

Evaluation of Soil Spectral Indices and Surface Albedo in Desertification Monitoring of Western Khuzestan Province using Remote Sensing Data

Abiyat, M.¹  | Abiyat, M.²   | Abiyat, M.² 

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2. Department of Human Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

Corresponding Author E-mail: mostefa.abiyat@gmail.com

(Received: 24 Dec 2024, Revised: 13 July 2025, Accepted: 18 Oct 2025, Published online: 16 Dec 2025)

Summary

Desertification is a form of land degradation, resulting from both natural processes and human activities. In this regard, the use of remote sensing indicators to prepare desertification maps can be an efficient approach to assess this process. The goal of this study is to evaluate the potential of soil spectral indices and surface albedo in modeling desertification intensity in the western Khuzestan Province. Initially, we extracted indices including BSI, BI, SI, IFe2O3, NSMI, TGSI, CLI, CI, SCI, and Albedo from Landsat 8 satellite images. Then, soil spectral indices were calculated using the band calculation tool available in ENVI software, and raster maps of these indices were generated. To create feature space models and identify correlations between the variables, we also extracted the surface albedo index values from the satellite images.

The maximum and minimum values of surface albedo index were 37518.1 and 8338.75, respectively. Next, we randomly selected spectral values from 753 locations on the soil spectral index map and extracted their corresponding values from the surface albedo index map. To ensure comparability, the index values were standardized through data normalization. After normalization, scatter plots of the spectral pixel value densities were generated in the SAGA 9.5 software environment, and best-fit line equations were determined. Linear regression analysis was then conducted to examine the correlation between the soil spectral indices and Albedo.

In this study, all soil spectral indices were considered independent variables, while the surface albedo index was treated as the dependent variable. Desertification intensity was classified by dividing the feature space perpendicular to the trend of desertification change. Subsequently, the Jenks Natural Breaks method was applied to classify the data values into five desertification classes: areas without desertification, areas with low desertification intensity, areas with moderate desertification intensity, areas with high desertification intensity, and areas with very high desertification intensity.

The results of the correlation analysis of the indices show that the BSI, BI, SI, NSMI, TGSI, CLI, and SCI indices are positively correlated with the Albedo index; so with the increase in the BSI, BI, SI, NSMI, TGSI, CLI, and SCI indices, the Albedo variable also increases. While the IFe2O3 and CI indices were negatively correlated with the Albedo index, such that an increase in IFe2O3 and CI indices resulted in a reduction of the Albedo variable. An analysis of the correlation coefficients between the indices revealed that the BI, SI, and TGSI indices exhibited the strongest correlation with the Albedo index, with correlation coefficients of 0.985, 0.909, and 0.850, respectively. Conversely, the IFe2O3, CLI, and NSMI indices showed the weakest correlation with the Albedo index, with correlation coefficients of -0.026, 0.106, and 0.110, respectively. Therefore, the Albedo-BI, Albedo-SI, and Albedo-TGSI models, due to their highest correlations with the variables, were considered suitable criterion for evaluating and classifying desertification in the region, given its rather arid climate.

Following the classification of desertification intensity, the accuracy of the Albedo-BI, Albedo-SI, and Albedo-TGSI feature space models was assessed using the error matrix, overall accuracy, and the kappa coefficient. The Albedo-BI model achieved an overall accuracy of 98.23% and a kappa coefficient of 0.97; the Albedo-SI model yielded 94.45% accuracy and a kappa value of 0.92; and the Albedo-TGSI model recorded 90.50% accuracy with a kappa coefficient of 0.86. These results indicate that the Albedo-BI model provides the highest classification accuracy among the three models. Furthermore, analysis of the models suggests that the eastern parts of the study area exhibit higher desertification intensity than the western regions.

Keywords: Desertification Intensity, Surface Albedo, Remote Sensing, Landsat-8, Feature Space, Khuzestan.

Cite this article: Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2025). Evaluation of Soil Spectral Indices and Surface Albedo in Desertification Monitoring of Western Khuzestan Province using Remote Sensing Data. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(3), 593- 611. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.386172.1007647>

E-mail: (1) m.abiat20@gmail.com (2) morteza.abiyat@yahoo.com



© Authors Retain the Copyright and Full Publishing Rights.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.386172.1007647>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

ارزیابی شاخص‌های طیفی خاک و سپیدایی سطحی در پایش بیابان‌زایی در غرب استان خوزستان با استفاده از داده‌های سنجنش از دور

محمد عیبات^۱ | مصطفی عیبات^۲ | مرتضی عیبات^۲

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. گروه جغرافیای انسانی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: mostefa.abiyat@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۴، بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۲۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۷/۲۶، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۹/۲۵)

چکیده

بیابان‌زایی نوعی تخریب اراضی در اثر فرایندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی است. داده‌های سنجنش از دور، ابزار مهمی در نقشه‌برداری و پایش بیابان‌زایی به‌شمار می‌روند. هدف این پژوهش، ارزیابی پتانسیل شاخص‌های طیفی خاک و سپیدایی (Albedo) در بررسی وضعیت بیابان‌زایی در غرب استان خوزستان می‌باشد. ابتدا، شاخص‌های SCI ، CI ، CLI ، $TGSI$ ، $NSMI$ ، IFe_2O_3 ، SI ، BI ، BSI و شاخص سپیدایی از تصویر ماهواره لندست ۸ استخراج شده و دامنه مقادیر شاخص‌ها نرمال‌سازی شد. سپس، مدل‌های فضای ویژگی بر اساس همبستگی بین متغیرها در نرم‌افزار SAGA 9.5 ساخته شد. در مرحله بعد، طبقه‌بندی شدت بیابان‌زایی با تقسیم فضای ویژگی در جهت قائم بر روند تغییرات بیابان‌زایی صورت گرفت. در نهایت، نقشه‌های به‌دست آمده با استفاده از روش شکست طبیعی به پنج درجه بیابان‌زایی طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که شاخص سپیدایی با شاخص‌های SCI ، CI ، $TGSI$ ، $NSMI$ ، SI ، BI ، BSI و همبستگی مثبت و با شاخص‌های IFe_2O_3 و CI همبستگی منفی دارد. شاخص‌های $TGSI$ و SI ، BI به‌ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۹۸۵، ۰/۹۰۹ و ۰/۸۵۰، بیشترین ارتباط را با شاخص سپیدایی داشته‌اند. بیشترین مساحت منطقه در دو مدل $Albedo-SI$ و $Albedo-BI$ در کلاس شدت متوسط بیابان‌زایی و در مدل $Albedo-TGSI$ در کلاس شدت زیاد بیابان‌زایی قرار گرفته است. نقشه مدل فضای ویژگی $Albedo-BI$ بیشترین دقت را در تفکیک طبقات بیابان‌زایی در منطقه داشته است. بررسی بصری نقشه مدل $Albedo-BI$ نیز نشان داد که بخش‌های شرقی منطقه، دارای شدت بیابان‌زایی بیشتری نسبت به قسمت‌های غربی هستند.

واژه‌های کلیدی: شدت بیابان‌زایی، سنجنش از دور، لندست ۸، فضای ویژگی، خوزستان.

۱. مقدمه

تخریب گیاهان (شن و همکاران، ۲۰۲۲) می‌شود. بنابراین، اگر به‌طریقی بتوان تغییرات ایجادشده در خاک را مورد ارزیابی قرار داد، شدت بیابانی شدن منطقه مشخص می‌شود (جعفری و همکاران، ۱۳۸۵).

پایش سنتی بیابان‌زایی در درجه اول به اندازه‌گیری‌های میدانی متکی است، اما جمع‌آوری داده‌ها نسبتاً چالش‌برانگیز است. در نتیجه، این روش دقت بالایی داشته، اما کارایی آن پایین است و آن را برای پایش بیابان‌زایی در مقیاس بزرگ، نامناسب می‌کند. در حال حاضر، ترکیب فناوری سنجنش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای دستیابی سریع به تصاویر در

بیابان‌زایی یک فرایند پیچیده تخریب سطح زمین است که توسط تأثیر متقابل بین تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در سرزمین‌های خشک ایجاد می‌شود (مینگ و همکاران، ۲۰۲۴). این پدیده در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران از میزان بالایی برخوردار است (خسروی و همکاران، ۲۰۱۴). پدیده بیابان‌زایی با مشکلات ناشی از آن، بیشترین نمود عینی خود را بر خاک به‌جا می‌گذارد (جعفری و همکاران، ۱۳۸۵). شوری و قلیایی‌بودن خاک باعث تخریب ساختار خاک و در نتیجه کاهش بهره‌وری می‌شود (جعفری و همکاران، ۲۰۱۱). بیابان‌زایی منجر به فرسایش خاک (فریرا و همکاران، ۲۰۲۲) و

و Albedo-TGSI را برای سه منطقه جغرافیایی بر اساس ویژگی‌های پوشش گیاهی ساختند. آنها همچنین یک سیستم طبقه‌بندی بیابان‌زایی با شش سطح ایجاد کردند و محصولات داده‌های بیابان‌زایی را با وضوح ۳۰ متر به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی به دقت طبقه‌بندی کلی ۸۵/۲۱ دست یافته است که می‌تواند اطلاعات مناسبی در مورد بیابان‌زایی در مناطق وسیع و محیط‌های جغرافیایی پیچیده استخراج کند.

هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) به موضوع شور شدن اراضی که یکی از رایج‌ترین فرایندهای تخریب زمین است، در شهرستان تونگیو در شمال شرقی کشور چین پرداختند. آنها مدل‌های فضای ویژگی Albedo-SI و MSAVI-SI را به‌ترتیب با در نظر گرفتن اطلاعات خاک لخت و پوشش گیاهی ساختند و این مدل‌ها را با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های فضای ویژگی برای استخراج اطلاعات شوری قابل استفاده هستند و مدل Albedo-SI ممکن است سطوح شوری زمین را با دقت بالاتر ارزیابی کند.

در ایران، هاشم گلوگردی و همکاران (۱۴۰۰) از مدل فضای ویژگی TGSI-Albedo در ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی در مرکز استان خوزستان استفاده کردند. نتایج نشان داد که حدود ۷۰ درصد از منطقه در درجه بیابان‌زایی شدید و ۱۸/۳، ۸/۳ و ۴/۱ درصد به‌ترتیب در درجات بیابان‌زایی متوسط، کم و بدون بیابان‌زایی قرار دارند. دقت نقشه تولیدشده با ضریب کاپا ۹۲/۱ درصد و دقت کلی ۹۴/۳ درصد نشان داد که مدل فضای ویژگی، ابزاری مفید و قوی برای استخراج درجات بیابان‌زایی در زمین‌های بایر یا مناطق با پوشش گیاهی بسیار کم است. پویان و همکاران (۱۳۹۷) برآورد سپیدایی سطح زمین در رخصاره‌های ژئومورفولوژی دشت یزد-اردکان با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره لندست ۸ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین مقدار سپیدایی در رخصاره‌های متفاوت و دیگر پوشش سطح زمین، اختلاف وجود دارد. مطابق با میانگین سپیدایی سطح زمین در رخصاره‌های مختلف، سپیدایی در فصل تابستان نسبت به زمستان بیشتر است. علت این امر می‌تواند به تأثیر زاویه تابش، تغییر ارتفاع خورشید در طول روز، دانست. همچنین، مناطق غرب و مرکز کشور دارای بیشترین و مناطق شمال و

مقیاس بزرگ، شناسایی سریع مناطق بیابان‌زایی و ارزیابی درجه بیابان‌زایی مؤثر است (لیو و همکاران، ۲۰۲۴). کاربردهای سنجش از دور برای ارزیابی و پایش تخریب اراضی، عمدتاً به بازتاب طیفی خاک و پوشش گیاهی مربوط می‌شود (ژئو و همکاران، ۲۰۰۹). از سوی دیگر، کاهش پوشش گیاهی و زیست‌توده با تخریب خاک در ارتباط است که منجر به افزایش سپیدایی سطحی (Surface Albedo) می‌شود (کوردیرو و همکاران، ۲۰۱۵).

شاخص‌های سنجش از دور به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف تحقیقات علوم‌زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴a). از جمله این شاخص‌ها، NDVI (شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده)، MSAVI (شاخص پوشش گیاهی اصلاح‌شده خاک)، LST (دمای سطح زمین)، TGSI (شاخص اندازه دانه خاک سطحی) و سپیدایی (Albedo) هستند (مین و همکاران، ۲۰۲۱). شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) و سپیدایی سطح زمین، از پارامترهای بیوفیزیکی بسیار مهم سطح زمین هستند (زنک و همکاران، ۲۰۰۶). استخراج متغیرهای ویژگی می‌تواند به‌طور مؤثری بیابان‌زایی را پایش کند. مدل فضای ویژگی می‌تواند به‌طور مؤثری بر این کاستی‌ها غلبه کنند، زیرا می‌تواند روابط بین پارامترهای ویژگی مختلف را در نظر بگیرد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴b).

پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد شاخص‌های سنجش از دور در بررسی بیابان‌زایی در ایران و جهان انجام شده است. مدل فضای ویژگی Albedo-NDVI پیشنهادشده توسط زنک و همکاران (۲۰۰۶) به دلیل اصول ساده و اجرای آسان آن، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (گوو و همکاران، ۲۰۲۲؛ دینگ و زینگ‌مینگ، ۲۰۲۱). بعدها، برخی از محققان تأثیر پس‌زمینه خاک را بر شاخص NDVI در نظر گرفتند و از شاخص MSAVI به جای شاخص NDVI استفاده کرده و مدل فضای ویژگی Albedo-MSAVI را پیشنهاد کردند (ون و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهشی دیگر، وی و همکاران (۲۰۲۰) یک روش استخراج اطلاعات بیابان‌زایی در امتداد راه‌آهن چین-مغولستان را با استفاده از فضاهای ویژگی چندمنبعی و مدل‌سازی منطقه‌بندی جغرافیایی پیشنهاد کرده‌اند. این محققان، مدل‌های فضایی ویژگی Albedo-MSAVI، Albedo-NDVI

شمال غرب کشور دارای کمترین سپیدایی هستند. بیشترین مقادیر سپیدایی به دست آمده از داده‌های رقومی OLI، به ترتیب در رخصاره‌های اراضی رسی بدون پوشش، اراضی رسی با پوشش، اراضی بایر، تپه ماسه‌ای بدون مالچ، پهنه ماسه‌ای، تپه ماسه‌ای مالچ‌پاشی شده، پوشش سطحی آسفالت، اراضی زراعی و سنگفرش بیابان دیده شده است. می‌توان دریافت که ارتباط تنگاتنگی بین عناصر اقلیمی و مقدار سپیدایی وجود دارد. کربلایی درئی و همکاران (۱۴۰۰) رفتار زمانی-مکانی سپیدایی روشن در ایران با استفاده از داده‌های ترکیبی سپیدایی سنجده مودیس ترا-آکوا در بازه زمانی ۱۳۷۸-۱۳۹۸ مورد بررسی قرار دادند. تغییرات زمانی-مکانی مقادیر سپیدایی روشن با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی واکاوی شد. نتایج نشان داد که سه مؤلفه اصلی قادر به تبیین ۹۷/۷ درصد از پراش داده هاست. واکاوی مکانی سپیدایی روشن حاکی از آن است که سپیدایی‌های بالاتر از میانگین در نواحی مرتفع و کوهستانی ایران، همچون رشته کوه‌های زاگرس و البرز، ارتفاعات شمال غرب کشور مانند قله‌های سیلان و سهند وجود دارد که در ارتباط با پوشش برفی است. بنابراین، مؤلفه اول پوشش برفی نام گذاری شد. در مؤلفه دوم سپیدایی در سه فصل بهار، تابستان، و پاییز برابر است. واکاوی مکانی مؤلفه دوم نشان داد سپیدایی‌های بالاتر از میانگین در ارتباط با پوشش نمکی است. بنابراین، مؤلفه دوم پوشش نمکی نام گذاری شد. واکاوی تغییرات زمانی سپیدایی در مؤلفه سوم حاکی از آن است که سپیدایی‌های بالاتر از میانگین در برف‌خوان‌ها است. در نتیجه، مؤلفه سوم برف‌خوان نام گذاری شد. در مطالعه‌ای دیگر، ذوالفقاری و عبداللهی (۱۴۰۱) شدت بیابان‌زایی را بر اساس شاخص‌های Albedo، TGSi و NDVI در دو منطقه سوران و زابل در سیستان و بلوچستان با استفاده از تصاویر سنتینل-۲ تعیین کردند. نتایج نشان داد که رابطه بین دو شاخص TGSi و Albedo قوی‌تر از رابطه بین NDVI و Albedo بود و در منطقه ضریب همبستگی بالاتر بود. رابطه بین شاخص‌های TGSi و Albedo، ویژگی‌های فضایی مناطق عاری از پوشش گیاهی و همچنین مناطق با پوشش گیاهی بسیار کم را برای تعیین شدت بیابان‌زایی بهتر نشان می‌دهد.

بیابان‌های ایران وسعتی نزدیک به ۴۷ میلیون هکتار از

اراضی مرکز، جنوب و شرق کشور را به خود اختصاص داده است (جابری و خسروی پور، ۱۳۹۵). استان خوزستان با دارا بودن بیش از ۱۲۷۵۵۰۰ هکتار اراضی بیابانی (پاینده و همکاران، ۱۳۹۷) از حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین مناطق کشور به مسئله بیابان‌زایی است (حیبی و همکاران، ۱۳۹۲). سیمای طبیعی و منابع خدادادی در اقصی نقاط استان خوزستان، به دلیل عوامل تأثیرگذار منفی و تخریب‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند چرای دام، تأمین سوخت و فعالیت‌های مربوط به ساخت و ساز انواع سدها و فقدان استفاده اصولی از منابع آبی و البته عوامل طبیعی مانند خشکسالی‌ها، افزایش دما و تغییرات اقلیمی، دستخوش تغییرات شدید شده و با کاهش پوشش گیاهی سبب گسترش روزافزون مناطق بیابانی شده است (دیناروند و همکاران، ۱۳۹۷). توزیع فضایی گرد و غبار به صورت فصلی و سالانه نیز نشان می‌دهد که بیشترین روزهای گرد و غبار در همه فصول مربوط به نیمه غربی استان است (احدی و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین، هدف این مطالعه، ارزیابی پتانسیل شاخص‌های طیفی سنجش از دور در تعیین وضعیت بیابان‌زایی در غرب استان خوزستان می‌باشد. در مقایسه با مطالعات قبلی که اغلب بر شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر NDVI تمرکز داشته‌اند، این مطالعه برای اولین بار به کارگیری مجموعه‌ای جامع از شاخص‌های طیفی خاک و تحلیل روابط آنها با متغیر سپیدایی در مدل‌های فضای ویژگی مبتنی بر همبستگی، رویکردی جامع و چند معیاره را برای پایش بیابان‌زایی در منطقه غرب خوزستان با دقت بی‌سابقه‌ای توسعه داده است.

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت حدود ۶۴۱۲۹۱ هکتار و موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه، ۳ دقیقه و ۱۲ ثانیه تا ۴۸ درجه، ۲۴ دقیقه و ۳۶ ثانیه طول شرقی و ۳۲ درجه، ۳۰ دقیقه و ۴۵ ثانیه تا ۳۱ درجه، ۱۷ دقیقه و ۳۵ ثانیه عرض شمالی در غرب استان خوزستان و جنوب غربی ایران قرار دارد (شکل ۱). رودخانه کرخه مهم‌ترین رودخانه منطقه به‌شمار می‌آید (مال‌امیری و همکاران، ۲۰۲۲).

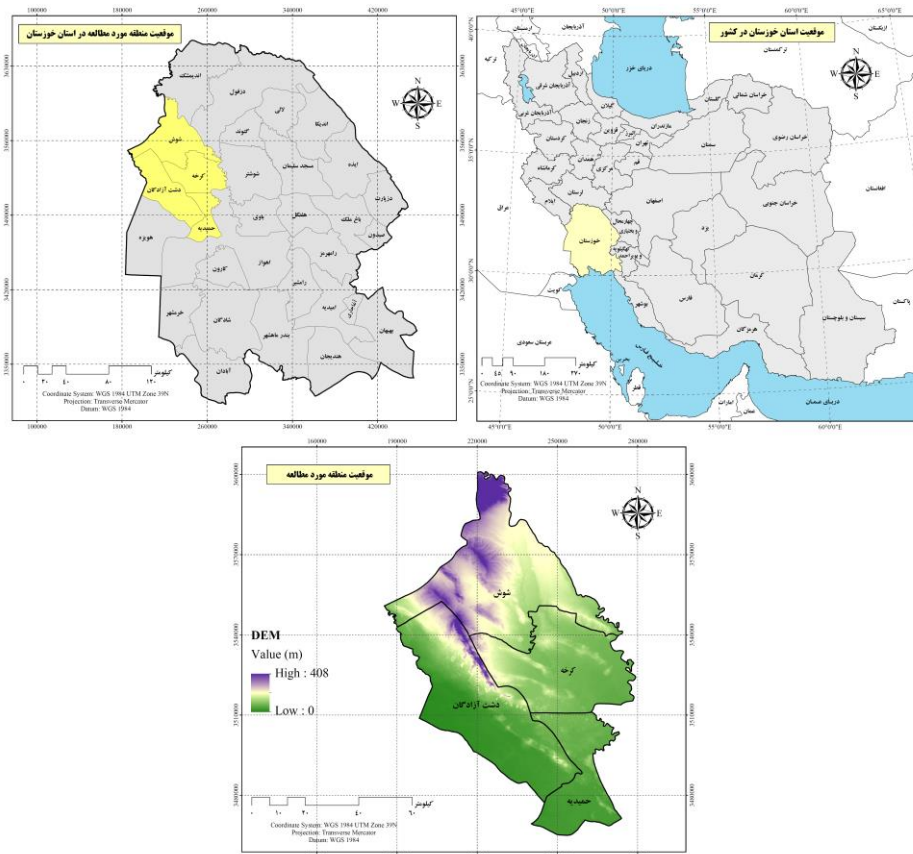
هندسی تصویر از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شد و مختصات چند نقطه کنترل از آن استخراج شد. تصحیحات اتمسفری، با روش تفریق شیء تاریک در نرم‌افزار ENVI 5.6 انجام شد. این روش، به دلیل کارایی و سادگی آن شناخته شده و برای تحقیقات مختلف سنجش از دور بیوفیزیکی استفاده می‌شود (ویکاکسونو و هافیزت، ۲۰۱۷). مهم‌ترین محدودیت روش تفریق شیء تاریک (DOS) در مناطق خشک با استفاده از تصاویر لندست ۸، نبود سطوح تاریک کافی (مانند آب عمیق یا پوشش گیاهی انبوه) برای تخمین دقیق اثرات جوی است. در این مناطق، بازتابش بالای خاک‌های خشک و سطوح معدنی باعث می‌شود که شناسایی پیکسل‌های تاریک با اطمینان پایین انجام شود و در نتیجه، تصحیح جوی با خطا همراه باشد. همچنین، غلظت بالای آئروسول‌ها (ذرات گرد و غبار) در مناطق خشک، اثرات پیچیده‌ای بر روی باندهای مرئی و مادون قرمز ایجاد می‌کند که روش ساده DOS قادر به پردازش صحیح آن نیست (چاوز، ۱۹۹۶؛ سونگ و همکاران، ۲۰۰۱).

این منطقه دارای آب‌وهوای گرم و خشک بیابانی است (نصیری، ۲۰۰۵). خاک‌های منطقه از رده‌های اینسپتی‌سول، انتی‌سول و اریدی‌سول بوده که دارای رژیم حرارتی هائپرترمیک و رژیم‌های رطوبتی یوستیک و اریدیک می‌باشند. بخش بزرگی از منطقه را زمین‌های تپه‌ای، بدلندها و اراضی باتلاقی تشکیل می‌دهد.

۲-۲. روش پژوهش

۲-۲-۱. منابع داده و پیش‌پردازش داده‌ها

برای دستیابی به اهداف این مطالعه، تصویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ در تاریخ ۸ ژوئیه ۲۰۲۳ به شماره گذر ۱۶۶ و ردیف ۳۸ با باند طیفی از سایت USGS (earthexplorer.usgs.gov) تهیه شد (جدول ۱). برای حذف اثر هرگونه پوشش گیاهی ناخواسته که ممکن است به صورت موقت در فصول بارندگی ایجاد شود و برای افزایش کارایی شاخص‌های انتخاب‌شده (هاشم گلوگردی و همکاران، ۱۴۰۰) زمان اخذ تصویر در تیر ماه انتخاب شد. برای بررسی دقت



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان خوزستان.

جدول ۱. باندهای طیفی سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ (دنگ و همکاران، ۲۰۱۵).

شماره	باند	طول موج (میکرومتر)	توان تفکیک مکانی (متر)	توان تفکیک رادیومتریکی (بیت)
۱	Coastal aerosol	۰/۰-۰/۰۵۳/۰/۰۴۳۳	۳۰	۱۲
۲	Blue	۰/۰-۰/۰۵۱۵/۰/۰۴۵۰	۳۰	۱۲
۳	Green	۰/۰-۰/۰۶۰۰/۰/۰۵۲۵	۳۰	۱۲
۴	Red	۰/۰-۰/۰۶۸۰/۰/۰۶۳۰	۳۰	۱۲
۵	Near Infrared	۰/۰-۰/۰۸۸۵/۰/۰۸۴۵	۳۰	۱۲
۶	SWIR 1	۱/۱-۱/۱۶۶۰/۱/۰۵۶۰	۳۰	۱۲
۷	SWIR 2	۲/۲-۲/۳۰۰/۲/۰۱۰۰	۳۰	۱۲
۸	Panchromatic	۰/۰-۰/۰۶۸۰/۰/۰۵۰۰	۱۵	۱۲
۹	Cirrus	۱/۱-۱/۳۹۰/۱/۰۳۶۰	۳۰	۱۲

۲-۲-۲. شاخص‌های طیفی خاک

در اکثر موارد، ارزیابی وضعیت زمین بر اساس بازتاب طیفی پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های چندطیفی پوشش گیاهی بوده است. با این حال، بیشتر شاخص‌های پوشش گیاهی که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، مانند شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی چند ساله غالب است، کمتر مؤثر هستند (جعفری و همکاران، ۲۰۰۸). به علاوه، محیط‌های خشک به‌طور جدی رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ژئو و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، این شاخص‌ها درجه واقعی بیابان‌زایی را اشتباه تفسیر می‌کنند (شیائو و همکاران،

۲۰۰۶). برای ارزیابی وضعیت تخریب خاک به‌عنوان شاخصی که تحت تأثیر بیابان‌زایی است، باید شاخص‌های مربوط به خاک را در نظر گرفت (جعفری و همکاران، ۲۰۱۱). شاخص‌های طیفی مختلفی برای ارزیابی ویژگی‌های مختلف خاک از داده‌های بازتاب طیفی ابداع شده که قادر به تخمین خواص مختلف به‌طور کاملاً دقیق هستند (کائور و همکاران، ۲۰۲۰). مبنای استفاده از این شاخص‌ها، تغییرپذیری ویژگی‌های طیفی بر اساس متغیر بودن خصوصیات خاک است (رحمانی سیالرز و کشاورزی، ۱۴۰۲). در این مطالعه، تعدادی از شاخص‌های طیفی مستخرج از تصویر ماهواره‌ای، برای بررسی وضعیت خاک در منطقه استفاده شد (جدول ۲).

جدول ۲. شاخص‌های طیفی خاک مورد استفاده در تحقیق.

نام شاخص	معادله	منبع
شاخص خاک لخت (Bare Soil Index)	$BSI = [(SWIR2+R)-(NIR+B)] / [(SWIR2+R)+(NIR+B)]$	دیک و همکاران، ۲۰۱۷
شاخص روشنایی (Brightness Index)	$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2}$	سینگ، ۲۰۲۲
شاخص شوری (Salinity Index)	$SI = \sqrt{B \times R}$	خان و همکاران، ۲۰۰۵
شاخص اکسیدهای آهن (Iron Oxide Index)	$IFe_2O_3 = R/NIR$	گوئو و ون، ۲۰۲۰
شاخص رطوبت خاک نرمال شده (Normalized Soil Moisture Index)	$NSMI = (SWIR1 - SWIR2) / (SWIR1 + SWIR2)$	دای نگوین و همکاران، ۲۰۲۱
شاخص اندازه ذرات سطحی (Topsoil Grain Size Index)	$TGSI = (R-B) / (R+G+B)$	شیائو و همکاران، ۲۰۰۶
شاخص رس (Clay index)	$CLI = SWIR1 / SWIR2$	گسمی و همکاران، ۲۰۲۲
شاخص پوسته خاک (Crust Index)	$CI = 1 - [(R-B) / (R+B)]$	کارنیللی، ۱۹۹۷
شاخص رنگ خاک (Soil Color Index)	$SCI = (R-G) / (R+G)$	حباشی و همکاران، ۲۰۱۷

که سپیدایی می‌تواند به‌عنوان شاخص فیزیکی مهم برای نشان دادن بیابان‌زایی باشد (لینگ، ۲۰۰۱؛ عیبات و همکاران، ۱۴۰۲). این پارامتر دارای تغییرات مکانی و فصلی است که وابستگی زیادی با تغییرات درخشندگی خورشید، رشد گیاهان و فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، شهرسازی، تغییر کاربری اراضی و... دارد (هی، ۲۰۱۲). سپیدایی پتانسیل نظارت بر تغییرات عملکرد اکوسیستم در مناطق خشک را دارد و هشدار را در مورد آغاز بیابان‌زایی ارائه می‌دهد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۸). به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش سپیدایی نشان‌دهنده تخریب زمین و کاهش آن ممکن است نشان‌دهنده بهبود زمین باشد (جئنا و همکاران، ۲۰۰۰). در این پژوهش، مقدار سپیدایی از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\text{Albedo} = 0.356B + 0.13R + 0.373\text{NIR} + 0.085\text{SR1} + 0.072\text{SR2} - 0.0018 \quad (1)$$

در این رابطه، B، R، NIR، SR1 و SR2 به ترتیب با مقادیر بازتابی آبی، قرمز، مادون قرمز نزدیک، باند مادون قرمز موج کوتاه ۱ و باند مادون قرمز موج کوتاه ۲ در تصویر سنجنده OLI مطابقت دارند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-۲-۴. نرمال‌سازی داده‌ها

قبل از انجام هر گونه تحلیل همبستگی، داده‌های ورودی نرمال‌سازی شدند تا فشرده‌تر شوند، تغییر متغیر داخلی کاهش یابد، نرخ یادگیری بالاتر بدون خطر واگرایی افزایش یابد و سرعت محاسبات افزایش پیدا کند (سوارز-الورز و همکاران، ۲۰۱۲). در این پژوهش، داده‌های ورودی با استفاده از رابطه ۲ (ساجیکومار و تهانداسوارا، ۱۹۹۹) نرمال‌سازی شدند:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

در این رابطه، X_{norm} مقدار نرمال شده، X مقدار مشاهده شده، $X_{\max}$ و $X_{\min}$ به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر داده‌های مشاهده شده هستند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۷).

۲-۲-۵. ساخت فضای ویژگی طیفی

مدل فضای ویژگی، در اصل یک سیستم فضایی متشکل از دو یا چند شاخص معمول است که برای تشخیص ویژگی‌های

شاخص خاک لخت (BSI) هم با سنجش از دور مستقیم خصوصیات خاک و هم با بیابان‌زایی ارتباط دارد، در حالی که شاخص روشنائی (BI) به‌طور خاص از نظارت بر شوری خاک پشتیبانی می‌کند (چن و همکاران، ۲۰۲۵). شاخص شوری (SI) که ترکیبی از باندهای آبی و قرمز است، به بازتاب سطحی زمین‌های تحت تأثیر نمک با پوشش گیاهی پراکنده حساس است (دوآوی و همکاران، ۲۰۰۶). بسیاری از ویژگی‌های جذب خاک شور در باند نور مرئی توسط اکسیدهای آهن ایجاد می‌شوند و وجود اکسیدهای آهن منجر به کاهش بازتاب خاک در کل محدوده باند مرئی می‌شود (دوآوی و همکاران، ۲۰۰۶؛ پنگ و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، شاخص اکسید آهن خاک می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی میزان شوری خاک انتخاب شود (گو و همکاران، ۲۰۲۰). شاخص NSMI شامل یک نسبت بانندی ساده است که برای تعیین رطوبت خاک سطحی در شرایط آزمایشگاهی و مزرعه‌ای قابل استفاده است (نوسیتا و همکاران، ۲۰۱۳). شاخص TGSi منعکس‌کننده اندازه ذرات درشت خاک سطحی است. هرچه اندازه ذرات خاک سطحی درشت‌تر باشد، میزان بیابان‌زایی شدت بیشتری خواهد داشت (ذوالفقاری و عبدالحی، ۱۴۰۱). از شاخص رس، برای شناسایی وجود ترکیب رس در منطقه تحقیق استفاده می‌شود. این شاخص به تمایز بین اشیاء شنی و غیرشنی کمک می‌کند (گازمی و همکاران، ۲۰۲۲). از شاخص CI می‌توان برای شناسایی و نقشه‌برداری واحدهای مختلف سنگ‌شناسی و ریخت‌شناسی، مانند ماسه‌های فعال، مناطق پوسته‌دار بین‌لایه‌ای و پلایاها، از تصاویر سنجش از دور استفاده کرد (کارنلی، ۱۹۹۷). شاخص رنگ نیز برای استخراج اطلاعات مربوط به محتوای ماده آلی و ترکیب کانی‌شناسی خاک استفاده می‌شود (گادال و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-۲-۳. سپیدایی سطحی

سپیدایی سطحی، معیاری بدون بعد از تابش خورشیدی منعکس‌شده توسط سطح زمین است (سونگ، ۱۹۹۸). این پارامتر نسبت بین تابش خورشیدی منعکس‌شده از سطح زمین و تابش خورشیدی تابیده‌شده بر آن را نشان می‌دهد (کفایت مطلق و دارند، ۲۰۲۴). مطالعات بسیاری از پژوهشگران نشان داده است

۲-۲-۶. تفکیک طبقات بیابانزایی

در این پژوهش، تفکیک طبقات بیابانزایی بر اساس نظر ورسترات و پیتی (۱۹۹۶) با تقسیم فضای ویژگی طیفی در راستای قائم بر تغییرات بیابانزایی صورت پذیرفت. برای تعیین محل تغییرات قائم، ابتدا شیب خط عمود بر خط برازش داده شده بر فضای ویژگی (a) محاسبه شد. سپس، معادله شدت بیابانزایی بر اساس رابطه زیر (رابطه ۴) تعیین شد (ذوالفقاری و عبداللهی، ۱۴۰۱).

$$I = a \times \text{Index} \pm \text{Albedo} \quad (۴)$$

از روش شکست طیفی جنکس در نرم افزار ArcGIS برای طبقه بندی ارزش داده ها به ۵ درجه بیابانزایی استفاده می شود. در این تقسیم بندی ۵ کلاس شامل مناطق بدون تأثیر، شدت کم، شدت متوسط، شدت زیاد، و شدت خیلی زیاد در بیابانزایی ارائه می شود (ذوالفقاری و عبداللهی، ۱۴۰۱). محققین زیادی با موفقیت از این مدل برای طبقه بندی پدیده های طیفی استفاده کرده اند (پینا و همکاران، ۲۰۱۶؛ هان و همکاران، ۲۰۱۵). به منظور مقایسه نتایج طبقه بندی شدت بیابانزایی در هریک از مدل های فضای ویژگی، از ماتریس خطا و پارامترهای صحت کلی (Overall Accuracy) و ضریب کاپا (Kappa Coefficient) استفاده شد. صحت کلی، از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل ها طبق رابطه ۵ محاسبه شد.

$$OA = \sum P_{ij} / N \quad (۵)$$

که در رابطه ۵، OA صحت کلی؛ N تعداد پیکسل های آزمایشی و $\sum P_{ij}$ جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا می باشد (مرادی و همکاران، ۱۴۰۱). ضریب کاپا نیز از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$Kappa = [(P_0 - P_c) / (1 - P_c)] \times 100 \quad (۶)$$

که در رابطه ۶، P_0 صحت مشاهده شده و P_c توافق مورد انتظار می باشد (مرادی و همکاران، ۱۴۰۱). دامنه ضریب کاپا بین ۰ و ۱ می باشد که عدد یک بیانگر توافق صد در صدی طبقه بندی با واقعیت زمینی می باشد (ماتهر و تسو، ۲۰۰۹).

طیفی اهداف در تصاویر سنجش از دور استفاده می شود. نقاط درون فضاهای ویژگی مختلف، اشکال هندسی متنوعی را نشان می دهند، در حالی که در یک فضای ویژگی یکسان، نقاطی که اهداف مشابه را نشان می دهند، تمایل دارند در کنار هم خوشه بندی شوند. برعکس، نقاطی که اهداف متنوع را نشان می دهند، معمولاً جدا شده و در خوشه های مختلف توزیع می شوند. این ویژگی، امکان تمایز مؤثر بین اهداف متنوع را با استفاده از مدل فضای ویژگی فراهم می کند (سندهورت و همکاران، ۲۰۰۲). در این مطالعه، مدل های فضای ویژگی دو بعدی، با استفاده از جفت شاخص های معمول برای ساخت هر فضای ویژگی توسعه داده شدند (تاشپولات و رحمان، ۲۰۲۵). به دلیل وسعت زیاد منطقه جغرافیایی و همچنین تنوع طیفی قابل توجه شاخص های سنجش از دور، استفاده از تمامی پیکسل های نقشه ها برای ساخت مدل های فضای ویژگی میسر نبود. بنابراین، تعداد ۷۵۳ نقطه (پیکسل) به نحوی که قابل مدیریت و در عین حال، نمایانگر تمامی ویژگی های جامعه آماری اصلی باشند، با روش نمونه گیری تصادفی (Random Sampling) از نقشه شاخص ها انتخاب شدند. سپس در نقاط انتخابی، ارزش عددی (DN) شاخص های طیفی خاک به دست آمده و مقادیر متناظر آنها از شاخص سپیدایی سطحی استخراج شد. در این مرحله، نمودارهای پراکندگی (Scatter Plot) ارزش های طیفی پیکسل ها در محیط نرم افزار SAGA 9.5 ترسیم شدند. معادله رگرسیونی به دست آمده از هر مدل به صورت زیر (رابطه ۳) بیان می شود:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۳)$$

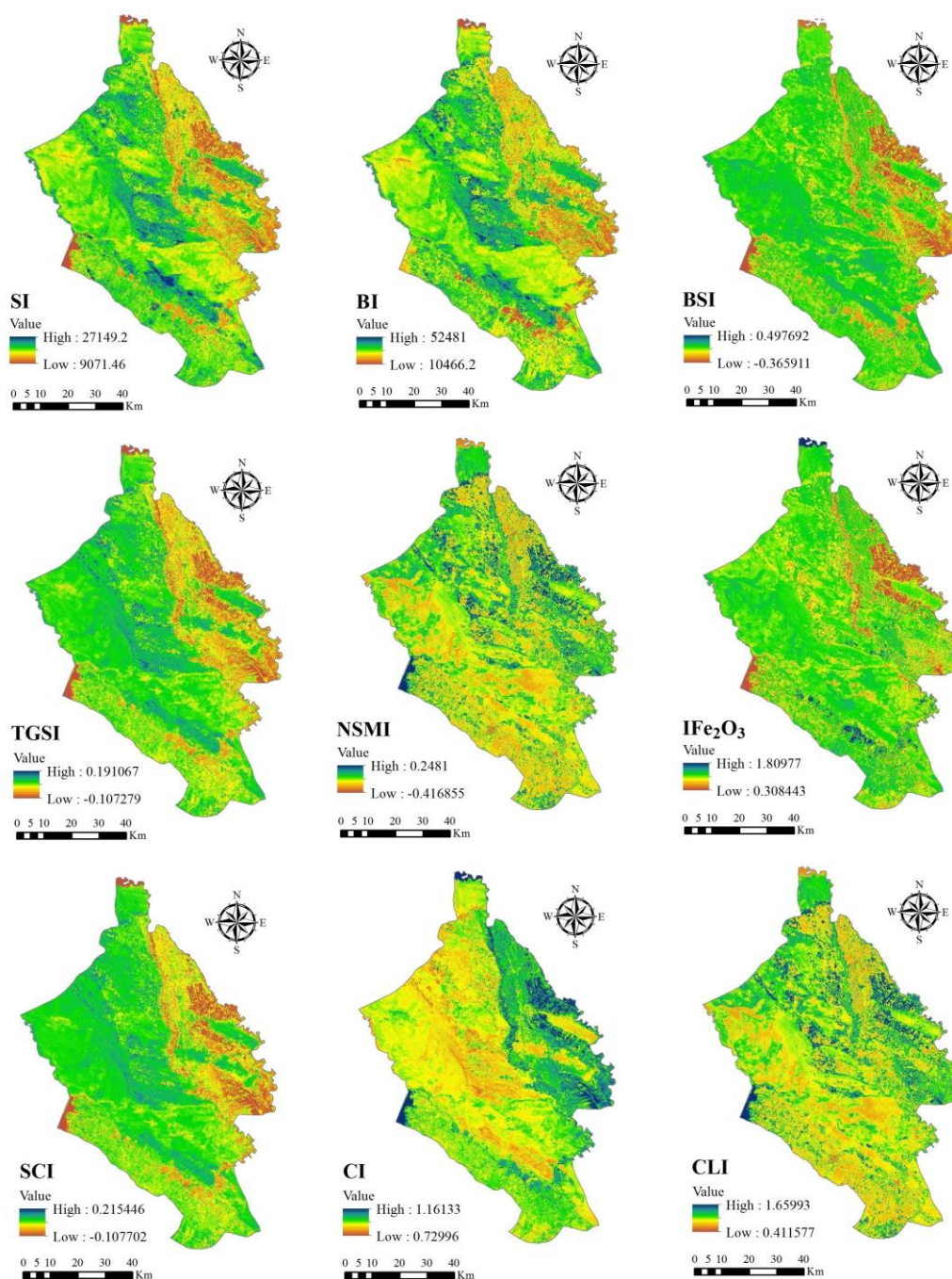
در معادله ۳، a شیب و b عرض از مبدأ است (پورینو و همکاران، ۲۰۲۴). بدین ترتیب، شاخص ها در قالب جفت های مختلف و بر اساس همبستگی بین هریک از شاخص های طیفی خاک و متغیر سپیدایی سطحی، گروه بندی شدند که هر جفت برای ساخت یک مدل فضای ویژگی دو بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، تعداد ۹ مدل فضای ویژگی دو بعدی متشکل از شاخص های سنجش از دور برای پایش بیابانزایی در منطقه ساخته شد.

۳. نتایج و بحث

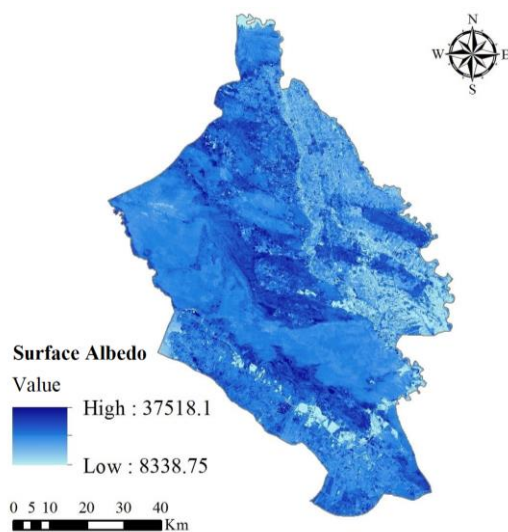
۳-۱. ساخت مدل‌های فضای ویژگی

در این پژوهش، شاخص‌های طیفی خاک با استفاده از ابزار محاسبات باندی در نرم‌افزار ENVI محاسبه شده و نقشه‌های رستری آنها به دست آمد (شکل ۲). برای ساختن مدل‌های فضای ویژگی و یافتن رابطه همبستگی بین متغیرها، مقادیر

شاخص سیدایی سطحی نیز از تصویر ماهواره‌ای استخراج شد. حداکثر و حداقل مقادیر عددی این شاخص به ترتیب ۳۷۵۱۸/۱ و ۸۳۳۸/۷۵ بوده است (شکل ۳). در این پژوهش، به دلیل تراکم بالای پیکسل‌ها و پوشش شدید نقاط داده در نمودارهای پراکندگی، از نمایش الگوی چگالی (Density Pattern) برای تجسم بهتر روابط شاخص‌ها استفاده شد.



شکل ۲. نقشه شاخص‌های طیفی خاک مستخرج از تصویر ماهواره‌ای.

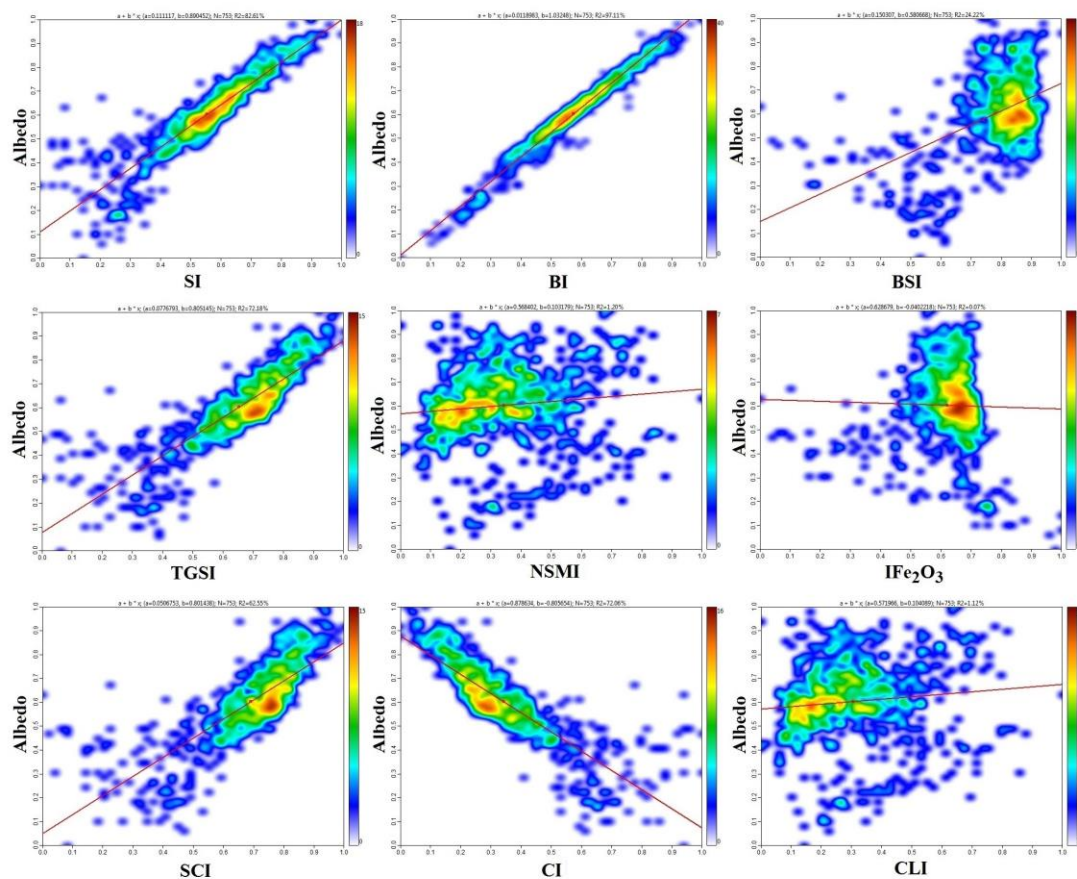


شکل ۳. نقشه شاخص سپیدایی سطحی مستخرج از تصویر ماهواره‌ای.

۳-۲. رابطه همبستگی بین متغیرها

همبستگی بین شاخص‌های طیفی خاک و سپیدایی سطحی انجام شد. در این پژوهش، هریک از شاخص‌های طیفی خاک به‌عنوان متغیر مستقل و شاخص سپیدایی سطحی به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد.

پس از نرمال‌سازی شاخص‌ها، نمودار پراکندگی چگالی ارزش‌های طیفی پیکسل‌ها در محیط نرم‌افزار SAGA ترسیم شده (شکل ۴) و معادلات خط بهترین برازش به دست آمدند (جدول ۳). همچنین، تحلیل رگرسیون خطی با هدف بررسی



شکل ۴. نمودار پراکندگی چگالی ارزش‌های طیفی پیکسل‌ها

جدول ۳. نتایج تحلیل همبستگی بین شاخص‌ها.

مدل فضای ویژگی	معادله خط بهترین برازش	N	R ²	R	p-value
Albedo-BSI	$\text{Albedo} = 0.581\text{BSI} + 0.150$	۷۵۳	۰/۲۴۲	۰/۴۹۲	۰/۰۰۰
Albedo-BI	$\text{Albedo} = 1.032\text{BI} + 0.012$	۷۵۳	۰/۹۷۱	۰/۹۸۵	۰/۰۰۰
Albedo-SI	$\text{Albedo} = 0.890\text{SI} + 0.111$	۷۵۳	۰/۸۲۶	۰/۹۰۹	۰/۰۰۰
Albedo-IFe ₂ O ₃	$\text{Albedo} = -0.040\text{IFe}_2\text{O}_3 + 0.629$	۷۵۳	۰/۰۰۱	-۰/۰۲۶	۰/۰۰۰
Albedo-NSMI	$\text{Albedo} = 0.103\text{NSMI} + 0.568$	۷۵۳	۰/۰۱۲	۰/۱۱۰	۰/۰۰۰
Albedo-TGSI	$\text{Albedo} = 0.805\text{TGSI} + 0.777$	۷۵۳	۰/۷۲۲	۰/۸۵۰	۰/۰۰۰
Albedo-CLI	$\text{Albedo} = 0.104\text{CLI} + 0.572$	۷۵۳	۰/۰۱۱	۰/۱۰۶	۰/۰۰۰
Albedo-CI	$\text{Albedo} = -0.806\text{CI} + 0.879$	۷۵۳	۰/۷۲۱	-۰/۸۴۹	۰/۰۰۰
Albedo-SCI	$\text{Albedo} = 0.801\text{SCI} + 0.051$	۷۵۳	۰/۶۲۶	۰/۷۹۱	۰/۰۰۰

نمک‌های روشن دارند. این سطوح، پراکندگی الاستیک فوتون‌ها (به‌ویژه در محدوده مرئی) را به حداکثر می‌رسانند، زیرا تلفات انرژی ناشی از جذب رزونانسی توسط آب یا مواد تیره در آنها حداقل است و در نتیجه سپیدایی به شدت افزایش می‌یابد. در مقابل، شاخص‌هایی با همبستگی ضعیف یا منفی مانند IFe₂O₃، حضور مواد جاذب قوی مانند اکسیدهای آهن را نشان می‌دهند که با ایجاد گذارهای الکترونی در نوار انرژی، انرژی فوتون‌ها را به‌طور کارآمد به گرما تبدیل می‌کنند. در واقع، سپیدایی تابعی از رنگ، بافت، رطوبت و ترکیب کانی‌شناسی خاک است که هر یک بر مکانیسم‌های جذب و پراکندگی نور تأثیر می‌گذارند.

شاخص روشنایی (BI) مربوط به روشنایی خاک است که به نوبه خود تحت تأثیر رطوبت خاک، وجود نمک‌ها و محتوای مواد آلی سطح خاک قرار دارد (اسکادفال، ۱۹۸۹). این شاخص دارای توانایی در بارزسازی اراضی شور می‌باشد (شیرازی و همکاران، ۱۳۸۹). سطوح با سپیدایی بالا (مانند خاک‌های شنی و خشک) معمولاً مقادیر BI بالاتری دارند، زیرا بازتابندگی بیشتری در محدوده مرئی و مادون قرمز دارند (هوئت و همکاران، ۲۰۰۲). برعکس، خاک‌های تیره یا مرطوب به دلیل جذب

نتایج حاصل از مدل رگرسیون خطی بین شاخص‌های طیفی خاک و سپیدایی سطحی نشان داد که شاخص‌های BSI، BI، SI، NSMI، TGSI، CLI و SCI با شاخص Albedo همبستگی مثبت داشتند؛ به‌طوری که با افزایش شاخص‌های BSI، BI، SI، NSMI، TGSI، CLI و SCI، متغیر Albedo افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که شاخص‌های IFe₂O₃ و CI با شاخص Albedo همبستگی منفی داشتند؛ به‌طوری که با افزایش شاخص‌های IFe₂O₃ و CI، از متغیر Albedo کاسته می‌شود. بررسی ضریب همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که شاخص‌های BI، SI و TGSI به‌ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۹۸۵، ۰/۹۰۹ و ۰/۸۵۰، بیشترین همبستگی و شاخص‌های IFe₂O₃ و CLI و NSMI به‌ترتیب با ضریب همبستگی -۰/۰۲۶، ۰/۱۰۶ و ۰/۱۱۰، کمترین همبستگی را با شاخص Albedo داشته‌اند. بر این اساس، مدل Albedo-BI، بیشترین دقت را در تفکیک طبقات بیابان‌زایی در منطقه داشته است. از دیدگاه فیزیکی، این نتایج به‌طور مستقیم بازتابنده کارایی پراکندگی (Scattering) و جذب (Absorption) فوتون‌ها توسط ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. شاخص‌هایی با همبستگی مثبت و قوی مانند BI، SI و TGSI، سطوحی را نشان می‌دهند که ذرات درشت‌تر، خشک و غنی از

بیشتر نور، هم سپیدایی پایین تر و هم مقادیر BI کمتری نشان می دهند (لویل و اسنر، ۲۰۰۲). میزان شوری و قلیایی شدن خاک، عوامل اصلی و تشدیدکننده بیابانزایی هستند (گیویاشراف و همکاران، ۲۰۱۵). شاخص شوری خاک SI یکی از شاخص های اصلی ارزیابی تخریب سرزمین است؛ این شاخص استخراج شده از تصاویر ماهواره ای، قادر به ارزیابی شوری خاک در مناطق خشک و نیمه خشک می باشد (اسکندری دامنه و همکاران، ۱۴۰۲). در مطالعه ای، ژئوپینگ ها به این نتیجه رسید که توزیع مکانی فضای ویژگی SI-Albedo دارای قانون قابل توجهی است، یعنی خاک غیرشور در توزیع انبوه قرار دارد که می تواند اطلاعات خاک شور را به صورت کمی و سریع استخراج کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۹). پوسته نمک روی سطح، باعث افزایش چشمگیر سپیدایی می شود. به همین دلیل است که نقشه برداری از مناطق متأثر از نمک با تصاویر سنجش از دور، ابزار بسیار قدرتمندی برای نقشه برداران خاک است (لال، ۲۰۰۶). شاخص TGSI مبتنی بر اندازه گیری بازتاب طیفی و تحلیل آزمایشگاهی ترکیب ذرات در لایه سطحی خاک است. مقادیر مثبت نشانه ذرات درشت خاک بوده و مقادیر منفی نشان دهنده پوشش گیاهی یا آب است. هرچه میزان TGSI بالاتر باشد، سطح زمین ناهموارتر است (فیزولاهپور، ۲۰۲۴). متغیر Albedo رابطه مستقیم و مثبت با متغیر TGSI دارد و هرچه اندازه ذرات سطحی

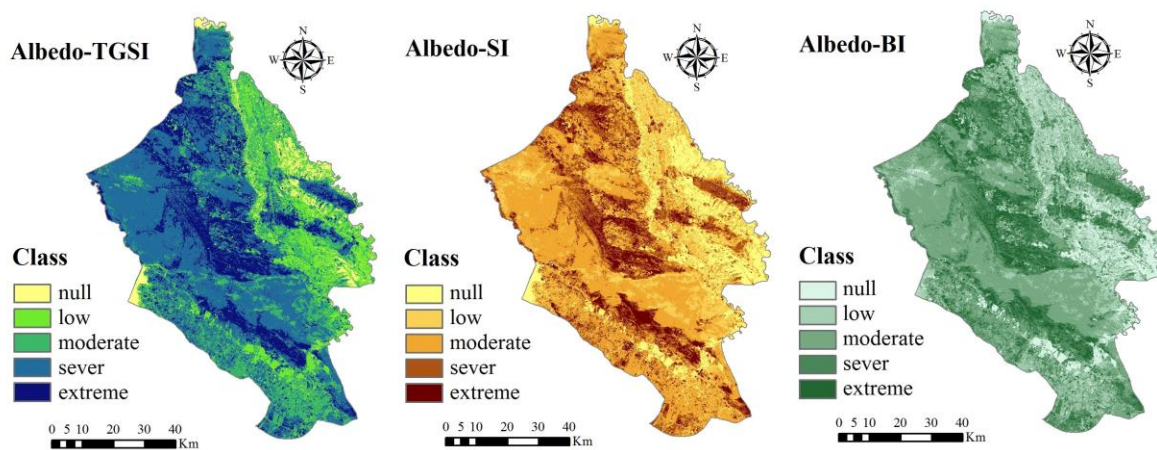
خاک بزرگ تر شوند و یا به عبارت دیگر، مقدار ذرات ریز خاک از دسترس خارج شوند و ذرات شن باقی بمانند، میزان سپیدایی سطحی افزایش پیدا می کند (هاشم گلوگردی و همکاران، ۱۴۰۰). در فضای ویژگی Albedo-TGSI، هرچه بیابانزایی شدیدتر باشد، ترکیب دانه بندی خاک سطحی درشت تر و مقدار TGSI بالاتر است (لامچین و همکاران، ۲۰۱۷). افزایش سپیدایی سطحی اگرچه در کوتاه مدت دمای سطح زمین را کاهش می دهد، اما از طریق مکانیسم های زیر بیابانزایی را تشدید می کند: کاهش جذب انرژی خورشیدی منجر به کاهش تبخیر و بارندگی می شود، خشکی خاک افزایش یافته و پوشش گیاهی از بین می رود. این فرایند یک چرخه معیوب ایجاد می کند-از دست رفتن گیاهان باعث افزایش بیشتر سپیدایی شده که به نوبه خود خشکی را تشدید می کند. همچنین تغییر در الگوهای جوی می تواند توزیع بارش ها را مختل کند. در نتیجه، حتی با وجود کاهش دما، سیستم به سمت بیابانی تر شدن پیش می رود، به ویژه در مناطق نیمه خشک که بیشتر در معرض این تغییرات هستند. پس از ترسیم نمودارهای پراکندگی نقاط و تعیین معادلات خط بهترین برازش، مقدار شیب خط عمود بر خط برازش داده شده بر هر فضای ویژگی محاسبه شده و معادلات شدت بیابانزایی به صورت زیر استخراج شد (جدول ۴).

جدول ۴. نتایج معادلات شدت بیابانزایی در منطقه.

مدل فضای ویژگی	معادله رگرسیون خطی
Albedo-BSI	$I = 1/721 \times BSI + Albedo$
Albedo-BI	$I = 0/969 \times BI + Albedo$
Albedo-SI	$I = 1/123 \times SI + Albedo$
Albedo-IFe ₂ O ₃	$I = 25 \times IFe_2O_3 - Albedo$
Albedo-NSMI	$I = 9/709 \times NSMI + Albedo$
Albedo-TGSI	$I = 1/242 \times TGSI + Albedo$
Albedo-CLI	$I = 9/615 \times CLI + Albedo$
Albedo-CI	$I = 1/241 \times CI - Albedo$
Albedo-SCI	$I = 1/248 \times SCI + Albedo$

بیابان‌زایی، دقت نقشه مدل‌های فضای ویژگی Albedo-BI، Albedo-SI و Albedo-TGSI، با استفاده از ماتریس خطا و معیارهای صحت کلی و ضریب کاپا مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر صحت کلی و ضریب کاپا برای نقشه مدل Albedo-BI به ترتیب ۹۸/۲۳ درصد و ۰/۹۷، برای نقشه مدل Albedo-SI به ترتیب ۹۴/۴۵ درصد و ۰/۹۲ و برای نقشه مدل Albedo-TGSI به ترتیب ۹۰/۵۰ درصد و ۰/۸۶ بوده است. در نتیجه، نقشه طبقه‌بندی شده مدل فضای ویژگی Albedo-BI، بیشترین دقت را در جداسازی و تفکیک طبقات شدت بیابان‌زایی در منطقه داشته است.

در این پژوهش، از مدل‌های فضای ویژگی Albedo-BI، Albedo-SI و Albedo-TGSI، به دلیل همبستگی بیشتر بین متغیرها، برای طبقه‌بندی شدت بیابان‌زایی در منطقه استفاده شد. نتایج طبقه‌بندی حاصل از روش شکست طبیعی جنکس در ۵ کلاس شدت بیابان‌زایی شامل مناطق بدون بیابان‌زایی (null)، مناطق با شدت کم بیابان‌زایی (low)، مناطق با شدت متوسط بیابان‌زایی (moderate)، مناطق با شدت زیاد بیابان‌زایی (sever) و مناطق با شدت خیلی زیاد بیابان‌زایی (extreme) در شکل ۵ و جدول ۵ ارائه شده است. نتایج اعتبارسنجی نقشه‌های به دست آمده نیز در جدول ۵ ارائه شده است. پس از طبقه‌بندی شدت



شکل ۵. نقشه طبقات شدت بیابان‌زایی در منطقه.

جدول ۵. نتایج حاصل از بررسی وضعیت بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه.

مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی (هکتار)						مفهوم نماد	نماد شدت
Albedo-TGSI		Albedo-SI		Albedo-BI			
درصد	هکتار	درصد	هکتار	درصد	هکتار		
۴	۲۳۵۷۲	۱۱	۷۰۲۱۵	۸	۵۰۳۵۹	مناطق بدون بیابان‌زایی	null
۱۲	۷۶۰۲۷	۱۹	۱۲۲۸۰۸	۱۹	۱۲۳۷۱۵	مناطق با شدت کم بیابان‌زایی	low
۲۲	۱۴۰۳۹۸	۴۱	۲۶۰۶۳۶	۴۰	۲۵۶۵۲۲	مناطق با شدت متوسط بیابان‌زایی	moderate
۴۳	۲۷۷۳۲۸	۲۰	۱۳۱۰۸۲	۳۳	۱۴۴۵۳۴	مناطق با شدت زیاد بیابان‌زایی	sever
۱۹	۱۲۳۹۶۶	۹	۵۶۵۴۹	۱۰	۶۶۱۶۱	مناطق با شدت خیلی زیاد بیابان‌زایی	extreme

نمایه‌ای کارآمد برای پایش تخریب اراضی و بیابانزایی است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از روابط همبستگی بین شاخص‌های طیفی خاک و شاخص سیدایی در مدل‌های سنجش از دور مبتنی بر فضای ویژگی، رویکرد کارآمدی در پایش وضعیت بیابانزایی در غرب استان خوزستان ارائه شده است. بر اساس نتایج این پژوهش، بیشترین مساحت منطقه در دو مدل Albedo-SI و BI در کلاس شدت متوسط بیابانزایی و در مدل Albedo-TGSI در کلاس شدت زیاد بیابانزایی قرار گرفته است. نقشه مدل فضای ویژگی Albedo-BI بیشترین دقت را در تفکیک طبقات بیابانزایی در منطقه داشته است. بررسی بصری نقشه مدل Albedo-BI نیز نشان داد که بخش‌های شرقی منطقه، دارای شدت بیابانزایی بیشتری نسبت به قسمت‌های غربی هستند. از جنبه طبیعی، ویژگی‌های خاک (مانند بافت و شوری)، جهت وزش بادهای غالب (که موجب انتقال ماسه و فرسایش بادی می‌شود) و میزان بارش می‌توانند در تشدید این الگو نقش داشته باشند. از سوی دیگر، عوامل انسانی نظیر نوع کاربری اراضی (فعالیت‌های کشاورزی ناپایدار، چرای بی‌رویه دام و تخریب پوشش گیاهی) نیز به‌طور مستقیم بر تشدید یا مهار بیابانزایی تأثیرگذار هستند. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده حاصل تعامل پیچیده این عوامل در بخش شرقی منطقه است که آن را نسبت به بخش‌های غربی آسیب‌پذیرتر کرده است. در این پژوهش، از تصویر ماهواره لندست ۸ جهت محاسبه شاخص‌های سنجش از دور و تعیین شدت بیابانزایی استفاده شده است. با توجه به اینکه تصویر مورد نظر، تنها یک محدوده زمانی خاص را از منطقه مورد مطالعه پوشش می‌دهد، لازم است پژوهش‌هایی در زمینه تغییرات بیابانزایی یا اثر شرایط اقلیمی بر روند بیابانزایی با استفاده از داده‌های بلندمدت صورت پذیرد. با توجه به محدودیت‌های تصاویر لندست ۸ از نظر تفکیک مکانی و بازه زمانی تصویربرداری، برای بهبود دقت شناسایی تغییرات در مقیاس‌های کوچک‌تر (تغییرات کوچک مقیاس در پوشش گیاهی، شوری و فرسایش خاک) و پایش تغییرات سریع (خشکسالی‌های ناگهانی، طوفان‌های ماسه‌ای و تخریب مراتع)، استفاده از تصاویر سنتینل-۲ به‌عنوان راهکاری کم‌هزینه و

بر اساس دو مدل Albedo-BI و Albedo-SI بیشترین سطح اراضی منطقه در کلاس شدت متوسط بیابانزایی قرار دارند. در حالی که کمترین سطح اراضی منطقه در مدل Albedo-BI در کلاس بدون بیابانزایی و در مدل Albedo-SI در کلاس شدت خیلی‌زیاد بیابانزایی قرار دارد. در مدل Albedo-TGSI بیشترین سطح اراضی در کلاس شدت زیاد بیابانزایی و کمترین سطح اراضی در کلاس بدون بیابانزایی قرار گرفته است. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص‌های SI، BI و TGSI دارای بیشترین ارتباط با متغیر سیدایی هستند. همبستگی قوی بین شاخص‌های SI و Albedo و مناسب بودن مدل Albedo-SI برای ارزیابی بیابانزایی در منطقه، با نتایج پژوهش هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) که به موضوع شور شدن اراضی در شهرستان تونگیو چین پرداختند و نتیجه گرفتند که مدل Albedo-SI ممکن است سطوح شوری زمین را با دقت بالاتر ارزیابی کند، همخوانی دارد. به‌علاوه، همبستگی شاخص TGSI با متغیر Albedo نیز، با نتایج مطالعه ذوالفقاری و عبداللهی (۱۴۰۱) که در آن شدت بیابانزایی در دو منطقه سوران و زابل در سیستان و بلوچستان بر اساس شاخص‌های Albedo، TGSI و NDVI مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که شاخص TGSI با سیدایی سطحی رابطه مستقیم و مثبتی داشته است، همخوانی دارد. در مقایسه با مطالعات گسترده‌تر بر سیدایی سطح زمین نظیر تحقیقات کفایت مطلق و دارند (۱۴۰۳) و کربلایی درئی و همکاران (۱۴۰۰) که به رفتار زمانی-مکانی سیدایی در سطح کشور پرداختند، هر دو مطالعه تأیید می‌کنند که افزایش سیدایی می‌تواند نشانه‌ای از تخریب زمین یا وجود شرایط بیابانی باشد. یافته پژوهش حاضر در همبستگی مثبت سیدایی با شاخص‌های طیفی خاک مانند BI و SI، با نتایج کربلایی درئی که سیدایی‌های بالاتر از میانگین را در ارتباط با پوشش نمکی دانسته‌اند، همسو است. برخلاف پژوهش حاضر که افزایش سیدایی را صرفاً در ارتباط با ویژگی‌های خاک بررسی می‌کند، کفایت مطلق و همکاران (۱۴۰۳) و کربلایی درئی و همکاران (۱۴۰۰) تغییرات فصلی سیدایی را عمدتاً تحت تأثیر عوامل اقلیمی (برف، نم‌کزار و خشکسالی) معرفی کرده‌اند. در مجموع، وجه اشتراک اساسی بین این مطالعات و تحقیق حاضر، تأکید بر نقش معنادار شاخص سیدایی به‌عنوان

ارزیابی نقشه بیابان‌زایی در استان خوزستان. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشگاه حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ۱۱۲ ص.

دیناروند، م.، کنشلو، ه. و فیاض، م. (۱۳۹۷). پوشش گیاهی کانون‌های گرد و غبار در استان خوزستان. نشریه طبیعت ایران، ۳(۳)، ۳۲-۴۲.

ذوالفقاری، ف. و عبداللهی، و. (۱۴۰۱). تعیین شدت بیابان‌زایی بر اساس شاخص‌های طیفی با استفاده از تصاویر سنتینل-۲؛ مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان. فصلنامه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۳(۱)، ۱۲۶-۱۰۸.

رحمانی سیالرز، ش. و کشاورزی، ع. (۱۴۰۲). مروری بر چالش‌های انتخاب شاخص‌های مناسب دورسنجی در مطالعات شوری خاک. فصلنامه مدیریت اراضی، ۱۱(۱)، ۹۹-۱۱۹.

شیرازی، م. زهتاییان، غ.؛ و متین‌فر، ح. (۱۳۸۹). بررسی قابلیت شاخص‌های مختلف دورسنجی در بازسازی پوشش‌های سطح زمین در مناطق خشک (مطالعه موردی: نجم‌آباد ساوجبلاغ). فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۷(۲)، ۲۷۵-۲۵۶.

عیات، م.؛ عبیات، م. و عبیات، م. (۱۴۰۲). ارزیابی شدت بیابان‌زایی با استفاده از شاخص‌های طیفی منتج از تصاویر ماهواره‌ای؛ مطالعه موردی: شهرستان بندر ماهشهر. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۵(۴)، ۶۱-۸۱.

قربانی، ژ.؛ سفیدی، ک.؛ کیوان بهجو، ف. و معماری، م. (۱۳۹۷). تأثیر شدت‌های مختلف چرای دام بر زیست توده اندام‌های هوایی و زیرزمینی دو گونه Festuca Ovina و Agropyron Libanoticum در مراتع جنوب شرقی سیلان. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۵(۳)، ۵۰۰-۵۱۱.

کربلایی‌درئی، ع. ر.، حجازی‌زاده، ز. و مسعودیان، س. ا. (۱۴۰۰). واکاوی زمانی- مکانی سپیدایی روشن (White Sky Albedo) بالاتر از میانگین در ایران. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۳(۱)، ۱۴۱-۱۵۵.

مرادی، ع.؛ جعفری، م.؛ ارزانی، ح. و ابراهیمی، م. (۱۴۰۱).

کارآمد ارائه می‌شود. همچنین، به کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین پیشرفته مانند شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل تصادفی (RF) و تقویت گرادیان شدید (XGBoost) می‌تواند به افزایش دقت طبقه‌بندی و جداسازی پهنه کلاس‌های مختلف بیابان‌زایی کمک کند.

مراجع

احمدی، پ.، خالدی، ش. و احمدی، م. (۱۴۰۰). پایش آماری پدیده گرد و غبار در استان خوزستان با رویکرد ساعتی. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۱(۶۰)، ۲۷۷-۲۵۹.

اسکندری دامنه، ه.؛ اسکندری دامنه، ح.؛ خسروی، ح.؛ چراغی، م. و عادل‌ساردوئی، م. (۱۴۰۲). ارزیابی تخریب اراضی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور ماهواره لندست در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۰ (مطالعه موردی: شهرستان اصفهان). فصلنامه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۴(۱)، ۸۶-۱۰۰.

پاینده، خ.؛ خاشعی، م. و سبزعلیپور، س. (۱۳۹۷). بررسی علل ریزگردها استان خوزستان و عوامل مؤثر بر آن، اولین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی مدیریت پایدار منابع خاک و محیط زیست، کرمان، ایران.

پویان، س.، زارع، م.، اختصاصی، م. ر. و مختاری، م. ح. (۱۳۹۷). برآورد آلیدو سطح زمین در رخساره‌های ژئومورفولوژی دشت یزد-اردکان با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره لندست ۸. فصلنامه مدیریت بیابان، ۶(۱۲)، ۴۸-۳۳.

جابری، س.، و خسروی پور، ب. (۱۳۹۵). بیابان‌زایی در ایران؛ علل و راهکارها، کنفرانس بین‌المللی منابع طبیعی، مهندسی کشاورزی، محیط زیست و توسعه روستایی، تهران.

جعفری، م.، پناهی، ف.، احمدی، ح.، عباسی، ح. ر.، موسوی، م.؛ زارع، م. ع. و طویلی، ع. (۱۳۸۵). ارزیابی شاخص‌های معیار خاک جهت بررسی وضعیت بیابان‌زایی مناطق سلیمان، حسین‌آباد میش‌مست و گازران در استان قم. فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۳(۳)، ۲۷۸-۲۸۳.

حبیبی، ع. ر.، صادقی، م.، رجبی، م.، شادفر، ص.، عرب‌خدری، م.، خیرخواه، م. و جعفریان، م. (۱۳۹۲). تدوین، تهیه و

هاشم گلوگردی، س.؛ ولی، ع. ع. و شریفی، م. ر. (۱۴۰۰). کاربرد مدل فضای ویژگی TGSi-Albedo در بررسی وضعیت بیابانی شدن مرکز استان خوزستان. فصلنامه مدیریت بیابان، ۹(۳)، ۴۹-۶۶.

ارزیابی تغییر کاربری اراضی مرتعی به دیم‌زار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی. فصلنامه سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۱)، ۸۹-۱۰۰.

- Chavez, Jr, Pat. (1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chen, Q., Vaudour, E., Richer-de-Forges, A., & Arrouays, D. (2025). Spectral indices in remote sensing of soil: definition, popularity, and issues. A critical overview. *Remote Sensing of Environment*, 329, 114918.
- Cordeiro, M. C., Santos, N. A., Silva, V. M. A., Luiz, D. M., & Silva, V. P. R. (2015). Case Study: Identification of Desertification in the Years 1999, 2006, and 2011 in Mossoró-rn. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 4, 101-106.
- Dai Nguyen, V., Hai Hoa, N., Quyet, N., & Duy Quang, P. (2021). Land Surface Temperature Responses to Vegetation and Soil Moisture Index using Landsat-8 Data in Luong Son District, Hoa Binh Province. *Journal of Forestry Science and Technology*, (11), 082-094.
- Deng, J., Huang, X., Feng, Q., Ma, X., & Liang, T. (2015). Toward Improved Daily Cloud-Free Fractional Snow Cover Mapping with Multi-Source Remote Sensing Data in China. *Remote Sensing*, 7(6), 6986-7006.
- Diek, S., Fornallaz, F., & Schaepman, M. E. (2017). Barest Pixel Composite for Agricultural Areas USING Landsat Time Series. *Journal of Remote Sensing*, 9(12), 1245.
- Ding, H., & Xingming, H. (2021). Spatiotemporal Change and Drivers Analysis of Desertification in the Arid Region of Northwest China Based on Geographic Detector. *Journal of Environmental Challenges*, 4, 100082.
- Douaoui, A. E. K., Nicolas, H., & Walter, C. (2006). Detecting Salinity Hazards within a Semiarid Context by Means of Combining Soil and Remote-Sensing Data. *Geoderma*, 134(1-2), 217-223.
- Escadafal, R. (1989). Remote Sensing of Arid Soil Surface Color with Landsat Thematic Mapper. *Advances in Space Research*, 9(1), 159-163.
- Ferreira, C. S. S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2022). Soil Degradation in the European Mediterranean Region: Processes, Status and Consequences. *Science of the Total Environment*, 805, 150106.
- Feyzolahpour, M. (2024). Evaluation of Desertification in Qazvin Plain using Sentinel 2 Images and Spectral Indices and Degree of Desertification (DDI). *Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 11(2), 41-56.
- Gadal, S., Gbetkom, P., Ngandam, M., & Alfred H. (2021). A New Soil Degradation Method Analysis by Sentinel 2 Images Combining Spectral Indices and Statistics Analysis: Application to the Cameroonian Shores of Lake Chad and Its Hinterland. 7th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2021), pp.25-36, 2021, Proceedings of the 7th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2021).
- Gasmi, A., Gomez, C., Chehbouni, A., Dhiba, D., & Elfil, H. (2022). Satellite Multi-Sensor Data Fusion for Soil Clay Mapping Based on the Spectral Index and Spectral Bands Approaches. *Journal of Remote Sensing*, 14(5), 1103.
- Giveiashraf, Z., Hakimzade, M. A., Zare, M., Ebrahimi Khusfii, Z., & Dashtakian, K. (2015). Monitoring of Soil Salinity using ASTER Satellite Data to Evaluate Desertification in the Marvast Plain, Yazd Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 67(4), 603-616.
- Guo, B., & Wen, Y. (2020). An Optimal Monitoring Model of Desertification in Naiman Banner Based on Feature Space Utilizing Landsat8 Oli Image. *IEEE Access*, 8, 4761-4768.
- Guo, B., Wei, C., Yu, Y., Liu, Y., Li, J., Meng, C., & Cai, Y. (2022). The Dominant Influencing Factors of Desertification Changes in the Source Region of Yellow River: CLIMATE Change or Human Activity? *Science of The Total Environment*, 813, 152512.
- Habashi, K., Karimzadeh, H., & Pourmanafi, S. (2017). Assessment Soil Salinity in East Isfahan Based on OLI Sensor data and topographic feature analysis. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8(1), 36-51.
- Han, L., Zhang, Z., Zhang, Q., & Wan, X. (2015). Desertification Assessments in the Hexi Corridor of Northern China's Gansu Province by Remote Sensing. *Journal of Natural Hazards*, 75(3), 2715-2731.
- He, T. (2012). *Estimating Land Surface Albedo from Satellite Data*. Doctor of Philosophy

- Dissertation, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, pp 54.
- Huang, F., Wang, P., Liu, Y., & Li, H. Y. (2020). Land Salinization Dynamics Based on Feature Space Combinations from Landsat Image in Tongyu County, Northeast China. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 25–32.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.
- Jafari, M., Zare chahouki, M., Ahmadi, H., & Abbasi, H. (2011). Evaluation of the Effects of Soil Properties on Desertification (Case Study: Segzi Pediment of Isfahan, Iran). *Journal of Desert*, 16(1), 1-4.
- Jafari, R., Lewis, M. M., Ostendorf, B. (2008). An Image-Based Diversity Index for Assessing Land Degradation in an Arid Environment in South Australia. *Journal of Arid Environments*, 72(7), 1282-1293.
- Jana, R., Khire, M., & Sajeevan, G. (2000). *Evaluation of Albedo as an Indicator of Land Degradation using digital image processing*. Geomatics 2000: Conference on Geomatics in Electronic Governance, Pune: Technical Proceedings, Indian Society of Geomatics, Ahmedabad.
- Karnieli, A. (1997). Development and Implementation of Spectral Crust Index Over Dune Sands. *International Journal of Remote Sensing*, 18(6), 1207-1220.
- Kaur, H., Kaur, A., Singh, B., & Bhatt, R. (2020). Application of Geospatial Technology in Assessment of Spatial Variability in Soil Properties: A Review. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39(39), 57-71.
- Kefayat Motlagh, O. R., & Darand, M. (2024). Detection of Land Surface Albedo Changes Over Iran using Remote Sensing Data. *Meteorological Applications*, 31(4), e2224.
- Khan, N. M., Rastokuev, V. V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of Hydrosaline Land Degradation by using a Simple Approach of Remote Sensing Indicators. *Journal of Agricultural Water Management*, 77(1-3), 96-109.
- Khosravi, H., Zehtabian, G., Ahmadi, H., Azarnivand, H., & Ghaiebi, H. G. (2014). Hazard Assessment of Desertification as a Result of Soil and Water Resource Degradation in Kashan Region, Iran. *Journal of Desert*, 19(1), 45-55.
- Lal, R. (2006). *Encyclopedia of Soil Science*, Second Edition, Marcel Dekker: New York.
- Lamchin, M., Lee, W.-K., Jeon, S. W., Lee, J.-Y., Song, C., Piao, D., Lim, C. H., Khaulenbek, A., & Navaandorj, I. (2017). Correlation between Desertification and Environmental Variables Using Remote Sensing Techniques in Hognokhaan, Mongolia. *Sustainability*, 9(4), 581.
- Leporino, M., Roupheal, Y., Bonini, P., Colla, G., & Cardarelli, M. (2024). Protein Hydrolysates Enhance Recovery from Drought Stress in Tomato Plants: Phenomic and Metabolomic Insights. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1357316.
- Liang, S. (2001). Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 213-238.
- Liu, R. T., Sun, J. C., & Zhou, L. (2024). The Conception, Subject Characteristics, and Contents of Desert Ecology and its Simplification for Desertification Control. *Acta Ecologica Sinica*, 17, 1–7.
- Liu, Y., Qian, J., & Yue, H. (2021). Comparison and Evaluation of Different Dryness Indices Based on Vegetation Indices- Land Surface Temperature/Albedo Feature Space. *Journal of Advances in Space Research*, 68, 2791-2803.
- Lobell, D. B., & Asner, G. P. (2002). Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 722-727.
- MalAmiri, N., Rashki, A., Hosseinzadeh, S. R., & Kaskaoutis, D. G. (2022). *Mineralogical, Geochemical, and Textural Characteristics of Soil and Airborne Samples During Dust Storms in Khuzestan, Southwest Iran*. Chemosphere, Vol. 286, Part 3.
- Mather, P. M., & Tso, B. (2009). *Classification Methods for Remotely Sensed data*, Second Edition, CRC Publishing, New York.
- Meng, X., Li, S., Akhmadi, K., He, P., & Dong, G. (2024). Trends, Turning Points, and Driving Forces of Desertification in Global Arid Land Based on the Segmental Trend Method and SHAP Model. *Journal of GIScience & Remote Sensing*, 61(1), 1-22.
- Min, Y., Zhang, Y., Kang, J., & Feng, K. (2021). Study on Spatial-Temporal Dynamic Monitoring of Degree of Desertification in CPEC based on MODIS Image. *Remote sensing technology and application*, 36(4), 827-837.
- Naseri, H. R. (2005). Assessment of Hydrogeochemistry and Groundwater Contamination of Shoush Plain Using Iso-Parameter Maps, Factor and Cluster Analysis.

- Journal of Territory*, 1(4), 42-59.
- Nocita, M., Stevens, A., Noon, C., & Wesemael, B. (2013). Prediction of Soil Organic Carbon for Different Levels of Soil Moisture using Vis-NIR Spectroscopy. *Geoderma*, 199, 37-42.
- Peng, J., Xiang, H. Y., Zhou, Q., Zhang, Y. Z., Wang, J. Q., & Peng, X. A. (2013). Hyperspectral Response of Soil Iron Oxide. *Spectrosc Spect Anal*, 33(02), 502-506.
- Piña, R. B., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C. A., & González-Sosa, E. (2016). Integration of Remote Sensing Techniques for Monitoring Desertification in Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(6), 1323-1340.
- Sajikumar, N., & Thandaveswara, B. S. (1999). A Nonlinear Rainfall-Runoff Model using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydrology*, 21(6), 3255.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status. *Remote Sensing of Environment*, 79(2-3), 213-224.
- Shen, X., Liu, Y., Liu, B., Zhang, J., Wang, L., Lu, X., & Jiang, M. (2022). Effect of Shrub Encroachment on Land Surface Temperature in Semi-Arid Areas of Temperate Regions of the Northern Hemisphere. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 320, 108943.
- Singh, A. (2022). Soil Salinity: A Global Threat to Sustainable Development. *Journal of Soil Use and Management*, 38(1), 39-67.
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230-244.
- Song, J. (1998). Diurnal Asymmetry in Surface Albedo. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(3), 181-189.
- Suarez-Alvarez, M., Pham, D., Prostov, M., & Prostov, Y. (2012). Statistical Approach to Normalization of Feature Vectors and Clustering of Mixed Datasets. *Royal Society of London Proceedings Series A*, 468, 2630-2651.
- Tashpolat, N., & Rehemani, A. (2025). Monitoring of Soil Salinity in the Weiku Oasis Based on Feature Space Models with Typical Parameters Derived from Sentinel-2 MSI Images. *Land*, 14(2), 251.
- Verstraete, M. M., & Pinty, B. (1996). Designing Optimal Spectral Indices for Remote Sensing Applications. *Journal of Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5), 1254-1265.
- Wang, C., Shi, W., & Lv, H. (2024a). Construction of Remote Sensing Indices Knowledge Graph (RSIKG) Based on Semantic Hierarchical Graph. *Remote Sensing*, 16(1), 158.
- Wang, L., Guo, B., & Zhang, R. (2024b). Change Patterns of Desertification and Its Dominant Influencing Factors in China-Mongolia-Russia Economic Corridor Based on MODIS and Feature Space Model. *Land*, 13(9), 1431.
- Wei, H., Wang, J., & Han, B. (2020). Desertification information extraction along the China-Mongolia railway supported by multisource feature space and geographical zoning modeling. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 392-402.
- Wen, Y., Guo, B., Zang, W., Ge, D., Luo, W., & Zhao, H. (2020). Desertification Detection Model in Naiman Banner Based on the Albedo-Modified Soil Adjusted Vegetation Index Feature Space Using the Landsat-8 OLI Images. *Journal of Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11, 544-558.
- Wicaksono, P., & Hafizt, M. (2017). Dark Target Effectiveness for Dark-Object Subtraction Atmospheric Correction Method on Mangrove Above-Ground Carbon Stock Mapping. *Journal of IET Image Processing*, 12(4), 582-587.
- Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., & Bayer, W. (2006). Development of Topsoil Grain Size Index for Monitoring Desertification in Arid Land using Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2411-2422.
- Xu, D., Kang, X., Qiu, D., Zhuang, D., & Pan, J. (2009). Quantitative Assessment of Desertification using Landsat Data on a Regional Scale: A Case Study in the Ordos Plateau, China. *Journal of Sensors*, 9(3), 1738-1753.
- Zeng, Y. N., Xiang, N. P., Feng, Z. D., & Xu, H. (2006). Albedo-NDVI Space and Remote Sensing Synthesis Index Models for Desertification Monitoring. *Journal of Scientia Geographica Sinica*, 26, 75-81.
- Zhang, Y., Xiang, N., & Feng, Z. (2009). SI-Albedo Space-Based Remote Sensing Synthesis Index Models for Monitoring of Soil Salinization. *Journal of Acta Pedologica Sinica*, 46, 698-703.
- Zhao, Y., Wang, X., Novillo, C. J., Arroigante-Funes, P., Vázquez-Jiménez, R., & Maestre, F. T. (2018). Albedo Estimated from Remote Sensing Correlates with Ecosystem Multifunctionality in Global Drylands. *Journal of Arid Environments*, 157, 116-123.

Zhou, P., Zhao, D., Liu, X., Duo, L., & He, B-J. (2022). Dynamic Change of Vegetation Index and Its Influencing Factors in Alxa League in the Arid Area. *Journal of Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 1-14.