + 3.101 * (VV * VH)$	0.737	0.06
SAVI	$Y = 1.359 - 1.766 * VH - 2.237 * VV + 3.24 * (VV * VH)$	0.750	0.05
SGI	$Y = -0.091 + 0.325 * VH + 0.725 * VV - 0.799 * (VV * VH)$	0.521	0.22
SR	$Y = 0.783 - 1.426 * VH - 1.712 * VV + 3.147 * (VV * VH)$	0.669	0.09
TDVI	$Y = 1.423 - 1.593 * VH - 2.104 * VV + 2.784 * (VV * VH)$	0.729	0.06

منطقه مورد مطالعه سوم

شکل ۶ نقشه شاخص‌های استخراج‌شده برای منطقه مورد مطالعه سوم را نشان می‌دهد. بررسی رابطه بین شاخص‌های طیفی استخراج‌شده از لندست و همچنین باندهای راداری نشان داد که همبستگی بسیار زیادی بین باندهای راداری با شاخص MNDWI وجود دارد. شاخص MNDWI در ابتدا برای مطالعه میزان آب موجود و سلامت پوشش گیاهی توسعه داده شده است (هان، ۲۰۰۵). باندهای راداری نیز حساسیت بسیار زیادی به رطوبت دارد. بنابراین، برای منطقه سوم، که یک منطقه جنگلی با رطوبت بالاست، بین باندهای راداری و شاخص MNDWI همبستگی بسیار زیادی وجود دارد. کیم و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش دادند که ارتباط قوی بین باندهای (R=۹۸) راداری و محتوای آب پوشش گیاهی وجود دارد، که با نتایج این بخش مطابقت دارد. کمترین همبستگی باندهای راداری با شاخص طیفی NDBI با ضریب همبستگی ۰/۴۱۸ است. دلیل این همبستگی پایین ماهیت منطقه مورد مطالعه است، زیرا منطقه مورد مطالعه دارای کاربری با پوشش گیاهی متراکم است و شاخص NDBI برای استخراج اراضی ساخته‌شده توسعه داده شده است.



شکل ۶. نقشه شاخص‌های مورد استفاده برای منطقه مورد مطالعه سوم با کاربری پوشش جنگلی متراکم

جدول ۵. مدل‌های رگرسیون تک‌متغیره برای بررسی قابلیت باندهای راداری در منطقه مورد مطالعه سوم با کاربری پوشش جنگلی متراکم

متغیر وابسته	رابطه	R ²	RMSE
DVI	$Y = -0.375 + 2.666 * VH + 1.930 * VV - 5.526 * (VV * VH)$	0.579	0.17
EVI	$Y = -0.420 + 2.881 * VH + 2.058 * VV - 5.529 * (VV * VH)$	0.607	0.15
GDVI	$Y = -0.365 + 2.723 * VH + 2.097 * VV - 6.021 * (VV * VH)$	0.595	0.15
GNDVI	$Y = -0.135 + 2.798 * VH + 2.182 * VV - 5.476 * (VV * VH)$	0.734	0.07
GRVI	$Y = -0.694 + 3.290 * VH + 2.185 * VV - 5.526 * (VV * VH)$	0.581	0.17
GVI	$Y = -0.396 + 2.777 * VH + 1.876 * VV - 5.455 * (VV * VH)$	0.574	0.17
IPVI	$Y = -0.189 + 2.829 * VH + 2.010 * VV - 5.309 * (VV * VH)$	0.646	0.10
LAI	$Y = -0.648 + 3.293 * VH + 2.274 * VV - 6.136 * (VV * VH)$	0.595	0.15
LST	$Y = 0.583 - 1.143 * VH + 0.296 * VV - 0.320 * (VV * VH)$	0.490	0.15
MNDWI	$Y = 1.377 - 3.340 * VH - 2.774 * VV + 7.324 * (VV * VH)$	0.803	0.04
MTVI1	$Y = -0.094 + 2.047 * VH + 1.383 * VV - 3.945 * (VV * VH)$	0.562	0.18
MTVI2	$Y = -0.300 + 2.505 * VH + 1.631 * VV - 4.360 * (VV * VH)$	0.572	0.17
NDBI	$Y = 0.434 + 0.268 * VH + 0.648 * VV - 1.599 * (VV * VH)$	0.418	0.31
NDVI	$Y = -0.189 + 2.829 * VH + 2.010 * VV - 5.309 * (VV * VH)$	0.646	0.10
SAVI	$Y = -0.396 + 3.021 * VH + 2.133 * VV - 5.911 * (VV * VH)$	0.622	0.13
SGI	$Y = 0.424 - 0.631 * VH + 0.045 * VV - 0.415 * (VV * VH)$	0.515	0.23
SR	$Y = -0.616 + 2.521 * VH + 1.650 * VV - 3.695 * (VV * VH)$	0.550	0.19
TDVI	$Y = 0.091 + 2.215 * VH + 1.694 * VV - 4.481 * (VV * VH)$	0.679	0.08

نتیجه‌گیری

فناوری سنجش از دور اطلاعات ارزشمندی برای درک، فهم، و پایش الگوها و فرایندهای توسعه زمین، تغییرات خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین، و ایجاد مجموعه‌ای از نقشه‌های پوشش و کاربری زمین فراهم می‌کند. داده‌های اپتیکی از قدرت تفکیک مکانی، طیفی، و رادیومتریکی مناسبی برخوردارند و در کاربردهای مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. این داده‌ها به دلیل اینکه تحت تأثیر عوامل محیطی مانند دود، مه، ابر، و میزان نور خورشید قرار می‌گیرند، در همه فصول سال در دسترس نیستند. داده‌های SAR برخلاف داده‌های اپتیکی توانایی اخذ داده در همه شرایط آب و هوایی را دار هستند. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی قابلیت داده‌های راداری برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین است. در این مطالعه برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین از ماهواره لندست ۸- استفاده شده است. از مجموع شاخص‌های طیفی، ۱۸ شاخص استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داد برای منطقه اول شاخص‌های LST و MNDWI، در منطقه مورد مطالعه دوم شاخص‌های EVI و SGI و در منطقه مورد مطالعه سوم شاخص‌های MNDWI و NDBI به ترتیب دارای بیشترین و کمترین همبستگی با داده‌های راداری است. در بین مناطق مورد مطالعه، شاخص‌های طیفی با باندهای راداری در منطقه دوم، نسبت به مناطق اول و سوم، دارای همبستگی بیشتری است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که باندهای راداری دارای قابلیت بسیار زیادی برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح‌اند. به همین دلیل، در مواقعی که استفاده از داده‌های اپتیکی فراهم نیست، داده‌های راداری می‌توانند جای‌گزین مناسبی باشند. با در نظر گرفتن ارتباط مناسب میزان بازپخش پدیده‌ها در باندهای راداری با شاخص‌های طیفی، از نتایج این تحقیق می‌توان در کاربردهای محیطی متفاوت نظیر مطالعه جزیره حرارتی، تبخیر و تعرق، و استخراج خط ساحلی استفاده کرد.

بر طبق یافته‌های این تحقیق، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده کارایی تصاویر قطبش کامل در مقایسه با شاخص‌های طیفی موجود برای استخراج خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین بررسی شود. همچنین، تصاویر راداری با قطبش کامل، امکان محاسبه شاخص‌های راداری را بر مبنای میزان بازپخش پدیده‌ها در باندهای مختلف قطبی فراهم می‌کند. بررسی ارتباط شاخص‌های راداری با شاخص‌هایی طیفی برای برآورد و پایش خصوصیات بیوفیزیکی سطح زمین ضروری است. علاوه بر این، با در نظر گرفتن سطح اشباع شاخص‌های طیفی و ازدست‌دادن حساسیت این شاخص‌ها به تغییرات پدیده‌ها، به‌طور خاص بررسی ارتباط خصوصیات بیوفیزیکی با باندهای راداری در این محدوده‌ها پیشنهاد می‌شود.

منابع

- رضائی، م.ر. و صاحبی، م.ر. (۱۳۹۴). برآورد زیست توده جنگل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای SAR و اپتیک، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۳(۱): ۱۵-۲۶.
- ملکی، م.؛ توکلی صبور، س.م.؛ ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ. و رئیس، م. (۱۳۹۷). مقایسه داده‌های اپتیک و رادار در استخراج عوارض و پدیده‌های زمینی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۲): ۹۳-۱۰۷.
- Agapiou, A.; Hadjimitsis, D. and Alexakis, D. (2012). Evaluation of broadband and narrowband vegetation indices for the identification of archaeological crop marks, *Remote sensing*, 4(12): 3892-3919.
- Ahmadian, N.; Ghasemi, S.; Wigneron, J.P. and Zölitz, R. (2016). Comprehensive study of the biophysical parameters of agricultural crops based on assessing Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+ vegetation indices, *GIScience & Remote Sensing*, 53(3): 337-359.
- Baghdadi, N. and Zribi, M. (2016). *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest*, Elsevier.
- Bannari, A.; Asalhi, H. and Teillet, P.M. (2002). Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. In *IEEE International geoscience and remote sensing symposium*, 5: 3053-3055.
- Bertolet, B.L.; Corman, J.R.; Casson, N.J.; Sebestyen, S.D.; Kolka, R.K. and Stanley, E.H. (2018). Influence of soil temperature and moisture on the dissolved carbon, nitrogen, and phosphorus in organic matter entering lake ecosystems, *Biogeochemistry*, 139(3): 293-305.
- Boegh, E.; Søgaard, H.; Broge, N.; Hasager, C.B.; Jensen, N.O.; Schelde, K. and Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture, *Remote sensing of Environment*, 81(2-3): 179-193.
- Boori, M.S.; Balzter, H.; Choudhary, K.; Kovelskiy, V. and Vozenilek, V. (2015). A comparison of land surface temperature, derived from AMSR-2, Landsat and ASTER satellite data, *J. Geogr., Geol.*: 61-69.
- Chen, X. (2016). A case study using remote sensing data to compare biophysical properties of a forest and an urban area in Northern Alabama, USA, *Journal of Sustainable Forestry*, 35(4): 261-279.
- Crippen, R.E. (1990). Calculating the vegetation index faster, *Remote sensing of Environment*, 34(1): 71-73.
- Darvishzadeh, R.; Skidmore, A.; Abdullah, H.; Cherenet, E.; Ali, A.; Wang, T.; ... and Paganini, M. (2019). Mapping leaf chlorophyll content from Sentinel-2 and RapidEye data in spruce stands using the invertible forest reflectance model, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79: 58-70.
- Darvishzadeh, R.; Skidmore, A.; Schlerf, M.; Atzberger, C.; Corsi, F. and Cho, M. (2008). LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements, *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 63(4): 409-426.
- De Alban, J.; Connette, G.; Oswald, P. and Webb, E. (2018). Combined Landsat and L-band SAR data improves land cover classification and change detection in dynamic tropical landscapes, *Remote Sensing*, 10(2): 306.
- Duckworth, J.H. (1998). Quantitative analysis. In *Applied spectroscopy: A compact reference for practitioners*, 93.

- Du, H.; Cui, R.; Zhou, G.; Shi, Y.; Xu, X.; Fan, W. and Lü, Y. (2010). The responses of Moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*) forest aboveground biomass to Landsat TM spectral reflectance and NDVI, *Acta Ecologica Sinica*, 30(5): 257-263.
- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 18(1): 11.
- García-Llamas, P.; Suárez-Seoane, S.; Taboada, A.; Fernández-García, V. ; Fernández-Guisuraga, J. M. ; Fernández-Manso, A. ; ... and Calvo, L. (2019). Assessment of the influence of biophysical properties related to fuel conditions on fire severity using remote sensing techniques: a case study on a large fire in NW Spain, *International Journal of Wildland Fire*, 28(7): 512-520.
- Gonenc, A. ; Ozerdem, M.S. and Emrullah, A.C.A.R. (2019). Comparison of NDVI and RVI Vegetation Indices Using Satellite Images, In *2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)* (pp. 1-4). IEEE.
- Haboudane, D.; Miller, J.R.; Pattey, E.; Zarco-Tejada, P.J. and Strachan, I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, *Remote sensing of environment*, 90(3): 337-352.
- Han-Qiu, X.U. (2005). A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI), *Journal of remote sensing*, 5: 589-595.
- Hu, J.; Ghamisi, P. and Zhu, X. (2018). Feature extraction and selection of sentinel-1 dual-pol data for global-scale local climate zone classification, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9): 379.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote sensing of environment*, 25(3): 295-309.
- Jiang, Z.; Huete, A.R.; Didan, K. and Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote sensing of Environment*, 112(10): 3833-3845.
- Jackson, T.J.; Chen, D.; Cosh, M.; Li, F.; Anderson, M.; Walthall, C. ... and Hunt, E.R. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans, *Remote Sensing of Environment*, 92(4): 475-482.
- Jarchow, C.J.; Nagler, P.L. and Glenn, E.P. (2017). Greenup and evapotranspiration following the Minute 319 pulse flow to Mexico: An analysis using Landsat 8 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data, *Ecological engineering*, 106: 776-783.
- Jordan, C.F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 50(4): 663-666.
- Joshi, N.; Baumann, M.; Ehammer, A.; Fensholt, R.; Grogan, K.; Hostert, P.; ... and Reiche, J. (2016). A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring, *Remote Sensing*, 8(1): 70.
- Kaplan, G.; Avdan, U. and Avdan, Z.Y. (2018). Urban heat island analysis using the landsat 8 satellite data: A case study in Skopje, Macedonia. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2(7): 358.
- Kim, Y. and Van Zyl, J.J. (2009). A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2519-2527.
- Kim, Y.H.; Oh, J.H. and Kim, Y.I. (2014). Comparative Analysis of the Multispectral Vegetation Indices and the Radar Vegetation Index, *Agricultural and forest meteorology*, 32(6): 607-615.

- Kim, Y.; Jackson, T.; Bindlish, R.; Lee, H. and Hong, S. (2011). Radar vegetation index for estimating the vegetation water content of rice and soybean, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4): 564-568.
- Kumar, S.D.; Rao, S.S. and Sharma, J.R. (2013). Radar Vegetation Index as an alternative to NDVI for monitoring of soyabean and cotton. In Proceedings of the XXXIII INCA International Congress (Indian Cartographer), Jodhpur, India (pp. 19-21).
- Lee, J.S.; Ainsworth, T.L.; Wang, Y. and Chen, K.S. (2014). Polarimetric SAR speckle filtering and the extended sigma filter, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 53(3): 1150-1160.
- Lee, J.S.; Grunes, M.R. and De Grandi, G. (1999). Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification, *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 37(5): 2363-2373.
- Li, P.; Jiang, L. and Feng, Z. (2014). Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat-8 operational land imager (OLI) sensors, *Remote Sensing*, 6(1): 310-329.
- Ling, F.; Li, Z.; Chen, E. and Wang, Q. (2009). Comparison of ALOS PALSAR RVI and Landsat TM NDVI for forest area mapping, In *2009 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar* (pp. 132-135). IEEE.
- Lymburner, L.; Beggs, P.J. and Jacobson, C.R. (2000). Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(2): 183-192.
- Maleki, M.; Tavakkoli Sabour, S.; Zeaieanfiroozabadi, P. and Raeisi, M. (2018). Comparison of optic and radar data for terrain feature extraction, *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 9(2): 93-107.
- Moghaddam, M.H.R.; Sedighi, A.; Fasihi, S. and Firozjaei, M.K. (2018). Effect of environmental policies in combating aeolian desertification over Sejzy Plain of Iran, *Aeolian research*, 35: 19-28.
- Puleo, J.A.; Farquharson, G.; Frasier, S.J. and Holland, K.T. (2003). Comparison of optical and radar measurements of surf and swash zone velocity fields, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C3).
- Rahman, M.M.; Moran, M.S.; Thoma, D.P.; Bryant, R.; Collins, C.H.; Jackson, T. ... and Tischler, M. (2008). Mapping surface roughness and soil moisture using multi-angle radar imagery without ancillary data, *Remote Sensing of Environment*, 112(2): 391-402.
- Shwetha, H.R. and Kumar, D.N. (2015). Prediction of land surface temperature under cloudy conditions using microwave remote sensing and ANN, *Aquatic Procedia*, 4: 1381-1388.
- Ramezani, M.R. and Sahebi, M.R. (2015). Forest Biomass Estimation Using SAR and Optical Images, *Journal of Geospatial Information Technology*, 3(1): 15-26.
- Rocha, A.V. and Shaver, G.R. (2009). Advantages of a two band EVI calculated from solar and photosynthetically active radiation fluxes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(9): 1560-1563.
- Rouse Jr, J.; Haas, R.H.; Schell, J.A. and Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.
- Sinha, S.; Jeganathan, C.; Sharma, L.K. and Nathawat, M.S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5): 1779-1792.
- Sobrino, J. A.; Jimenez-Munoz, J.C. and Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of environment*, 90(4): 434-440.

- Stolz, M.; Li, M.; Feng, Z.; Kunert, M. and Menzel, W. (2018). High resolution automotive radar data clustering with novel cluster method, In *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)* (pp. 0164-0168). IEEE.
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Ullah, S.; Skidmore, A.K.; Naeem, M. and Schlerf, M. (2012). An accurate retrieval of leaf water content from mid to thermal infrared spectra using continuous wavelet analysis, *Science of the total environment*, 437: 145-152.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International journal of remote sensing*, 27(14): 3025-3033.
- Yue, X.; Zhao, J.; Li, Z.; Zhang, M.; Fan, J.; Wang, L. and Wang, P. (2017). Spatial and temporal variations of the surface albedo and other factors influencing Urumqi Glacier No. 1 in Tien Shan, China, *Journal of Glaciology*, 63(241): 899-911.