8/Iranian J. Soil Research (Soil and Water Sci.) Vol. 39, No 2 , 2025
DOI: 10.22092/IJSR.2025.370243.784

Monitoring Changes in Vegetation Health of Agricultural Lands Using Remote Sensing Data in Alborz Province

Rasoul Kharazmi[1*], and Mirnasser Navidi[2]

1-Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization; E-Mail: R.kharazmi@Areeo.ac.ir
2-Associate Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization; E-Mail: N.navidi@Areeo.ac.ir

«Research Article»

Received: July 29, 2025, and Accepted: September 7, 2025

Abstract

Monitoring vegetation health, particularly within agricultural lands, is crucial for assessing ecological sustainability, crop productivity, and climate change resilience. This study investigates the temporal trends of vegetation health in Alborz Province, Iran, from 2017 to 2025 using Sentinel-2 satellite imagery and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Data were processed and analyzed on the Google Earth Engine platform. April and May were selected as the peak growing season, and cloud and shadow masking was applied using the Scene Classification Layer (SCL) band. Annual median composites were generated to reduce noise and eliminate the influence of atmospheric disturbances. A per-pixel linear regression was then conducted on the NDVI time series to quantify trends, which were categorized into five classes: strong decrease, slight decrease, stable, slight increase, and strong increase. The results revealed that over 80% of agricultural lands in Alborz Province exhibited a negative trend in NDVI, with 66.5% classified as strong decrease and 16% as slight decrease. Only 14% of the cropland showed positive trends, while 6% remained stable. These patterns reflect a significant degradation in vegetation health across the region. When compared with similar studies conducted in arid and semi-arid regions worldwide, these findings demonstrate consistent vulnerabilities of agricultural systems to climatic stress, water scarcity, and land-use pressures. The limited areas of NDVI improvement suggest potential best practices that could be scaled to reverse degradation trends. This research provides a valuable framework for decision-making in land use planning, water resource management, and sustainable agriculture development. The integration of satellite-based monitoring with cloud-computing platforms offers a scalable approach to track vegetation dynamics in data-scarce regions.

Keywords: Google Earth Engine, Vegetation Index, Land Use/Land Cover Changes, Linear Regression, Sentinel satellite

* **Corresponding author's email:** R.kharazmi@Areeo.ac.ir
Cite this article: Kharazmi, R, Navidi, M.N., 2025. Monitoring Changes in Vegetation Health of Agricultural Lands Using Remote Sensing Data in Alborz Province.Journal of Soil Research, 39 (2),171-188.

نشریه پژوهش‌های خاک / الف / جلد ۳۹/ شماره ۲ / ۱۴۰۴/۱۸۸-۱۷۱
DOI: 10.22092/IJSR.2025.370243.784

پایش تغییرات سلامت پوشش‌گیاهی اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در استان البرز

رسول خوارزمی[۱*] و میرناصر نویدی[۲]

۱-استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ R.kharazmi@Areeo.ac.ir
۲-دانشیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ N.navidi@Areeo.ac.ir

« مقاله پژوهشی »

دریافت:۱۴۰۴/۵/۷ و پذیرش:۱۴۰۴/۶/۱۶

چکیده

پایش سلامت پوشش‌گیاهی به‌ویژه در اراضی کشاورزی، نقش کلیدی در ارزیابی پایداری منابع زیستی، بهره‌وری زراعی و مدیریت تغییرات اقلیمی دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره Sentinel-2 و شاخص NDVI، روند تغییرات سلامت پوشش-گیاهی در استان البرز طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ خورشیدی موردبررسی قرار گرفت. پردازش و تحلیل داده‌ها با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine انجام شد. ابتدا تصاویر ماه‌های فروردین و اردیبهشت به‌عنوان بازه اوج رشد پوشش‌گیاهی انتخاب شدند. با اعمال ماسک‌گذاری ابر و سایه با استفاده از باند طبقه‌بندی صحنه (Scene Classification Layer) ، داده‌ها خالص‌سازی شده و ترکیب میانه سالانه برای هر سال تولید گردید. سپس با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی بر اساس سری‌زمانی NDVI، روند تغییرات برای هر پیکسل محاسبه و در پنج طبقه از کاهش شدید تا افزایش شدید طبقه‌بندی شد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که بیش از ۸۰٪ از اراضی کشاورزی استان در طبقات "کاهش شدید" و "کاهش جزئی" قرار دارند که بیانگر افت قابل‌توجه در سلامت پوشش‌گیاهی طی دوره مطالعه است. تنها ۱۴٪ از اراضی روند افزایشی را تجربه کرده‌اند و ۶٪ نیز بدون تغییر باقی‌مانده‌اند. این الگو با یافته‌های مطالعات مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان همخوانی دارد و نشان‌دهنده فشار شدید اقلیمی و مدیریتی بر منابع کشاورزی است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه برنامه‌ریزی کاربری اراضی، مدیریت منابع آب، و توسعه کشاورزی پایدار در استان البرز و مناطق مشابه مورداستفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: گوگل ارث انجین، شاخص پوشش‌گیاهی، تغییرات کاربری اراضی، رگرسیون خطی، ماهواره سنتینل

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: R.kharazmi@areeo.ac.ir

استناد: خوارزمی، ر.، نویدی، م.ن.، ۱۴۰۴. پایش تغییرات سلامت پوشش‌گیاهی اراضی کشاورزی با استفاده از داده‌های سنجش از دور در استان البرز. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش های خاک، (۲) ۳۹، ۱۷۱-۱۸۸.

مقدمه

پایش سلامت پوشش‌گیاهی به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها، حفاظت از منابع طبیعی، و برنامه‌ریزی کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (جیووس و همکاران، ۲۰۲۱). پوشش‌گیاهی به‌عنوان یک عامل دینامیک در چرخه‌های زیستی، آب و کربن نیازمند بررسی مداوم از نظر کمی و کیفی است تا بتوان تغییرات محیطی و اثرات آن‌ها بر اکوسیستم‌ها را شناسایی کرد (ژن و همکاران، ۲۰۲۰). استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش‌گیاهی، مانند شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش‌گیاهی(NDVI) ، شاخص پوشش‌گیاهی تعدیل‌شده خاک(SAVI) ، و شاخص نسبت پوشش‌گیاهی(RVI) ، امکان پایش گسترده و دقیق تغییرات پوشش‌گیاهی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌سازد (نیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیووس و همکاران، ۲۰۲۱). این شاخص‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های طیفی گیاهان، مانند بازتاب در باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (Red)، اطلاعاتی در مورد میزان کلروفیل، زیست‌توده، و فعالیت فتوسنتزی گیاهان ارائه می‌دهند که به‌طور مستقیم با سلامت و رشد گیاهان مرتبط است (ژن و همکاران، ۲۰۲۰). اهمیت استفاده از داده‌های سنجش از دور در پایش سلامت پوشش‌گیاهی به دلیل توانایی آن در پوشش‌دهی مناطق وسیع، تکرارپذیری زمانی بالا، و کاهش هزینه‌های عملیاتی نسبت به روش‌های میدانی سنتی است (جیووس و همکاران، ۲۰۲۱). این فناوری به‌ویژه در پایش سلامت اراضی کشاورزی نقش حیاتی دارد، زیرا امکان شناسایی زودهنگام تنش‌های محیطی مانند خشکسالی، کمبود مواد مغذی، یا آفات را فراهم می‌کند، که می‌تواند به بهبود مدیریت منابع و افزایش بازده کشاورزی کمک کند (نیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، داده‌های سنجش از دور در شناسایی تغییرات کاربری اراضی، مانند تبدیل اراضی کشاورزی به مناطق شهری یا صنعتی، کاربرد گسترده‌ای دارند. این داده‌ها با ارائه اطلاعات دقیق در مورد تغییرات پوشش‌گیاهی، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا اثرات منفی تغییر کاربری اراضی را شناسایی و راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی ارائه دهند (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). توانایی پایش مستمر و شناسایی تغییرات در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور، جایی که دسترسی میدانی محدود است، از دیگر مزایای این فناوری است که آن را به ابزاری ضروری برای مدیریت اراضی با کاربری‌های مختلف تبدیل کرده است.

یکی از ابزارهای قدرتمند در تحلیل داده‌های سنجش از دور، پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)است که امکان دسترسی سریع و کارآمد به مجموعه‌های بزرگ داده‌های ماهواره‌ای، مانند تصاویر Landsatو Sentinel ، را فراهم می‌کند. این پلتفرم با ارائه ابزارهای پردازش ابری و الگوریتم‌های پیشرفته، به پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی امکان می‌دهد تا شاخص‌های پوشش‌گیاهی مختلف را در مقیاس‌های گسترده و با سرعت بالا محاسبه و تحلیل کنند. گوگل ارث انجین به دلیل قابلیت یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی، سهولت در برنامه‌نویسی با زبان‌های جاوااسکریپت و پایتون، و امکان تحلیل‌های زمانی و مکانی پیچیده، به ابزاری کلیدی برای پایش تغییرات پوشش‌گیاهی، شناسایی تنش‌های محیطی، و ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی تبدیل‌شده است. این پلتفرم به‌ویژه در مناطقی مانند ایران که نیاز به پایش مستمر و دقیق منابع طبیعی دارند، کارآمدی بالایی در تسهیل مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها و کشاورزی ارائه می‌دهد (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). درنهایت، استفاده از این داده‌ها و شاخص‌ها به کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم‌ها کمک می‌کند و به برنامه‌ریزی مؤثر برای حفاظت از اراضی کشاورزی و مدیریت پایدار کاربری اراضی یاری می‌رساند.

پایش سلامت پوشش‌گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش‌گیاهی موضوعی است که در سال‌های اخیر به دلیل پیشرفت‌های فناوری و افزایش نیاز به مدیریت پایدار منابع طبیعی، توجه زیادی را

به خود جلب کرده است. باناری و همکاران (۱۹۹۵) در مطالعه‌ای کلاسیک، شاخص‌های مختلف پوشش‌گیاهی مانند NDVI، SAVI و RVI را بررسی کرده و نشان دادند که این شاخص‌ها ابزارهای مؤثری برای ارزیابی سلامت پوشش‌گیاهی هستند. این مطالعه بر سادگی و حساسیت بالای NDVI به تغییرات زیست‌توده و کلروفیل تأکید کرد، هرچند محدودیت‌هایی مانند تأثیر شرایط خاک و پوشش ابر را نیز موردتوجه قرار داد. بارت و همکاران (۱۹۹۱) نیز پتانسیل‌ها و محدودیت‌های شاخص‌های پوشش‌گیاهی را در ارزیابی شاخص سطح برگ (LAI) و جذب تابش فعال فتوسنتزی (APAR) بررسی کردند و بر اهمیت انتخاب شاخص مناسب بر اساس نوع پوشش‌گیاهی و شرایط محیطی تأکید داشتند.

مطالعات جدیدتر با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند تصاویر ماهواره‌ای با رزولوشن بالا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دقت پایش سلامت پوشش‌گیاهی را بهبود بخشیده‌اند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۰) با ترکیب داده‌های چند طیفی از ماهواره‌های Sentinel-2و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، روشی نوین برای پیش‌بینی تنش‌های محیطی مانند خشک‌سالی و آفات ارائه کردند که دقت بالایی در شناسایی زودهنگام این تنش‌ها دارد. این مطالعه نشان داد که ترکیب داده‌های چندطیفی و الگوریتم‌های هوشمند می‌تواند محدودیت‌های شاخص‌های سنتی مانند NDVI را کاهش دهد. به‌طور مشابه، وست و همکاران (۲۰۱۹) از شاخص سلامت پوشش‌گیاهی (VHI) برای پایش تنش‌های آبی و دمایی در کشاورزی استفاده کردند و نشان دادند که ترکیب شاخص‌های NDVI و دمای سطح زمین (LST) می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر شرایط خشک‌سالی کمک کند.

در زمینه کشاورزی دقیق، پژوهش‌های اخیر بر استفاده از پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای با رزولوشن بالا برای پایش سلامت محصولات تمرکز کرده‌اند. به‌عنوان مثال، دنگ و همکاران (۲۰۱۷) با مقایسه دوربین‌های مختلف چند طیفی در پهپادها، نشان دادند که NDVI برای ارزیابی سلامت محصولات کشاورزی در مقیاس محلی بسیار مؤثر است، اما نیاز به کالیبراسیون دقیق دارد .

در ایران، شبانی پور و همکاران (۱۳۹۸) تغییرات بلندمدت پوشش‌گیاهی استان کردستان را با استفاده از تصاویر سنجنده Modis و شاخص NDVI مورد واکاوی قراردادند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش بکار گرفته‌شده به‌خوبی روند تغییرات پوشش‌گیاهی منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد. پژوهش‌های جهانی اخیر بر استفاده از شاخص‌های جدیدتر و پیشرفته‌تر مانند شاخص تقویت‌شده پوشش‌گیاهی (EVI) و شاخص تفاوت نرمال‌شده آب (NDWI) متمرکزشده‌اند. به‌عنوان‌مثال، پارک و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از EVI و داده‌های MODIS، تغییرات فصلی فعالیت فتوسنتزی در اکوسیستم‌های شمالی را بررسی کردند و نشان دادند که این شاخص نسبت به NDVI در مناطق با پوشش‌گیاهی متراکم حساس‌تر است. علاوه بر این، نوتاماچوت و همکاران (۲۰۲۲) با ترکیب داده‌های راداری Sentinel-1 و شاخص های نوری مانند NDVI، به ارزیابی زیست‌توده جنگلی پرداختند و نشان دادند که این رویکرد دقت مدل‌سازی را بهبود می‌بخشد.

از سوی دیگر، مطالعات نشان داده‌اند که انتخاب شاخص مناسب به نوع کاربرد و شرایط محیطی بستگی دارد. به‌عنوان‌مثال، ماکسول و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی شاخص‌های مختلف، نشان دادند که OSAVI در مقایسه با NDVI در مناطق با پوشش خاک بالا دقت بیشتری در پایش سلامت پوشش‌گیاهی دارد.. این پژوهش‌ها به‌طورکلی نشان‌دهنده نقش حیاتی داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش‌گیاهی در مدیریت پایدار منابع طبیعی و کشاورزی هستند و بر نیاز به توسعه روش‌های جدید و یکپارچه برای بهبود دقت پایش تأکید دارند.

ضرورت پایش سلامت پوشش‌گیاهی و ارتباط آن با تغییر کاربری اراضی کشاورزی

تغییر کاربری اراضی کشاورزی، به‌ویژه تبدیل اراضی زراعی به مناطق شهری یا صنعتی، یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت پایدار منابع طبیعی است که اثرات منفی قابل‌توجهی بر سلامت پوشش‌گیاهی و امنیت غذایی دارد. پایش سلامت پوشش‌گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش‌گیاهی نقش مهمی در شناسایی و مدیریت این تغییرات ایفا می‌کند. این فناوری امکان ردیابی تغییرات در سلامت پوشش‌گیاهی را در مقیاس‌های گسترده فراهم می‌سازد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا اثرات منفی تغییر کاربری اراضی را ارزیابی کرده و راهکارهایی برای کاهش پیامدهای منفی آن ارائه دهند (هییو و همکاران، ۲۰۲۳).

یکی از دلایل اصلی ضرورت پایش سلامت پوشش‌گیاهی، ارتباط مستقیم آن با پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی است. کاهش سلامت پوشش‌گیاهی، که اغلب با کاهش شاخص‌هایی مانند NDVI یا VHIهمراه است، می‌تواند نشانه‌ای از تخریب اراضی کشاورزی به دلیل فعالیت‌های انسانی مانند شهرسازی یا بهره‌برداری ناپایدار باشد. به‌عنوان مثال، فو و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های Landsat و شاخص NDVI، تأثیر گسترش مناطق شهری بر کاهش پوشش‌گیاهی در مناطق کشاورزی را بررسی کردند و نشان دادند که این تغییرات منجر به کاهش قابل‌توجه زیست‌توده و ظرفیت تولید محصولات کشاورزی شده است. این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر برای شناسایی زودهنگام تغییرات کاربری اراضی و برنامه‌ریزی برای حفظ اراضی کشاورزی تأکید دارد.

علاوه بر این، پایش سلامت پوشش‌گیاهی می‌تواند به شناسایی تنش‌های محیطی مرتبط با تغییر کاربری اراضی، مانند کاهش دسترسی به آب یا تخریب خاک، کمک کند. کومار و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص NDWI و داده‌های Sentinel-2 ، نشان دادند که تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های غیر کشاورزی در مناطق خشک منجر به کاهش رطوبت خاک و افزایش تنش‌های آبی در پوشش‌گیاهی شده است. این یافته‌ها بر ضرورت استفاده از شاخص‌های حساس به آب مانند NDWIبرای پایش اثرات تغییر کاربری اراضی بر سلامت پوشش‌گیاهی تأکید دارند. به‌طور مشابه، چن و همکاران (۲۰۲۳) با ترکیب داده‌های راداری Sentinel-1 و شاخص‌های نوری، نشان دادند که تغییر کاربری اراضی کشاورزی به مناطق صنعتی باعث کاهش تنوع زیستی و سلامت پوشش‌گیاهی شده و اثرات منفی بر خدمات اکوسیستمی مانند تنظیم آب‌وخاک داشته است.

در ایران، تغییر کاربری اراضی کشاورزی به دلیل فشارهای شهری و صنعتی یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی است. نیک‌پور و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که کاهش مقادیر NDVI در استان ایلام با تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های غیر کشاورزی مرتبط است، که این امر به کاهش حاصلخیزی خاک و ظرفیت تولید کشاورزی منجر شده است. این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر پوشش‌گیاهی برای جلوگیری از تخریب بیشتر اراضی تأکید دارد. همچنین، احمدی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و شاخص EVI، اثرات گسترش مناطق شهری بر سلامت پوشش‌گیاهی در حاشیه شهرهای بزرگ ایران را بررسی کردند و نشان دادند که این تغییرات باعث کاهش فعالیت فتوسنتزی و افزایش تنش‌های محیطی در اراضی کشاورزی شده است.

از سوی دیگر، پایش سلامت پوشش‌گیاهی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی اثربخشی سیاست‌های مدیریت اراضی استفاده شود. به‌عنوان مثال، لیو و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های MODIS و شاخص VHI، تأثیر سیاست‌های حفاظت از اراضی کشاورزی را در برابر تغییر کاربری بررسی کردند و نشان دادند که پایش مستمر سلامت پوشش‌گیاهی می‌تواند به شناسایی مناطق در معرض خطر و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی کمک کند. این مطالعه نشان داد که شاخص‌های پوشش‌گیاهی می‌توانند

به‌عنوان معیاری برای ارزیابی پایداری اراضی کشاورزی در برابر فشارهای ناشی از تغییر کاربری عمل کنند.

به‌طورکلی، پایش سلامت پوشش‌گیاهی نه‌تنها به شناسایی اثرات منفی تغییر کاربری اراضی کشاورزی کمک می‌کند، بلکه در برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از منابع طبیعی نقش کلیدی دارد. استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و شاخص‌های پیشرفته مانند NDVI امکان ارائه داده‌های دقیق و به‌موقع را فراهم می‌کند که برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد در مدیریت اراضی کشاورزی ضروری است. این رویکرد به کاهش اثرات منفی تغییر کاربری اراضی، حفظ امنیت غذایی، و تقویت پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی کمک می‌کند(پاندی و شارما، ۲۰۲۱).

ضرورت پایش سلامت پوشش‌گیاهی در استان البرز با توجه به اهمیت کشاورزی و موقعیت ژئوپلیتیکی

استان البرز با برخورداری از اراضی حاصلخیز و تنوع اقلیمی، نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی و تأمین امنیت غذایی ایفا می‌کند. بااین‌حال، نزدیکی به پایتخت و موقعیت البرز به‌عنوان یک مرکز اقتصادی و صنعتی، آن را در معرض فشارهای فزاینده‌ای برای توسعه زیرساخت‌های شهری، صنعتی و حمل‌ونقل قرار داده است. این عوامل باعث شده‌اند که اراضی کشاورزی این استان در معرض تهدیدات ناشی از تغییر کاربری و توسعه غیر پایدار قرار گیرند، که ضرورت پایش سلامت پوشش‌گیاهی را در این منطقه دوچندان می‌کند.

اهمیت کشاورزی در البرز به دلیل تولید محصولات زراعی و باغی متنوع و تأمین نیازهای غذایی منطقه و حتی پایتخت، غیرقابل‌انکار است. با این وجود، فقدان مطالعات جامع و دقیق در زمینه پایش سلامت پوشش‌گیاهی در البرز، شکاف قابل‌توجهی در درک وضعیت کنونی این اراضی و شناسایی تهدیدات بالقوه ایجاد کرده است. انجام چنین مطالعاتی با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد وضعیت سلامت پوشش‌گیاهی، تنش‌های و روندهای احتمالی تخریب اراضی فراهم کند که این اطلاعات برای برنامه‌ریزی حفاظت از اراضی کشاورزی و مدیریت پایدار منابع طبیعی ضروری هستند.

علاوه بر این، کمبود مطالعات پیشین در زمینه پایش سلامت پوشش‌گیاهی در البرز خود به‌عنوان یک ضرورت برای انجام چنین پژوهش‌هایی مطرح است. نبود داده‌های کافی در مورد وضعیت پوشش‌گیاهی این استان، توانایی تصمیم‌گیرندگان را برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار محدود کرده است. به‌طورکلی، پایش سلامت پوشش‌گیاهی در استان البرز به دلیل اهمیت کشاورزی این منطقه یک ضرورت است. این نوع پایش نه‌تنها به حفظ اراضی کشاورزی و تقویت امنیت غذایی کمک می‌کند، بلکه داده‌های لازم برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و کاهش اثرات منفی توسعه شهری و صنعتی را فراهم می‌سازد. انجام مطالعات جامع در این زمینه می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تدوین سیاست‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی توسعه پایدار در البرز عمل کند.

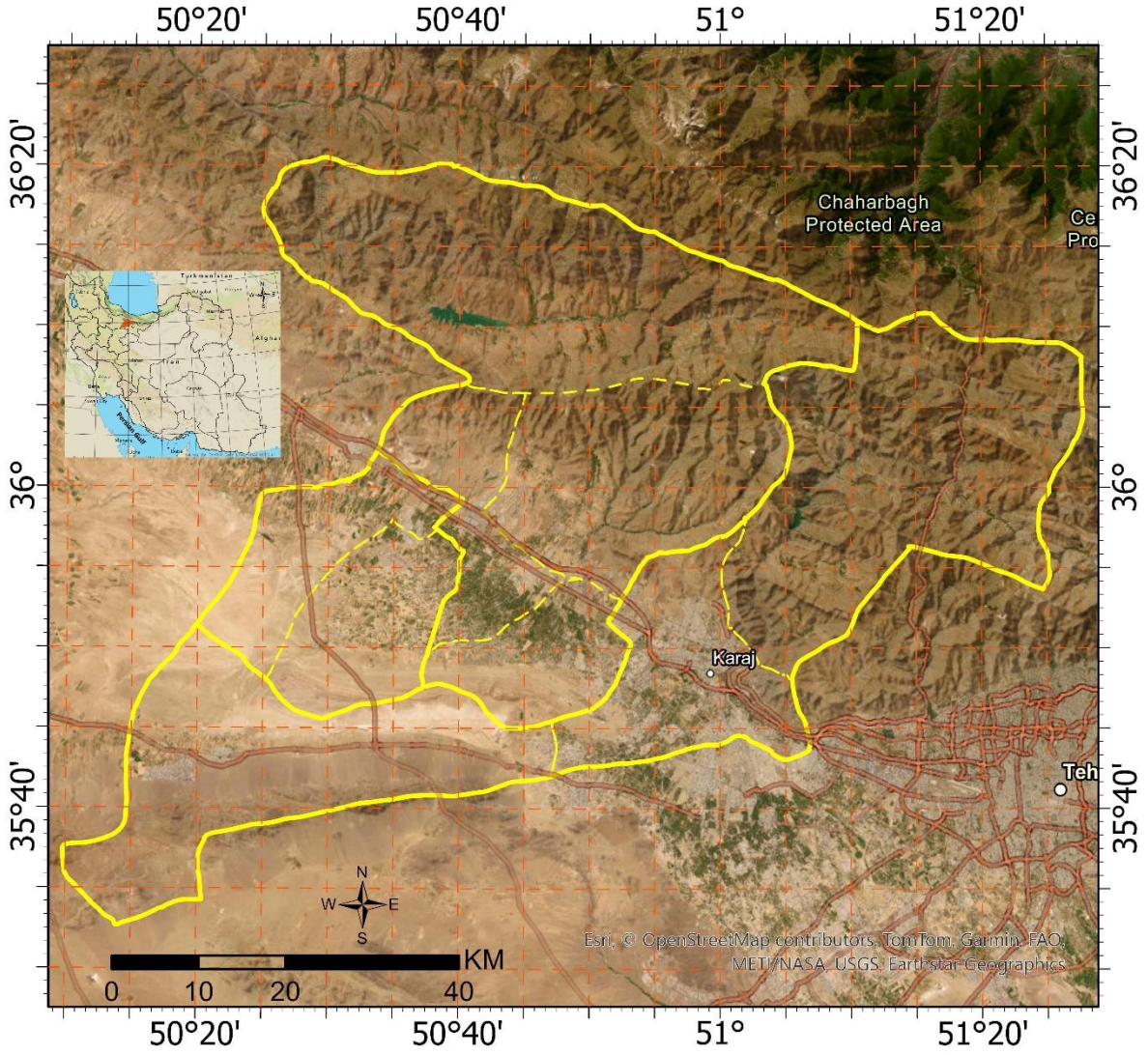
مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

استان البرز، با گستره‌ای حدود ۵۱۲۳ کیلومترمربع، در بخش جنوبی رشته‌کوه البرز جای گرفته است. بخش‌های شمالی این استان عمدتاً کوهستانی هستند، درحالی‌که مناطق جنوبی آن به دشت‌های مرکزی فلات ایران تعلق دارند (شکل ۱). این استان به دلیل قرارگیری در مسیر ارتباطی میان قطب‌های صنعتی عمده کشور، از موقعیت جغرافیایی ویژه‌ای برخوردار بوده و همین موضوع موجب مهاجرت و افزایش جمعیت از مناطق مختلف کشور به آن شده است. شرایط اقلیمی در البرز از نواحی جنوبی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک آغاز می‌شود و هر چه به سمت

شمال پیش می‌رویم، به آب‌وهوای مرطوب تا بسیار مرطوب تغییر می‌یابد (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳).

مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که حدود ۶۲ هزار هکتار از اراضی این استان تحت کشت است.، که بخش عمده‌ای از آن در دشت‌هایی مانند هشتگرد قرار دارد و بهره‌برداری گسترده از آب‌های سطحی و زیرزمینی را شامل می‌شود (رضایی و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، ارزیابی ظرفیت اکولوژیکی استان نشان می‌دهد که حداقل ۶۳هزار هکتار از اراضی برای کشاورزی آبی مناسب‌اند، و بخش قابل‌توجهی از اراضی استان پتانسیل مناسبی برای توسعه باغات و کشاورزی دارد (بهرامی و همکاران، ۲۰۲۴).



شکل ۱- موقعیت مکانی محدوده موردمطالعه

روش کار

پایش سلامت پوشش‌گیاهی یکی از روش‌های کلیدی برای ارزیابی وضعیت اکوسیستم‌ها، مدیریت پایدار منابع طبیعی، و برنامه‌ریزی کشاورزی است. استفاده از داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2و پلتفرم گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)، امکان تحلیل دقیق و گسترده تغییرات پوشش‌گیاهی را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌کند. در این پژوهش، فرآیند محاسبه شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش‌گیاهی (NDVI) برای پایش

سلامت پوشش‌گیاهی در استان البرز طی بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ (ماه‌های فروردین و اردیبهشت) با استفاده از داده‌های Sentinel-2 و پلتفرم گوگل ارث انجین را تشریح می‌کند.

تصاویر استفاده‌شده در این پژوهش، متعلق به ماهواره Sentinel-2 است. این ماهواره، مأموریتی از برنامه کوپرنیک اتحادیه اروپا، تصاویری باقدرت تفکیک مکانی بالا (۱۰ تا ۶۰ متر) و قدرت تفکیک زمانی ۵ روز ارائه می‌دهد که برای پایش پوشش‌گیاهی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای بسیار مناسب است. محصول انتخاب‌شده در این تحلیل، مجموعه "S2_SR_HARMONIZED" است که داده‌های سطح بازتابی (Level-2A) تصحیح‌شده اتمسفری را با وضوح مکانی بالا فراهم می‌کند (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳). باندهای طیفی قرمز (باند ۴) و مادون قرمز نزدیک (باند ۸) این ماهواره برای محاسبه NDVI استفاده می‌شوند، زیرا این باندها به ترتیب نشان‌دهنده جذب کلروفیل و بازتاب قوی پوشش‌گیاهی سالم هستند. بازه زمانی انتخاب‌شده (فروردین و اردیبهشت، ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴) به دلیل اوج فعالیت فتوسنتزی پوشش‌گیاهی در بهار و کاهش تأثیر پوشش ابر در این ماه‌ها در منطقه البرز انتخاب‌شده است. این بازه زمانی امکان تحلیل روندهای بلندمدت سلامت پوشش‌گیاهی را فراهم می‌کند و بهترین بازتاب از سلامت پوشش‌گیاهی در آغاز فصل رویش را ارائه می‌دهند.

پیش‌پردازش داده‌ها و ماسک ابر

یکی از مراحل کلیدی در پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای برای استخراج شاخص‌های طیفی نظیرNDVI ، حذف پیکسل‌های مخدوش ناشی از حضور ابر، سایه ابر، برف، مه و سایر عوامل جوی یا سنسوری است. برای اطمینان از کیفیت داده‌ها و حذف تصاویر باکیفیت پایین، از دو فیلتر مهم استفاده‌شده است. در ابتدا تصاویر با درصد پوشش ابر کمتر از ۲۰٪ فیلتر شدند تا تأثیر ابرها بر داده‌های طیفی کاهش یابد (لوویس و همکاران، ۲۰۱۹). سپس، به‌منظور افزایش دقت استخراج شاخص‌های طیفی و کاهش تأثیر خطاهای ناشی از شرایط اتمسفری یا پیکسل‌های غیر معتبر، از باند طبقه‌بندی صحنه (Scene Classification Layer) یا SCL موجود در داده‌های Sentinel-2 سطح بازتابی Level-2A استفاده شد. این باند که توسط الگوریتمSen2Cor (ریانی و همکاران، ۲۰۲۱) در فرایند پیش‌پردازش تولید می‌شود، هر پیکسل را بر اساس نوع سطح پوششی آن به یکی از دوازده کلاس مجزا طبقه‌بندی می‌کند (جدول یک). کلاس‌های موجود شامل پوشش‌گیاهی متراکم، خاک برهنه، مناطق آبی، مناطق ساخته‌شده، برف یا یخ، ابرها با احتمال متوسط و بالا، سایه ابر، پیکسل‌های معیوب و سایر موارد هستند (زکول و همکاران، ۲۰۲۱).

جدول ۱- طبقه‌بندی پیکسل‌ها در الگوریتم Scene Classification Layer

شرح کد	کدSCL
بدون داده (No Data)	۰
پوشش آبی(Saturated or Dark Features)	۱
آب(Water)	۲
ابر برف‌گونه(Cloud shadows over snow)	۳
پوشش‌گیاهی(Vegetation)	۴
خاک لخت(Bare soil)	۵
مناطق ساخته‌شده(Built-up)	۶
سایه ابر(Cloud shadow)	۷
ابر متوسط(Cloud medium probability)	۸
ابر زیاد(Cloud high probability)	۹
ابر سیروس(Thin cirrus)	۱۰
برف یا یخ(Snow or ice)	۱۱

برای حذف پیکسل‌های نامعتبر، از مجموعه‌ای از کلاس‌های نامطلوب شامل سایه ابر (کد ۷)، ابر با احتمال متوسط (کد ۸)، ابر با احتمال زیاد (کد ۹)، ابر نازک یا سیروس (کد ۱۰) و پیکسل‌های اشباع یا معیوب (کد ۱۱) صرف‌نظر شد. به این منظور، ماسک منطقی M(x,y) به‌صورت زیر تعریف شد:

رابطه(۱)

$$M(x,y)=\begin{cases} 1 \; if \; SCL(x,y) \in \{4,5,6\} \\ 0 \; if \; SCL(x,y) \in \{7,8,\ 9,10,11\} \end{cases}$$

در این فرمول، SCL(x,y) مقدار باند SCL در مختصات مکانی پیکسل و M(x,y) ماسک نهایی است. تنها پیکسل‌هایی با مقدار ماسک برابر با ۱ (یعنی معتبر) در تحلیل‌های بعدی نظیر محاسبه NDVI و تحلیل روند وارد شدند.

لازم به توضیح است که کلاس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب شامل پوشش‌های آبی، منابع آب و ابر برف گونه در باند طبقه‌بندی صحنه (SCL) تصاویر Sentinel-2 درواقع به انواع پوشش سطح زمین مربوط می‌شوند و فاقد پوشش-گیاهی هستند که در تحلیل NDVI کنار گذاشته می‌شوند (گاسکون و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به ماهیت شاخص NDVI و حساسیت بالای آن به بازتاب‌های غیرواقعی، پیکسل‌هایی که تحت تأثیر ابرها، سایه ابر، ابر پَرسان (cirrus) و پیکسل‌های اشباع یا معیوب قرار دارند؛ از تصاویر حذف شدند. این کار با اعمال ماسک منطقی به داده‌های تصویری در محیط Google Earth Engineانجام شد. به‌این‌ترتیب، تنها پیکسل‌های باکیفیت مناسب که احتمال بازتاب واقعی پوشش‌گیاهی دارند، در روند تحلیل وارد شدند.

لازم به توضیح است که استفاده از باند SCL در فاز پیش‌پردازش، از چند جهت اهمیت دارد. اولاً، این فرایند به‌طور مؤثری از ورود نویزهای شدید ناشی از پوشش ابری یا اشباع سنسورها به فرایند محاسبه NDVI جلوگیری می‌کند. ثانیاً، باعث می‌شود سری زمانی حاصل از این شاخص از همگنی و یکپارچگی بیشتری برخوردار باشد که در تحلیل‌های آماری بلندمدت، نظیر رگرسیون خطی پیکسلی، حیاتی است(گاندرا و همکاران، ۲۰۲۰). درنهایت، این اقدام دقت مدل‌های تغییر روند را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، زیرا پیکسل‌های غیرواقعی باعث خطای برازش و تفسیرهای نادرست از شیب و روند تغییرات می‌شوند.

در برخی مطالعات، بسته به هدف تحقیق، کلاس‌های دیگری مانند خاک برهنه یا مناطق ساخته‌شده نیز از داده‌ها حذف می‌شوند تا فقط پوشش‌گیاهی خالص مورد تحلیل قرار گیرد. در این تحقیق، با توجه به تمرکز بر ارزیابی سلامت پوشش‌گیاهی کشاورزی، حذف

پیکسل‌های ابری و معیوب کافی تشخیص داده شد و سایر کلاس‌ها، ازجمله خاک، در تحلیل باقی ماندند تا امکان بررسی تحولات حاشیه مزارع نیز فراهم گردد.

محاسبه شاخص NDVI

شاخص پوشش‌گیاهی نرمال‌شده (NDVI) با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۲)

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red}$$

که در آن NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک (باند ۸) و Redبازتاب باند قرمز (باند ۴) است. این شاخص به دلیل حساسیت بالا به تغییرات کلروفیل، زیست‌توده، و فعالیت فتوسنتزی، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش سلامت پوشش‌گیاهی شناخته می‌شود (ژیانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

در این پژوهش، برای هر سال (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴)، تصاویر Sentinel-2در بازه زمانی آپریل تا می انتخاب شد و درنهایت، برای تولید یک تصویر ترکیبی فاقد پوشش ابری در سطح کل منطقه مطالعه، از عملگر میانه (Median) بهره گرفته شد. استفاده از این روش نه‌تنها موجب کاهش اثرات پیکسل‌های پوشیده از ابر می‌شود، بلکه با حذف مقادیر پرت ناشی از پدیده‌هایی مانند سایه، مه یا روشنایی‌های غیرعادی، به بهبود کیفیت و همگنی تصویر نهایی کمک می‌کند (خوارزمی و همکاران، ۱۴۰۳).

تحلیل روند سری‌زمانی NDVI با استفاده از رگرسیون خطی

به‌منظور بررسی روند تغییرات بلندمدت در پوشش‌گیاهی استان البرز طی دوره زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴، از مدل رگرسیون خطی پیکسلی استفاده شد. در این روش، به ازای هر پیکسل، شاخص NDVI محاسبه‌شده برای ماه‌های تعیین‌شده هر سال به‌عنوان متغیر وابسته و سال به‌عنوان متغیر مستقل در یک مدل خطی قرار گرفت. تحلیل مذکور با استفاده از تابع ee.Reducer.linearFit() در محیط Google Earth Engine پیاده‌سازی شد که برای هر پیکسل دو پارامتر مهم را استخراج می‌کند: شیب (slope)و عرض از مبدأ(intercept) .

مدل خطی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

رابطه(۳)

$$NDVI_t = \beta_0 + \beta_1 \times t +$$

که در آن، $NDVI_t$ مقدار شاخص NDVI در سال t ، β_0 عرض از مبدأ، β_1 شیب خط و ε جمله خطای تصادفی است. پارامتر شیب (β_1) به‌عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی روند تغییرات پوشش‌گیاهی مورداستفاده قرار گرفت. مقادیر مثبت شیب بیانگر روند افزایشی در سلامت پوشش‌گیاهی در بازه زمانی موردبررسی هستند، درحالی‌که مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش پوشش‌گیاهی، ناشی از خشکسالی، تغییرات کاربری زمین یا تخریب اکولوژیکی است. مقادیر نزدیک به صفر نیز بیانگر ثبات نسبی در وضعیت پوشش‌گیاهی در طول زمان می‌باشند.

مزیت اصلی رگرسیون خطی در این تحلیل، سادگی در پیاده‌سازی و تفسیر آسان نتایج است. این روش به‌صورت پیکسلی اجراشده و امکان بررسی دقیق تغییرات مکانی را نیز فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، با استفاده از تصاویر میانگین‌گیری‌شده (میانه‌گیری) در ماه آوریل و حذف پیکسل‌های دارای نویز، ابری یا معیوب، دقت این تحلیل بهبودیافته است و نتایج آن با واقعیت پوشش زمین همخوانی بسیار بالایی دارد.

برای طبقه‌بندی بهتر نتایج حاصل از شیب NDVI، مقادیر عددی به پنج کلاس معنایی تقسیم شدند (جدول دو). این طبقات بر اساس مطالعات انجام‌شده پیشین (لان و دونگ، ۲۰۲۲) و همچنین، شدت و جهت روند تغییرات طراحی گردیده‌اند و امکان تولید نقشه‌های موضوعی از وضعیت پویایی پوشش‌گیاهی را فراهم می‌سازند. نقشه نهایی حاصل از طبقه‌بندی شیب NDVI امکان شناسایی سریع مناطق در حال تخریب یا بهبود اکولوژیکی را برای مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و برنامه‌ریزی کاربری زمین فراهم می‌سازد.

جدول ۲- تغییرات شیب شاخص NDVI در طول زمان

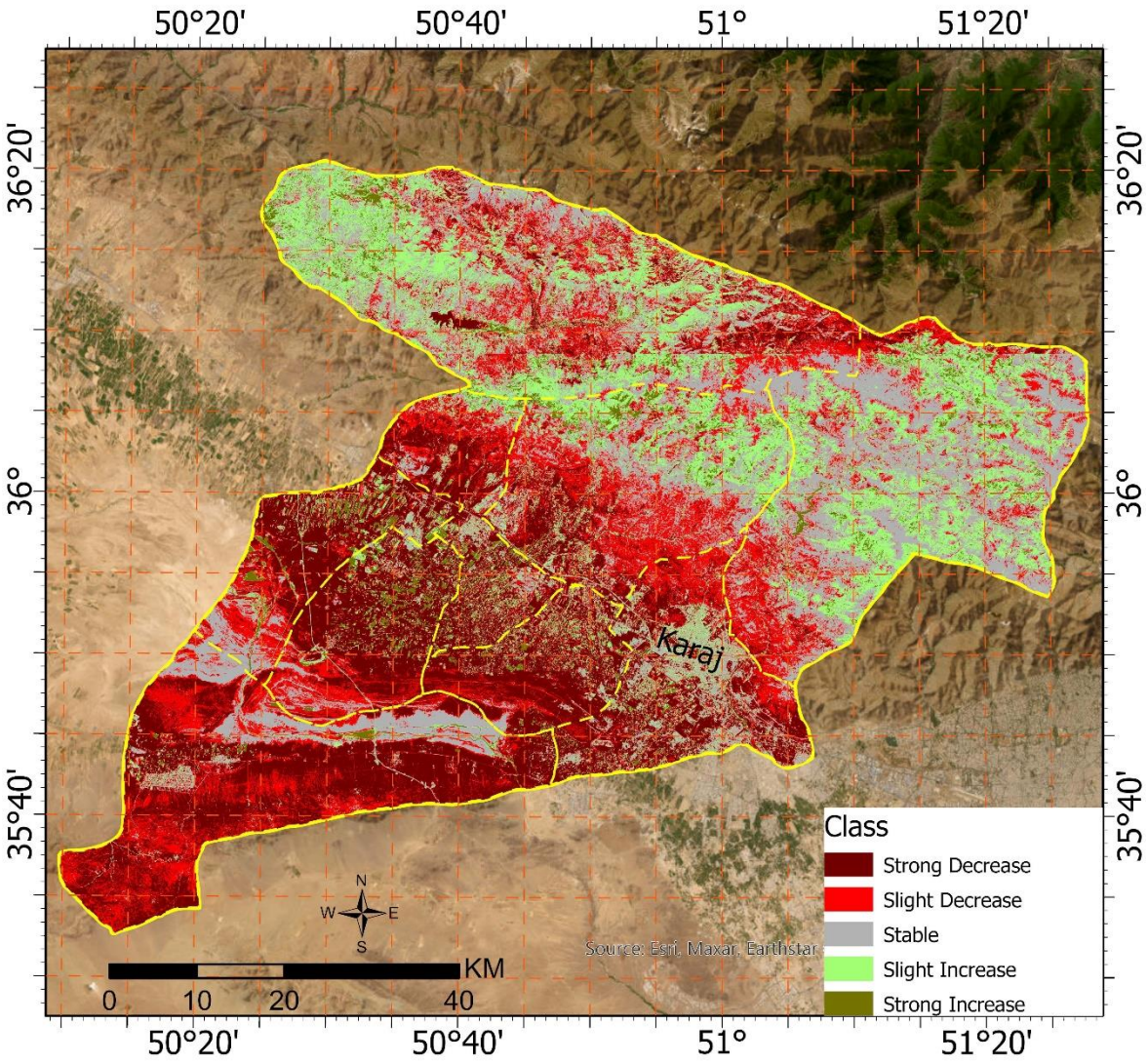
Class	Slope Range (per year)	Interpretation
0	< –0.02	Strong Decrease
1	–0.02 to –0.005	Slight Decrease
2	–0.005 to +0.005	Stable
3	+0.005 to +0.02	Slight Increase
4	> +0.02	Strong Increase

بررسی سلامت گیاهی در اراضی کشاورزی

در این مرحله با توجه به اهمیت سلامت شرایط گیاهی به‌منظور پایش روند تخریب، لایه اراضی کشاورزی استان البرز (شامل اراضی زراعی آبی و دیم، اراضی آیش و باغات) با استفاده از پروداکت با دقت ده متر پوشش‌زمین که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) تهیه و منتشرشده است، استخراج گردید. این نقشه بر پایه داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 و Sentinel-2 تهیه‌شده است. این محصول شامل ۱۱ طبقه پوشش زمین بوده و در چارچوب پروژه World Coverآژانس فضایی اروپا و به‌عنوان بخشی از برنامه پنجم پوشش مشاهدات زمینی (EOEP-5) تولیدشده است (زانگا و همکاران، ۲۰۲۱).

نتایج

با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده بر پایه شاخص NDVIو استفاده از سری‌زمانی تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴، در این بخش به بررسی روند تغییرات سلامت پوشش‌گیاهی در استان البرز پرداخته می‌شود. نتایج ارائه‌شده بر اساس مدل رگرسیون خطی پیکسلی و طبقه‌بندی شیب تغییرات NDVI ، تصویری دقیق از مناطق با افزایش، کاهش یا ثبات در وضعیت زیستی پوشش‌گیاهی فراهم می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲- نقشه پایش سلامت پوشش‌گیاهی استان البرز بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ خورشیدی

نتایج تحلیل سری‌زمانی شاخص NDVI با استفاده از مدل رگرسیون خطی پیکسلی در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵، تغییرات پوشش‌گیاهی در محدوده استان البرز را در پنج کلاس اصلی دسته‌بندی کرد: «کاهش شدید»، «کاهش جزئی»، «پایدار»، «افزایش جزئی» و «افزایش شدید». بررسی آماری این طبقات نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از استان طی این دوره با روند منفی در سلامت پوشش‌گیاهی مواجه بوده است.

بیشترین مساحت متعلق به کلاس کاهش شدید (Strong Decrease)با ۱۴۹۴/۵ کیلومترمربع است که حدود ۳۰ درصد از کل محدوده موردمطالعه را دربر می‌گیرد. این نواحی عمدتاً در بخش‌های جنوبی و مرکزی واقع‌شده‌اند و به رنگ قرمز تیره در نقشه مشخص هستند. چنین روندی می‌تواند نشانه‌ای از تخریب پوشش‌گیاهی، تغییرات کاربری نامطلوب یا کاهش پایداری کشاورزی در این مناطق باشد.

از سوی دیگر، طبقه پایدار (Stable) با ۱۳۸۰/۶ کیلومترمربع معادل تقریباً ۲۷ درصد مساحت کل، نشان‌دهنده مناطقی است که در طی این نه سال، تغییر محسوسی در شاخص NDVI آن‌ها مشاهده نشده است. این نواحی (به رنگ خاکستری) معمولاً شامل زمین‌های بایر ثابت، مناطق کوهستانی و سنگلاخی، مناطق شهری پایدار یا مراتعی با نوسانات جزئی پوشش‌گیاهی هستند.

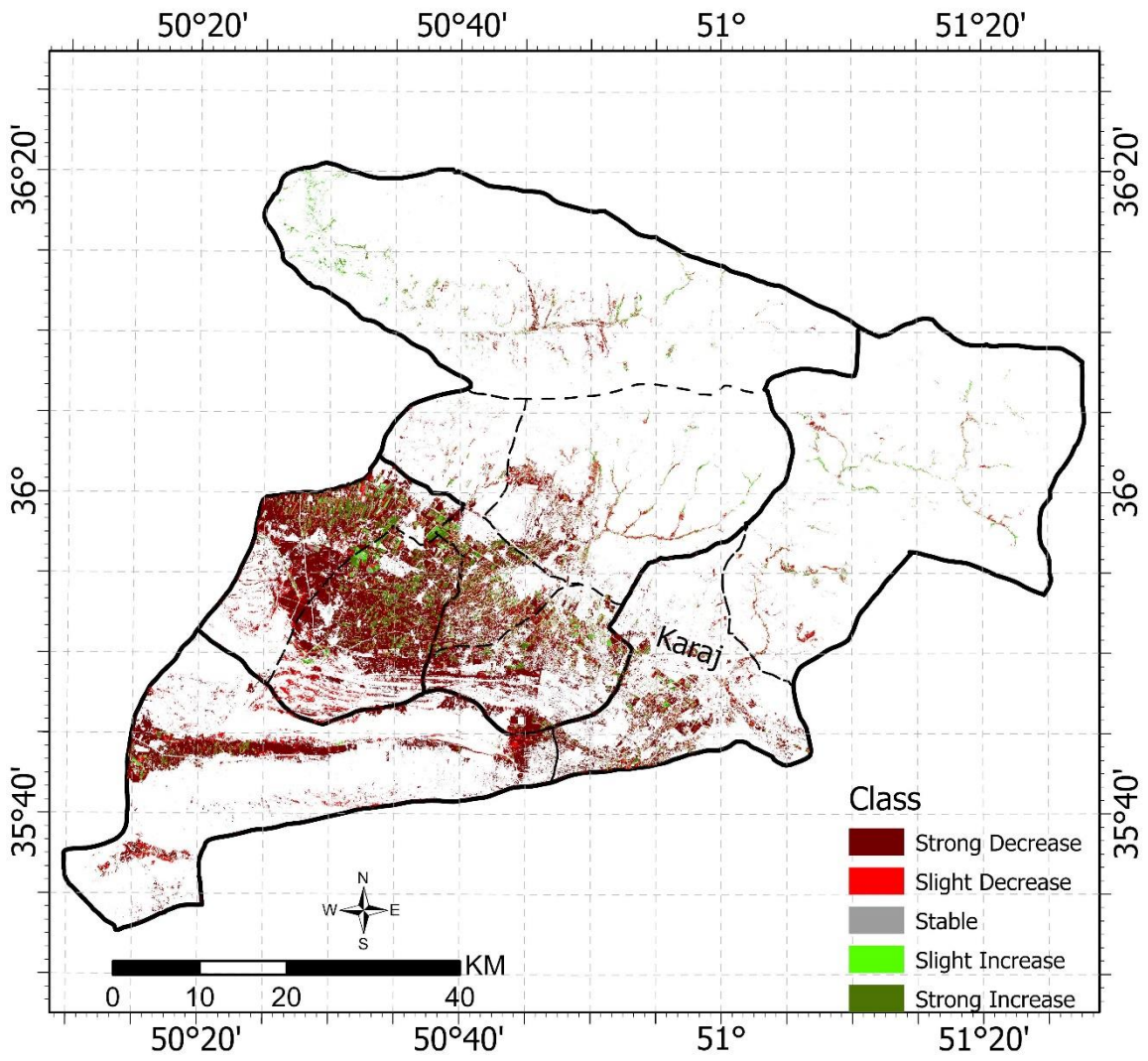
طبقه کاهش جزئی (Slight Decrease) با مساحت ۱۲۶۰ کیلومترمربع (حدود ۲۵ درصد) سومین سهم بزرگ از کل منطقه را دارد. این مناطق نیز به‌طور گسترده‌ای در بخش‌های میانی و غربی استان پراکنده شده‌اند و اغلب به رنگ قرمز روشن نمایش داده شده‌اند. در مجموع، دو طبقه دارای روند کاهشی (کاهش شدید و جزئی) مجموعاً ۲۷۵۴/۵ کیلومتر مربع، معادل بیش از ۵۵ درصد مساحت کل منطقه را تشکیل می‌دهند که هشداردهنده کاهش گسترده در سلامت زیستی گیاهان طی دوره مورد بررسی است.

مساحت طبقات دارای روند افزایشی نسبتاً کمتر است. طبقه افزایش شدید (Strong Increase) با ۷۶۲/۸ کیلومتر مربع حدود ۱۴/۹ درصد و طبقه افزایش جزئی (Slight Increase)با ۲۲۶ کیلومتر مربع حدود ۴/۶ درصد از محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شوند. این نواحی که به رنگ سبز تیره و سبز روشن در نقشه مشخص‌اند، عمدتاً در نواحی شمالی و شرقی استان و در حاشیه ارتفاعات و مناطق جنگلی پراکنده شده‌اند. این روند می‌تواند بیانگر بهبود شرایط اکولوژیکی محلی بواسطه بارندگی‌های محلی در این فصل از سال در برخی نواحی باشد.

با توجه به این تحلیل، می‌توان نتیجه گرفت که روند کلی تغییرات NDVI در استان البرز منفی بوده و نیازمند توجه جدی در مدیریت منابع طبیعی، مقابله با بیابان‌زایی و بازنگری در کاربری اراضی کشاورزی و مراتع می‌باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی محیط‌زیستی در سطح استانی و منطقه‌ای فراهم آورد.

تحلیل کمی و تطبیقی روند تغییرات سلامت پوشش‌گیاهی در اراضی کشاورزی استان البرز

نتایج حاصل از تحلیل روند شاخص NDVI در اراضی کشاورزی استان البرز طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و الگوریتم رگرسیون خطی پیکسلی، نشان‌دهنده الگوی غالبی از کاهش سلامت پوشش‌گیاهی در بخش قابل توجهی از این اراضی است (شکل ۳).



شکل ۳- نقشه پایش سلامت پوشش‌گیاهی اراضی کشاورزی استان البرز بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۴ خورشیدی

طبقه‌بندی تغییرات به پنج کلاس اصلی (کاهش شدید، کاهش جزئی، پایدار، افزایش جزئی، افزایش شدید) و تحلیل کمی آن‌ها حاکی از آن است که بیش از ۸۰ درصد اراضی کشاورزی استان روندی نزولی در شاخص NDVI را تجربه کرده‌اند.

بیشترین مساحت به کلاس کاهش شدید (Strong Decrease)با ۵۳۶/۸ کیلومتر مربع تعلق دارد که معادل حدود ۶۶/۵ درصد کل اراضی کشاورزی استان است. این نواحی به رنگ قرمز تیره در نقشه مشخص هستند و نمایانگر افت محسوس در مقدار NDVI در طول زمان می‌باشند. چنین روندی معمولاً تحت تأثیر عواملی همچون خشکسالی‌های پی‌درپی، کاهش منابع آب، تخریب خاک، بهره‌برداری بیش‌ازحد و تغییر کاربری به سمت توسعه شهری شکل می‌گیرد. در کنار آن، طبقه کاهش جزئی (Slight Decrease) نیز با ۱۲۹/۸ کیلومتر مربع (حدود ۱۶ درصد) سهم قابل توجهی از زمین‌های کشاورزی را شامل می‌شود. در مجموع، دو طبقه دارای روند کاهشی، سطحی معادل ۶۶۶/۶ کیلومتر مربع (۸۲/۵ درصد از کل اراضی کشاورزی) را پوشش می‌دهند که بیانگر چالش جدی در سلامت اکولوژیکی و پایداری بهره‌برداری از اراضی کشاورزی منطقه است.

در مقابل، سهم طبقات با روند مثبت در NDVI بسیار کمتر است. طبقه افزایش شدید (Strong Increase) تنها ۶۴/۷کیلومتر مربع (۸ درصد) و طبقه افزایش جزئی

(Slight Increase)حدود ۴۹/۲ کیلومتر مربع (۶ درصد) از سطح اراضی کشاورزی را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق که به رنگ سبز در نقشه نمایان هستند، عمدتاً در نواحی شمالی و پراکنده استان قرار دارند و احتمالاً مرتبط با توسعه باغات در این محدوده هستند. طبقه پایدار (Stable)نیز سهم ناچیزی را دارد و تنها ۵۱/۳ کیلومتر مربع (حدود ۶/۳ درصد) را شامل می‌شود.

مقایسه نتایج حاصل از این مطالعه با مطالعات صورت گرفته در سایر نقاط جهان (بنتو و همکاران، ۲۰۲۰؛ یون و کیم، ۲۰۲۰؛ خان و همکاران، ۲۰۲۵) نشان می‌دهد که فشارهای اقلیمی، مدیریتی و انسانی می‌توانند منجر به افت پیوسته در سلامت پوشش‌گیاهی اراضی زراعی شوند. مطالعه حاضر در استان البرز نیز در چنین بستری از روندهای جهانی جای می‌گیرد و نشان می‌دهد که فشارهای اقلیمی، مدیریتی و انسانی چگونه می‌توانند به افت پیوسته در سلامت پوشش‌گیاهی اراضی زراعی منجر شوند. در عین حال، نواحی دارای روند افزایشی در NDVI می‌توانند به عنوان مناطق الگو مورد بررسی بیشتر قرار گیرند تا عوامل موفقیت آن‌ها شناسایی و در سایر مناطق تعمیم یابد. این اطلاعات می‌تواند برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی در جهت طراحی راهبردهای سازگار با تغییر اقلیم، احیای زمین‌های تخریب‌شده، بهبود بهره‌وری کشاورزی و حفاظت از منابع آبی حیاتی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج این مطالعه، که با بهره‌گیری از داده‌های سری‌زمانی شاخص NDVI و پردازش تصاویر Sentinel-2در بستر Google Earth Engine به‌دست آمده‌اند، زنگ خطر جدی برای آینده کشاورزی در استان البرز به صدا درمی‌آورد. تحلیل‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهند که بیش از ۸۰ درصد از اراضی کشاورزی استان روند کاهشی در شاخص سلامت گیاهی را تجربه کرده‌اند. این کاهش در بسیاری موارد، نه حاصل نوسانات طبیعی، بلکه نتیجه مستقیم فشارهای مدیریتی، بهره‌برداری بیش از ظرفیت منابع و نبود سیاست‌های منسجم در حوزه کاربری اراضی است.

از منظر مدیریتی، چنین روندی بیانگر فرسودگی زیستی زمین‌های کشاورزی است که مستقیماً بر بهره‌وری محصولات، امنیت غذایی منطقه و معیشت روستاییان اثرگذار خواهد بود. ادامه این وضعیت می‌تواند به تسریع در تخلیه جمعیت روستایی، کاهش بازده اقتصادی کشاورزی و افزایش وابستگی به واردات محصولات زراعی منجر شود.

تحلیل فضایی نتایج نشان می‌دهد که کاهش شدید NDVI عمدتاً در مناطق مرکزی و جنوبی استان متمرکز است؛ جایی که فشار توسعه شهری، تغییر کاربری به سکونت و صنعت، و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به شدت بالاست. این الگو نشان دهنده فقدان طرح‌های مدیریت یکپارچه است.

از سوی دیگر، نواحی محدود دارای روند افزایشی NDVI که در مناطق شمالی و ارتفاعات البرز مرکزی قرار دارند، به‌عنوان نمونه‌های موفق تاب‌آوری اکولوژیکی و شاید مدیریتی قابل تحلیل هستند. ممکن است در این مناطق بهره‌گیری از شیوه‌های کشت پایدار، مدیریت منابع آبی کارآمد یا وجود پوشش طبیعی حفاظت‌شده، منجر به بهبود وضعیت سلامت گیاهی شده باشد. استخراج این تجارب و تعمیم آن‌ها به مناطق بحرانی می‌تواند بخشی از برنامه احیای کشاورزی استان باشد.

با توجه به این نتایج، پیشنهادهای مدیریتی زیر مطرح می‌شود:

۱-استقرار سامانه پایش مستمر سلامت گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سامانه‌های برخط به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار برای رصد دوره‌ای پوشش‌گیاهی، تشخیص نقاط بحرانی و اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی.

۲-بازنگری در سیاست‌های تخصیص آب کشاورزی و تمرکز بر افزایش راندمان آبیاری، جلوگیری از برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و آموزش کشاورزان برای استفاده بهینه از منابع.

۳-توسعه طرح‌های مدیریت تلفیقی زمین مانند اجرای طرح‌های جامع برای مدیریت کاربری اراضی به‌گونه‌ای که

بین کشاورزی، توسعه شهری و منابع طبیعی توازن برقرار شود.

۴-احیای اراضی تخریب‌شده و مشوق‌های زیست‌محیطی برای بازگرداندن سلامت اکولوژیکی اراضی در کلاس‌های "کاهش شدید"، همراه با مشوق‌هایی برای کشاورزان به‌منظور اجرای کشاورزی پایدار.

۵-افزایش تاب‌آوری مناطق سبز باقی‌مانده با هدف حفظ "هسته‌های سبز" در سیستم اکولوژیکی استان.

فهرست منابع

۱. خوارزمی، رسول، محمداسماعیل،زهرا، چترنور، منصور، ۱۴۰۳. تعیین دامنه تغییرکاربری اراضی استان البرز با استفاده از داده‌های راداری و نوری سنتینل در سامانه گوگل ارث انجین، *مدیریت اراضی*، ۱۲(۲)، ۱۰۲-۸۹.

۲. شبانی پور، مهرنوش، درویش صفت، علی اصغر، رحمانی، رامین. ۱۳۹۸. تحلیل روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانیMODIS-NDVI مطالعهٔ موردی: استان کردستان، نشریه جنگل و فرآورده های چوب، ۷۲(۳)، ۲۰۴-۱۹۳.

3. Ahmadi, M., Ghasemi, A., Jafari, R. 2022. Monitoring urban expansion impacts on vegetation health in peri-urban areas of Iran using Sentinel-2 and EVI. *Journal of Applied Remote Sensing*, 16(3), 034502.
4. Bahrami, M., Sarmadian, F., & Pazira, E. 2024. Integrating AHP (Analytic Hierarchy Process) and GIS (Geographic Information System) for precision land use planning and ecological capacity assessment in Alborz Province, Iran. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, *64*, 48–67.
5. Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A., 1995. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, *13*(1-2), pp.95-120.
6. Baret, F. and Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote sensing of environment*, *35*(2-3), pp.161-173.
7. Bento, V.A., Gouveia, C.M., DaCamara, C.C., Libonati, R. and Trigo, I.F., 2020. The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and Planetary Change*, *190*, p.103198.
8. Candra, D.S., Phinn, S. and Scarth, P., 2020. Cloud and cloud shadow masking for Sentinel-2 using multitemporal images in global area. *International Journal of Remote Sensing*, *41*(8), pp.2877-2904.
9. Chen, Y., Wang, J., & Li, X. (2023). Assessing the impact of land use change on ecosystem services using Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 286, 113445.
10. Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F. and Yan, Y., 2018. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, *146*, pp.124-136.
11. Fakhri, S. A., Latifi, H., & Mohammadi, J. (2022). Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improved forest health monitoring. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100678. Fu, Y., Huang, J., & Zhang, X. (2020). Assessing the impact of urbanization on vegetation cover using Landsat-based NDVI in agricultural regions. *Journal of Environmental Management*, 268, 110658.
12. Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A. and Languille, F., 2017. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sensing*, *9*(6), p.584.
13. Giovos, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N. and Priovolou, A., 2021. Remote sensing vegetation indices in viticulture: A critical review. *Agriculture*, *11*(5), p.457.
14. Hu, Y., Raza, A., Syed, N.R., Acharki, S., Ray, R.L., Hussain, S., Dehghanisanij, H., Zubair, M. and Elbeltagi, A., 2023. Land use/land cover

change detection and NDVI estimation in Pakistan's Southern Punjab Province. *Sustainability*, *15*(4), p.3572.

15. Jiang, L., Liu, Y., Wu, S. and Yang, C., 2021. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data. *Ecological indicators*, *129*, p.107933.
16. Kharazmi, R., MohammadEsmail, Z., Chatrenour, M. (2025). 'Using Sentinel radar and optical data in the Google Earth Engine platform to determine the extent of land use changes in Alborz Province', *Land Management Journal*, 12(2), pp. 89-102
17. Kumar, P., Sahani, R., & Kumar, S. (2021). Impact of land use change on soil moisture and vegetation health using NDWI and Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 125, 107539.
18. Lan, S., & Dong, Z. (2022). Incorporating Vegetation Type Transformation with NDVI Time-Series to Study the Vegetation Dynamics in Xinjiang. *Sustainability*, *14*(1), 582.
19. Liu, X., Zhang, Y., & Wang, L. (2021). Evaluating the effectiveness of farmland protection policies using MODIS and VHI. *Land Use Policy*, 108, 105584
20. Louis, J., Pflug, B., Main-Knorn, M., Debaecker, V., Mueller-Wilm, U., Iannone, R.Q., Cadau, E.G., Boccia, V. and Gascon, F., 2019, July. Sentinel-2 global surface reflectance level-2A product generated with Sen2Cor. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 8522-8525). IEEE.
21. Maxwell, A.E., Warner, T.A. and Fang, F., 2018. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *International journal of remote sensing*, *39*(9), pp.2784-2817.
22. Nikpour, N., Negaresh, H., Fotoohi, S., Hosseini, S. Z., & Bahrami, S. (2019). Monitoring the trend of vegetation changes one of the most important indicators of land degradation (in Ilam province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(4), 21-48.
23. Nikpour, N., Negaresh, H., Fotoohi, S., Hosseini, S.Z. and Bahrami, S., 2019. Monitoring the trend of vegetation changes one of the most important indicators of land degradation (in Ilam province).
24. Nuthammachot, N., Askar, A., Stratoulias, D. and Wicaksono, P., 2022. Combined use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improving above-ground biomass estimation. *Geocarto International*, *37*(2), pp.366-376.
25. Pandey, P.C. and Sharma, L.K. eds., 2021. *Advances in remote sensing for natural resource monitoring*. John Wiley & Sons.
26. Park TaeJin, P.T., Chen Chi, C.C., Macias-Fauria, M., Tømmervik, H., Choi SungHo, C.S., Winkler, A., Bhatt, U.S., Walker, D.A., Piao ShiLong, P.S., Brovkin, V. and Nemani, R.R., 2019. Changes in timing of seasonal peak photosynthetic activity in northern ecosystems.
27. Raiyani, K., Gonçalves, T., Rato, L., Salgueiro, P. and Marques da Silva, J.R., 2021. Sentinel-2 image scene classification: A comparison between Sen2Cor and a machine learning approach. *Remote Sensing*, *13*(2), p.300.
28. Rezaei, H., Mehrabi, B., Khanmirzaee, A. and Shahbazi, K., 2021. Arsenic heavy metal mapping in agricultural soils of Alborz province, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Ch Khan, A., Alamgir, A. and Fatima, N., 2025. Spatiotemporal analysis of land use and land cover changes, LST and NDVI in Thatta district, Sindh, Pakistan. Kuwait Journal of Science, 52(1), p.100326. emistry*, *101*(1), pp.127-139.
29. Thenkabail, P. S., & Lyon, J. G. (2020). Advances in remote sensing for agriculture and natural resource management. *Remote Sensing*, 12(24), 4032.

30. West, H., Quinn, N. and Horswell, M., 2019. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sensing of Environment*, *232*, p.111291.
31. Yoon, H. and Kim, S., 2020. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *166*, pp.201-212.
32. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, Linlin, Tsendbazar, N.E., Ramoino, F., Arino, O., 2021. ESA WorldCover 10 m 2020 v100
33. Zekoll, V., Main-Knorn, M., Alonso, K., Louis, J., Frantz, D., Richter, R. and Pflug, B., 2021. Comparison of masking algorithms for sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, *13*(1), p.137.
34. Zhang, X., Chen, N., Li, J., & Chen, Z. (2020). Multi-sensor integrated framework for vegetation health monitoring using machine learning. *Remote Sensing*, 12(15), 2456.
35. Zhen, Z., Chen, S., Qin, W., Yan, G., Gastellu-Etchegorry, J.P., Cao, L., Murefu, M., Li, J. and Han, B., 2020. Potentials and limits of vegetation indices with brdf signatures for soil-noise resistance and estimation of leaf area index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *58*(7), pp.5092-5108.
36. Zhen, Z., Chen, S., Qin, W., Yan, G., Gastellu-Etchegorry, J.P., Cao, L., Murefu, M., Li, J. and Han, B., 2020. Potentials and limits of vegetation indices with brdf signatures for soil-noise resistance and estimation of leaf area index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *58*(7), pp.5092-5108.