



Detection of desert sand dunes in the Rig Jen area using the normalized Difference excess sand index (NDESI) in Sentinel 2 images and Landsat 8 OLI sensor

Mehdi Feyzolahpour

Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Human Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
feyzolahpour@znu.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol: 16
No: 59
P: 152-170
Received: 2023-08-15
Revised: 2023-09-18
Accepted: 2023-09-23
Published: 2025-05-01

Keywords:

- NDESI
- Sand index
- Sentinel 2
- Landsat 8
- Rig Jen

Cite this Article:

Feyzolahpour, Mehdi. (2025). Detection of desert sand dunes in the Rig Jen area using the normalized Difference excess sand index (NDESI) in Sentinel 2 images and Landsat 8 OLI sensor. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 16(59): 152-170. doi: 10.22034/jargs.2023.409048.1052

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



Abstract

Aim: The purpose of this research is to identify the area of sand dunes and their changes in desert areas using spectral indicators in Landsat 8 and Sentinel 2 satellites.

Material & Method: In this research, using four bands of Sentinel 2 data, a new spectral index named NDESI has been presented for the identification and recognition of sand dunes in the Rig Jen area. This index uses the blue, red, or red edge of vegetation and two short-wave infrared bands, SWIR1 and SWIR2, to produce the image. A threshold calculation method was used to create unique thresholds for each image.

Finding: Based on this, the threshold values for equations 1 and 2 in March and July 2023 of the Sentinel 2 satellite were obtained as 0.261 and 0.217, respectively. This amount for Landsat 8 satellite in 2013, 2018, and 2023 was equal to 0.063, 0.0735, and 0.071, respectively. According to equation 1 of the Sentinel 2 satellite in July 2023, the extent of sand dunes in this area was equal to 2262 square kilometers. For Landsat 8 satellite in the same year, it was 2638 square kilometers. In the discussion of Pearson correlation, it was also observed that the highest correlation of 0.63 between the NDESI index and band 7 of the Landsat 8 satellite and the lowest correlation of -0.14 between this index and band 2 in equation 1 of Sentinel satellite 2 has been.

Conclusion: Finally, the accuracy evaluation of the images obtained from equations 1 and 2 showed an overall accuracy of 87.4 and 83.7 percent, respectively. This index is also compatible with Landsat 8 data.

Innovation: The results of this research have been used in the investigation of sand dunes and their identification.

Extended Abstract

1. Introduction

Coastal and desert sand dunes cover about 20% of the dry areas of the world. Active sand deserts occupy about 10% of the land between 30 degrees north and south latitudes. In some African countries, such as Morocco, 45 to 55 percent of the land is desert, which is spread in its southeastern parts. Since the 1960s, optical images have been widely used for land cover mapping. For land cover detection, processing techniques such as false color composite (FCC), principal component analysis (PCA), minimum noise fraction (MNF), the ratio between bands, and spectral indices have been used. The technique of spectral indices has been widely used to identify land covers. To research and monitor hills and sandy surfaces, remote sensing techniques were developed using the OLI sensor of the Landsat 8 satellite. According to the mentioned cases, the sand dunes of Rig Jen were investigated in this research. In this research, the 20-meter Sentinel 2 data was used to identify desert sand dunes in order to provide a new index called the Normalized Excess Sand Difference Index (NDESI). This index can distinguish between barren soil and sand dunes. This index was adapted to the Landsat 8 OLI meter to track the changes in sand dunes over time. The OLI sensor in Landsat 8 has more image archives than Sentinel 2.

2. Materials and Methods

In this research, two types of images are used. One of these images is related to Sentinel 2 level 2A reflectivity images of the lower atmosphere (BOA), which was produced from Level 1C data and refers to March and July 2023. This image has 13 bands with a resolution of 10 meters, 20 meters, and 60 meters. This research used only four bands to provide a new index. In order to adapt the new index to Landsat 8 images and its effectiveness in examining the changes in sand dunes over time, Landsat 8 OLI sensor images were used in July 2013, 2018, and March 2023. These images have passage number 162 and row 37. These images have 11 bands, but only 4 bands are used. All images are available for free and cover the entire study area, which is free of vegetation and clouds. The last image used in the research was examined on Google Earth to evaluate its accuracy.

3. Results and Discussion

A small change in the number of thresholds can show the area of dunes more or less than usual. The equation for thresholds in Landsat 8 images shows more realistic values. However, this is not seen in the Sentinel images. Therefore, the peak point of spectral reflectance was used to determine the thresholds in Sentinel 2 images. The areas determined based on these thresholds in equation 1 and 2 are very close. For example, in the Sentinel images of March 2023, the area according to equation 1 equals 1101.1 square kilometers, and according to equation 2, it is 1343.6 square kilometers. The total area of the study area in Rig Jen is equal to 3548.27 square kilometers. Therefore, 37.8 percent of the area is covered with sand dunes, which equals 31.01 percent based on equation 1. This shows that the difference between equations 1 and 2 is 79.6%, which is negligible. However, the difference between Sentinel 2 and Landsat images has been significant. According to the images of this satellite, the area of sand dunes in 2023 is equal to 1633.1; in other words, sand dunes occupy 46% of the area of the region, and the difference between Landsat 8 and Sentinel 2 in equation 2 is 8.2%.

4. Conclusions

The normalized difference of excess sand index (NDESI) is a new index for drawing sand dunes, and for this purpose, it uses Sentinel 2 and Landsat 8 images. Due to confounding factors, sand dunes stabilized by dense vegetation may not be recognized and may not be universally applicable. However, this index has performed better in dry and barren lands with active sand dunes. Equations 1 and 2 in Sentinel 2 images assign the highest pixel values to sand, making these areas easily recognizable with the brightest color. Using equation 2 in areas with dense vegetation is better because it can separate vegetation and water from

sand dunes. Based on the presented equations, the NDESI index was matched with Landsat 8 data. Using equation number 3 and Landsat 8 bands, sand dunes were detected in 2013, 2018, and 2023. The limited movement of sand dunes in the studied area was due to the surrounding of this area with mountainous areas. The sand threshold calculation technique allows choosing the correct threshold for each equation and each image. The thresholds obtained from the data of Sentinel 2 and Landsat 8 images have achieved acceptable results.


5. Acknowledgement & Funding

- The authors are thankful to all interview participants for supporting this research.
- The manuscript did not receive a grant from any organization

6. Conflict of Interest

- The authors declare no conflict of interest.

تشخیص تپه‌های شنی بیابانی منطقه ریگ جن با بهره‌گیری از شاخص نرمال شده تفاوت مازاد شن و ماسه (NDESI) در تصاویر سنتینل ۲ و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸

مهدی فیض‌اله‌پور 

نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. feyzolahpour@znu.ac.ir

چکیده:

هدف: هدف از این تحقیق شناسایی پهنه تپه‌های شنی و روند تغییرات آن در نواحی بیابانی با استفاده از شاخص‌های طیفی در ماهواره‌های لندست ۸ و سنتینل ۲ است.

روش و داده: در این تحقیق با بهره‌گیری از چهار باند از داده‌های سنتینل ۲، شاخص طیفی جدیدی با نام NDESI برای شناسایی و تشخیص تپه‌های شنی در منطقه ریگ جن ارائه گردیده است. این شاخص، از باند آبی، قرمز یا لبه قرمز پوشش گیاهی و دو باند مادون قرمز موج کوتاه SWIR1 و SWIR2 برای تولید تصویر استفاده کرده است. برای ایجاد آستانه‌های منحصر به فرد برای هر تصویر از یک روش محاسبه آستانه استفاده شد.

یافته‌ها: بر این اساس میزان آستانه برای معادله ۱ و ۲ در ماه مارس و جولای ۲۰۲۳ ماهواره سنتینل ۲ به ترتیب ۰/۲۶۱ و ۰/۲۱۷ به دست آمد. این میزان برای ماهواره لندست ۸ در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ به ترتیب معادل ۰/۰۶۳، ۰/۰۷۳۵ و ۰/۰۷۱ بوده است. وسعت تپه‌های شنی در این منطقه بر اساس معادله ۱ ماهواره سنتینل ۲ در ماه جولای ۲۰۲۳ معادل ۲۲۶۲ کیلومتر مربع بوده و برای ماهواره لندست ۸ در همین سال به میزان ۲۶۳۸ کیلومتر مربع به دست آمد. در بحث همبستگی پیرسون نیز مشاهده شد که بیشترین همبستگی به میزان ۰/۶۳ بین شاخص NDESI و باند ۷ ماهواره لندست ۸ برقرار بوده و کمترین میزان همبستگی نیز به میزان ۰/۱۴- بین این شاخص و باند ۲ در معادله ۱ ماهواره سنتینل ۲ مشاهده شده است.

نتیجه‌گیری: در نهایت، ارزیابی دقت بر روی تصاویر حاصل از معادلات ۱ و ۲، دقت کلی ۸۷/۴ و ۸۳/۷ درصد را نشان داد. این شاخص با داده‌های لندست ۸ نیز سازگار بوده است.

نوآوری، کاربرد نتایج: از نتایج این تحقیق در بررسی تپه‌های شنی و شناسایی آن‌ها استفاده شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:	۱۶
دوره:	۵۹
صفحه:	۱۷۰-۱۵۲
تاریخ دریافت:	۱۴۰۲/۰۵/۲۴
تاریخ ویرایش:	۱۴۰۲/۰۶/۲۷
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۲/۰۷/۰۱
تاریخ انتشار:	۱۴۰۴/۰۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- شاخص شن و ماسه
- شاخص تفاوت نرمال شده مازاد شن و ماسه
- سنتینل ۲
- لندست ۸
- ریگ جن

نحوه ارجاع به این مقاله:

فیض‌اله‌پور، مهدی. (۱۴۰۴). تشخیص تپه‌های شنی بیابانی منطقه ریگ جن با بهره‌گیری از شاخص نرمال شده تفاوت مازاد شن و ماسه (NDESI) در تصاویر سنتینل ۲ و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۶(۵۹): ۱۷۰-۱۵۲.
doi: 10.22034/jargs.2023.409048.1052

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).

۱- مقدمه

تپه‌های ماسه‌ای ساحلی و بیابانی حدود ۲۰ درصد از مناطق خشک جهان را پوشش می‌دهند. بیابان‌های شنی فعال حدود ۱۰ درصد از زمین‌های بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی و جنوبی را اشغال کرده‌اند (Sarnthein, 1978). در برخی از کشورهای آفریقایی مانند مراکش ۴۵ تا ۵۵ درصد زمین‌ها را بیابان تشکیل داده که در بخش‌های جنوب شرقی آن گسترش یافته است (Mokhtari et al., 2013). از دهه ۶۰ میلادی، تصاویر نوری به طور گسترده برای نقشه‌برداری پوشش زمین استفاده شده است. برای تشخیص پوشش زمین، تکنیک‌های پردازشی از قبیل ترکیب رنگ کاذب (FCC)، تجزیه و تحلیل اجزای اصلی (PCA)، کسر حداقل نویز (MNF)، نسبت بین باندها و شاخص‌های طیفی به کار گرفته شده‌اند. از تکنیک شاخص‌های طیفی به طور گسترده برای شناسایی پوشش‌های زمین استفاده شده است.

محققان مختلفی شاخص‌هایی را برای تشخیص پوشش گیاهی (Jordan, 1969., Rouse et al., 1974., Huete, 1988., et al., 1996 Roy, Zhao & Chen.,) پهنه‌های آبی (Gao, 1996., Han-Qiu, 2005., Feyisa et al., 2014) و خاک بایر (2005., Rasul et al., 2018., Nguyen et al., 2021) ایجاد کرده‌اند.

برای تحقیق و نظارت بر تپه‌ها و سطوح شنی تکنیک‌های سنجش از دوری با استفاده از سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ توسعه داده شدند. فادهیل با استفاده از داده‌های سنجنده TM ماهواره لندست، دو شاخص شن و ماسه را پیشنهاد کردند (Fadhil, 2009, 2013). عبدال لویی و همکاران با استفاده از سنجنده MSS ماهواره لندست و داده‌های سنجنده TM و ETM، شاخص IVS را ارائه کردند. این شاخص، تصاویر را بر اساس چهار رنگ تولید می‌کند که در آن رنگ سیاه برای نمایش پوشش گیاهی، خاکستری تیره برای شن و ماسه مرطوب، خاکستری روشن برای ساختمان‌ها و سایه سفید روشن برای سطوح شنی خشک استفاده شده است (Abdellaoui et al., 2010). دنگ و همکاران از شاخص تفاوت نرمال شده خاک برای ساختن نسبت شاخص تفاوت نرمال شده خاک (RNDI) استفاده کردند (Deng et al., 2015). پان و همکاران یک شاخص تفاوت نرمال شده شن را پیشنهاد کردند که می‌توانست بر اساس تصاویر لندست ۸، ماسه را از خاک تفکیک نماید (Pan et al., 2018). ساهار و همکاران با استفاده از سنجنده‌های TM، ETM و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، شاخص جدیدی را برای تشخیص شن و ماسه ارائه کردند. این شاخص با عنوان شاخص تفاوت نرمال شده زمین‌های شنی (NDSLII) شناخته شده و در محدوده بین ۱ و -۱ قرار می‌گیرد. مقادیر کمتر از صفر نشان‌دهنده پهنه‌های شنی بوده است (Sahar et al., 2021).

با وجود پیشرفت تکنیک‌های شناسایی و پایش تپه‌های شنی، برخی از چالش‌ها همچنان حل نشده باقی مانده‌اند (Hugenholtz et al., 2012). یکی از این مشکلات مربوط به پیکسل‌های مختلط است. یک پیکسل ممکن است حاوی پاسخ طیفی مشترکی از شن و پوشش گیاهی باشد. این امر ممکن است عوارض دیگری را به جای ماسه نمایش دهد. دومین مشکل در این است که تأثیر توپوگرافی و تپه‌های سایه‌دار با تکنیک‌های سنجش از دور شناسایی نمی‌شوند. شناسایی مرزهای تپه‌های ماسه‌ای امری چالش‌برانگیز است. وضوح تصاویر باید به گونه‌ای باشد که مرز تپه‌های شنی را به درستی نمایش دهد. تپه‌هایی که توسط پوشش گیاهی تثبیت شده‌اند نسبت به تپه‌های برهنه، تیره‌تر به نظر می‌رسند. این شاخص در زمین‌های خشک و برهنه‌ای که دارای تپه‌های شنی فعال هستند به شکل بهتری عمل می‌کند. لکوج و همکاران از تصویر سنجنده ETM ماهواره لندست در سال ۲۰۰۰ برای استخراج اطلاعات در زمینه اشکال، جهات و ارتباط بین تپه‌های شنی استفاده کردند. این محققین از GIS برای بررسی تصاویر Google Earth در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ برای بررسی حرکت تپه‌های ماسه‌ای بهره گرفتند. نتایج نشان داد که تپه‌های شنی در این بازه زمانی ۳۲ متر حرکت کرده‌اند (Dakir et al., 2016). عدنانی و همکاران از نسبت باندها ۳/۱، ۵/۷، ۶/۴ سنجنده TM ماهواره لندست و نسبت باندها ۲/۱ ASTER استفاده کردند تا تفاوت رنگ تپه‌های شنی در منطقه ارفود را بررسی نمایند (Adnani et al., 2016). آیدا و همکاران از داده‌های لندست ۵ و ۷ در بازه زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۱ برای ارزیابی تکامل تپه‌ها در حوضه ترفایا استفاده کردند. این محققان برای تمایز بین تپه‌های شنی و سایر سازندها از روش حداکثر احتمال، حداقل فاصله و ماشین بردار پشتیبانی استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده توسعه سطح ماسه بوده است (Aydda et al., 2019). آیدا و همکاران روشی را برای استخراج تپه‌های شنی از داده‌های سنتینل ۲ پیشنهاد کردند. این تکنیک مبتنی بر شاخص‌های طیفی و طبقه‌بندی بدون نظارت است. با در دسترس بودن ابزارهای محاسباتی قدرتمند و توسعه الگوریتم‌های یادگیری مبتنی بر ماشین بردار پشتیبانی و هوش

مصنوعی، در تحقیقات مختلفی دینامیک تپه‌های شنی مورد بررسی قرار گرفته است (Aydda et al., 2020). هورال و همکاران برای پیش‌بینی حرکت تپه‌های شنی، شاخص GAN را پیشنهاد کردند (Horrall et al., 2019). کوچانسکی و همکاران برای پیش‌بینی حرکت تپه‌های شنی از الگوریتم یادگیری GAN و CNN استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم GAN در پیش‌بینی حرکت تپه‌های ماسه‌ای به نتایج بهتری دست یافته است (Kochanski et al., 2019). دینگ و همکاران با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ و لندست ۸ الگوهای مکانی و زمانی حرکت تپه‌های شنی را در شمال غربی چین بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیابان‌زایی در منطقه به سرعت در حال گسترش بوده و الگوی جابجایی تپه‌ها با تغییرات شرایط جوی محلی سازگار است (Ding et al., 2020). عبدالکریم و همکاران برای شناسایی و پایش لندفرم‌های فعال و غیرفعال در بیابان‌های عربستان از ماهواره‌های سنجش از دور نوری و راداری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مورفولوژی و گسترش تپه‌های شنی به جای فعالیت‌های انسانی از توپوگرافی، شیب و جهت باد تبعیت کرده است (Abdelkareem et al., 2020). محمدپور و عشقی‌زاده با بهره‌گیری از روش‌های نزدیک‌ترین همسایه، درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبانی، الگوریتمی را برای نمایش تپه‌های شنی ارائه کردند. تکنیک شاخص‌های طیفی با بهره‌گیری از چندین باند طیفی و بر اساس معادلات ریاضی تصاویری را تولید کرده و سپس برای تشخیص تپه‌های شنی، آستانه یا محدوده‌ای از مقادیر را معرفی می‌کنند (Mohammadpoor & Eshghizadeh, 2021). زنگ و همکاران برای بررسی تپه‌های ماسه بادی از تکنیک‌های سنجش از دور استفاده کردند. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های تشخیص تغییر به خوبی حرکت تپه‌ها را نمایش می‌دهد (Zheng et al., 2022). شاخص‌های توسعه یافته قبلی منحصراً برای داده‌های لندست ایجاد شده‌اند و تشخیص شن و ماسه را در وضوح ۳۰ متر محدود می‌سازند. اراضی بایر و سطوح ماسه‌ای اغلب در تصاویر خروجی شاخص‌های قبلی با یکدیگر اشتباه گرفته می‌شوند. برای تپه‌های شنی، آستانه‌های طیفی کمتر از صفر در نظر گرفته می‌شد که این امر منجر به ارائه نتایج نادرست و اغراق‌آمیز می‌شد (Xu, 2006).

با توجه به موارد ذکر شده، در این تحقیق تپه‌های شنی ریگ جن مورد بررسی قرار گرفتند. در این تحقیق برای تشخیص تپه‌های ماسه‌ای بیابانی، داده‌های ۲۰ متری سنتینل ۲ به کار گرفته شد تا شاخص جدیدی با عنوان شاخص تفاوت نرمال شده شن و ماسه مزاد (NDESI) ارائه گردد. این شاخص می‌تواند بین خاک بایر و تپه‌های شنی تمایز قائل شود. این شاخص برای ردیابی تغییرات تپه‌های شنی در طول زمان با سنجنده OLI لندست ۸ تطبیق داده شد. سنجنده OLI در لندست ۸ نسبت به سنتینل ۲ دارای آرشو تصاویر بیشتری است.

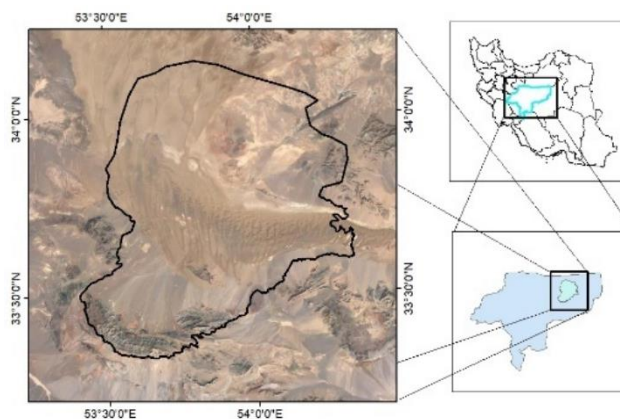
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ریگ جن منطقه‌ای کویری در بخش مرکزی ایران بوده و در جنوب سمنان، شرق دریاچه نمک، شمال انارک و غرب جندق واقع شده است. توده بادرفتی گسترده‌ای در شمال انارک گسترده شده که با عنوان ریگ جن شناخته می‌شود. این منطقه کویری بوده و پر از تپه‌های شنی و باتلاق‌های نمکی است. وسعت این منطقه ۳۵۴۸/۲۷ کیلومتر مربع است. هیچگونه منبع آبی در منطقه مشاهده نشده است. پیدایش این منطقه به رسوبات تبخیری دوره میوسن و مخروط افکنه‌های دامنه جنوبی البرز مربوط بوده و در اثر بادهای محلی شکل گرفته‌اند. جهت وزش این بادهای از شمال شرق به جنوب غرب بوده است. قسمت کف این ریگ یک دشت گسترده فرسایش یافته بوده و بخش شمالی آن به دشت‌های کویری متصل می‌گردد (Fatahi et al., 2017).

۲-۲- روش پژوهش

تاکنون شاخص‌های مختلفی برای تشخیص تپه‌های شنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عمدتاً بر پایه سنجنده‌های مختلف ماهواره لندست بوده است. لذا باندهای مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. لیکن در این شاخص‌ها از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ استفاده نشده است. در زیر شاخص‌های پیشنهاد شده توسط متخصصان مختلف ارائه شده است (جدول ۱).



شکل ۱. موقعیت ریگ جن در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. شاخص‌های تشخیص شن و ماسه بر اساس داده‌های لندست

سنجنده	معادله	پیشنهاد کننده	شاخص
TM لندست	$\frac{(red - SWIR2)}{(red + SWIR2)}$	فادهیل (۲۰۰۹)	تفاوت نرمال شده تپه‌های شنی (NDSDI)
TM لندست	$\frac{(SWIR2 - red)}{(SWIR2 + red)}$	فادهیل (۲۰۱۳)	تفاوت نرمال شده شن (NDSI)
	$RNSDI = \left(\frac{NDSI - NDSImin}{NDSImax - NDSImin} \right) - \left(\frac{TCl - TClmin}{TClmax - TClmin} \right)$	دانگ و همکاران (۲۰۱۵)	شاخص نسبت تفاوت نرمال شده خاک (RNSDI)
OLI لندست	$\frac{(B4 - B1)}{(B4 + B1)}$	پن و همکاران (۲۰۱۸)	تفاوت نرمال شده شن
OLI لندست	$\frac{(SWIR1 - green)}{(SWIR1 + green) - NDVI}$	رسول و همکاران (۲۰۱۸)	شاخص خاک بایر (DBSI)
ETM، TM و OLI	$\frac{(red - SWIR1)}{(red + SWIR1)}$	سahار و همکاران (۲۰۲۱)	تفاوت نرمال شده زمین‌های ماسه‌ای (NDSL I)

در این تحقیق از دو نوع تصویر استفاده شده است. یکی از این تصاویر مربوط به تصاویر بازتابی سنتینل ۲ سطح 2A از سطوح پایین جو (BOA) بوده که از داده‌های Level IC تولید شده و به ماه مارس و جولای ۲۰۲۳ اشاره داشته است. این تصویر دارای ۱۳ باند با وضوح ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر است (Drusch et al., 2012). در این تحقیق برای ارائه یک شاخص جدید تنها از ۴ باند بهره گرفته شد. برای انطباق شاخص جدید با تصاویر لندست ۸ و کارایی آن در بررسی تغییرات تپه‌های شنی در طول زمان از تصاویر سنجنده OLI لندست ۸ در جولای ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و مارس ۲۰۲۳ استفاده شد (جدول ۲). این تصاویر دارای شماره گذر ۱۶۲ و ردیف ۳۷ هستند. این تصاویر دارای ۱۱ باند بوده‌اند لیکن تنها ۴ باند مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمامی تصاویر به صورت رایگان از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا به نشانی earthexplorer.gov.us قابل دسترس بوده و تمام منطقه مورد مطالعه را پوشش داده و فاقد پوشش گیاهی و ابر هستند.

جدول ۲. خصوصیات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در پردازش تپه‌های شنی منطقه ریگ جن

نام ماهواره	تاریخ تصویربرداری	سنجنده	درصد پوشش ابر	زاویه آزیموت
سنتینل ۲	۲۰۲۳/۳/۷	MSI	۳/۰۹	۱۵۲/۰۳
	۲۰۲۳/۷/۸	MSI	۰/۰۱۴	۱۲۱/۹۸
لندست ۸	۲۰۱۳/۷/۱۶	OLI	۰	۱۱۵/۰۰۶
	۲۰۱۸/۷/۱۴	OLI	۰	۱۱۳/۴۲
	۲۰۲۳/۳/۳۰	OLI	۱/۲۵	۱۴۴/۶۹

در این تحقیق از ۱۲ باند داده Sentinel-2L2A، تنها از ۴ باند استفاده شد. باندهای آبی (۴۹۲ نانومتر)، قرمز (۶۶۴ نانومتر) یا باند لبه قرمز پوشش گیاهی (۷۸۲ نانومتر) و دو باند SWIR (۱۶۱۳ و ۲۲۰۲ نانومتر) با وضوح تصویر ۲۰ متر برای پردازش تصاویر در نظر گرفته شدند (جدول ۳).

جدول ۳. باندهای ماهواره سنتینل ۲ و لندست ۸. باندهای استفاده شده در این تحقیق با * مشخص شده‌اند.

ماهواره لندست ۸				ماهواره سنتینل ۲			
طول موج به نانومتر	توان تفکیک به متر	محدوده طیفی	باند	طول موج به نانومتر	توان تفکیک به متر	محدوده طیفی	باند
۴۴۳	۳۰	گرد و غبار و سواحل	۱	۴۴۲/۷	۶۰	گرد و غبار و سواحل	۱
۴۸۲/۵	۳۰	آبی	* ۲	۴۹۲/۴	۱۰	آبی	* ۲
۵۶۲/۵	۳۰	سبز	۳	۵۵۹/۸	۱۰	سبز	۳
۶۵۵	۳۰	قرمز	* ۴	۶۶۴/۶	۱۰	قرمز	* ۴
۸۶۵	۳۰	NIR	۵	۷۰۴/۱	۲۰	NIR1	۵
۱۶۱۰	۳۰	SWIR1	* ۶	۷۲۰/۵	۲۰	NIR2	۶
۲۲۰۰	۳۰	SWIR2	* ۷	۷۸۲/۸	۲۰	NIR3	* ۷
۵۹۰	۱۵	پانکروماتیک	۸	۸۳۲/۸	۱۰	NIR	۸
۱۳۷۵	۳۰	سیروس	۹	۸۶۴/۷	۲۰	لبه قرمز پوشش گیاهی	a8
۱۰۹۰۰	۱۰۰	مادون قرمز حرارتی ۱	۱۰	۹۴۵/۱	۶۰	بخار آب	۹
۱۲۰۰۰	۱۰۰	مادون قرمز حرارتی ۲	۱۱	۱۳۷۳/۵	۶۰	ابر سیروس	۱۰
				۱۶۱۳/۷	۲۰	SWIR1	* ۱۱
				۲۲۰۲/۴	۲۰	SWIR2	* ۱۲

شاخص تفاوت نرمال شده شن و ماسه مازاد (NDESI) مبتنی بر معادله ریاضی ساده‌ای است که بر اساس چهار باند طراحی شده است. انتخاب باند بر اساس رفتار طیفی تپه‌های ماسه‌ای در محدوده قابل مشاهده تا مادون قرمز موج کوتاه است. سطوح شنی بیشترین بازتاب را در محدوده ۷۰۰ نانومتر تا ۲۲۰۰ نانومتر (باند ۵ تا باند ۱۲) داشته و در باند 8a در محدوده ۸۶۴ نانومتر میزان جذب قابل توجهی را دارا است. مقادیر بازتاب از ۴۹۲/۴ نانومتر در باند ۲ به ۷۸۲/۸ نانومتر در باند ۷ به شدت افزایش می‌یابد. این ویژگی‌ها قابلیت باند ۲ و ۷ را در نمایان ساختن تپه‌های شنی نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که باندهای SWIR با افزایش کنتراست در تپه‌های ماسه‌ای، تشخیص آن‌ها را آسان‌تر می‌کند. مشخصه‌های طیفی شن و ماسه اندکی مشابه رسوبات آبرفتی است؛ لیکن هر دو نسبت به سایر پدیده‌ها، دارای مشخصه‌های طیفی متفاوت هستند. معادله NDESI به صورت زیر بیان می‌گردد (Marzouki et al., 2022):

$$NDESI (sentinel) = \left(\frac{p \text{ band7} - p \text{ band2}}{p \text{ band7} + p \text{ band2}} \right) - \left(\frac{p \text{ band12} - p \text{ band11}}{p \text{ band12} + p \text{ band11}} \right) \quad \text{رابطه (۱)}$$

باند ۷ را می‌توان با باند ۴ جایگزین کرد. این باند به پوشش گیاهی و آب حساس‌تر است. ویژگی جذبی آب و پوشش گیاهی در باند ۴ کنتراست بیشتری را به تصویر خروجی افزوده و باعث می‌شود تپه‌های شنی به راحتی در مناطق با پوشش گیاهی زیاد قابل تشخیص باشند (Marzouki et al., 2022):

$$NDESI (sentinel) = \left(\frac{p \text{ band4} - p \text{ band2}}{p \text{ band4} + p \text{ band2}} \right) - \left(\frac{p \text{ band12} - p \text{ band11}}{p \text{ band12} + p \text{ band11}} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

برای تطبیق این شاخص با داده‌های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، باندهای ۱۱ و ۱۲ در معادله قبلی با باندهای ۶ و ۷ جایگزین شده و معادله به صورت زیر بازنویسی گردید (Marzouki et al., 2022):

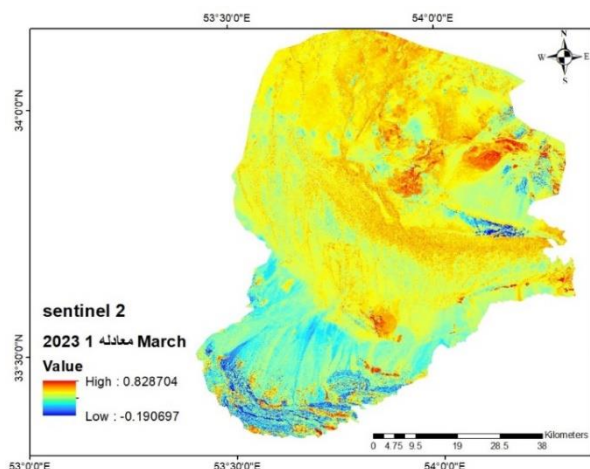
$$NDESI (landsat) = \left(\frac{p \text{ band4} - p \text{ band2}}{p \text{ band4} + p \text{ band2}} \right) + \left(\frac{p \text{ band7} - p \text{ band6}}{p \text{ band7} + p \text{ band6}} \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

برای ایجاد نمودار طیفی برای داده‌های سنتینل ۲ از نرم‌افزار Origin 8 استفاده شده و نمودار پراکنش ترسیم شد. با توجه به این که تصویر خروجی هر شاخص دارای مقادیر حداقل و حداکثر بوده و مقادیر از یک تصویر به تصویر دیگر تغییر می‌کنند چنین تکنیکی منجر به شناسایی تپه‌های شنی می‌گردد. برای غلبه بر مشکل تعیین آستانه، معادله ساده‌ای ایجاد شده که مقادیر حداقل و حداکثر هر تصویر را در نظر گرفته و آستانه صحیحی را برای تصاویر فراهم می‌کند (Marzouki et al., 2022):

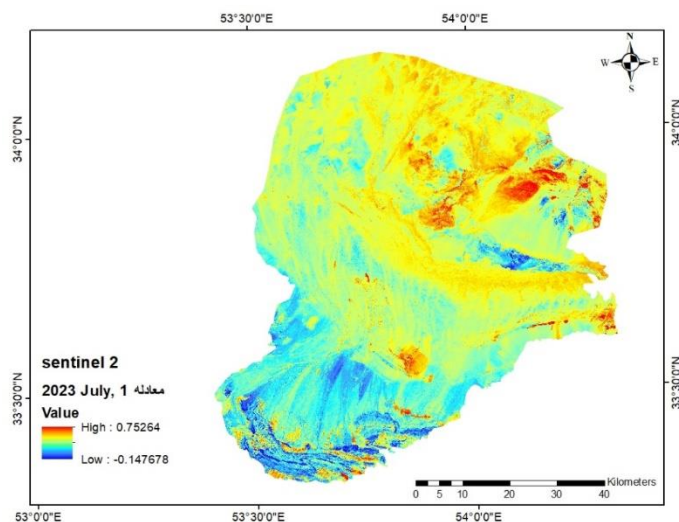
$$Sand_{Th} = Vmax - [a \times (Vmax - Vmin)] \quad \text{رابطه (۴)}$$

۳- یافته‌ها

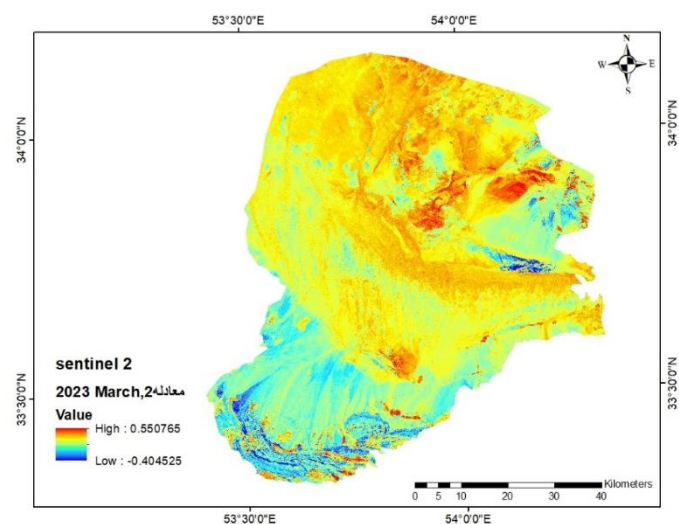
یکی از راه‌های تشخیص تپه‌های شنی در نواحی بیابانی استفاده از باندها و شاخص‌های طیفی است تا بدین وسیله بر اساس وضعیت بازتابی بتوان تپه‌های شنی را رصد نمود. به علت پهنه وسیع این پهنه‌ها و صعب‌العبور بودن این نواحی بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای بررسی آن‌ها را آسان می‌سازد. یکی از این شاخص‌های طیفی شاخص NDESI است. برای اولین بار این شاخص توسط مرزوقی و دریدی برای بررسی تپه‌های شنی در کشور مراکش استفاده شد (Marzouki et al., 2022). لیکن برای بررسی این شاخص از معادلات مختلفی استفاده شد که بحث کامل آن در تحقیق انجام شده توسط مرزوقی و دریدی موجود است (Marzouki et al., 2022). مقادیر خروجی شاخص NDESI برای هر سه معادله با در نظر گرفتن بازتاب صفر تا ۱۰۰ درصد در محدوده ۲- تا ۲ قرار دارد. با این حال در اکثر موارد و در مناطق خشک این مقادیر بین ۱- تا ۱ واقع شده است. این مقادیر تقریبی بوده و مرتبط با تصویر هستند. این مقادیر از یک منطقه تا منطقه دیگر تغییر خواهد کرد. مقادیر NDESI از یک منطقه با پیکسل‌های تیره تا منطقه‌ای با پیکسل‌های روشن متفاوت خواهد بود. مقادیر NDESI مستقیماً با مقدار بازتاب سطحی هر پیکسل در هر باند و مقادیر حداقل و حداکثر ثبت شده توسط سنجنده در تمام تصاویر مرتبط است. در حالت کلی کمترین مقادیر این شاخص در رنگ آبی ظاهر شده و نشان‌دهنده مناطق فاقد تپه شنی است. همچنین رنگ‌های آبی روشن به نهشته‌های مارن و سنگ آهک و رنگ زرد روشن به رسوبات ماسه سنگ قرمز رنگ و رسوبات ابرفتی اختصاص دارد. در نهایت، بالاترین مقادیر این شاخص که در درخشان‌ترین پیکسل‌ها ظاهر می‌شوند منحصرأً به تپه‌های شنی مرتبط است. شاخص NDESI در معادله ۲ نتایج قابل مقایسه‌ای را با معادلات قبلی به دست آورده و پوشش گیاهی با مقادیر بازتابی کمتر با مقادیر آب اشتباه گرفته می‌شود. سازندهای مارنی و سنگ آهک با رنگ آبی تیره نشان داده شده‌اند (شکل ۲ تا ۵). البته این نشان‌دهنده وضعیت کلی این شاخص در نقاط جغرافیایی مختلف بوده و تنها اختصاص به این منطقه نداشته است. منطقه مورد مطالعه در ریگ جن فاقد هر نوع پوشش گیاهی و پهنه آبی است.



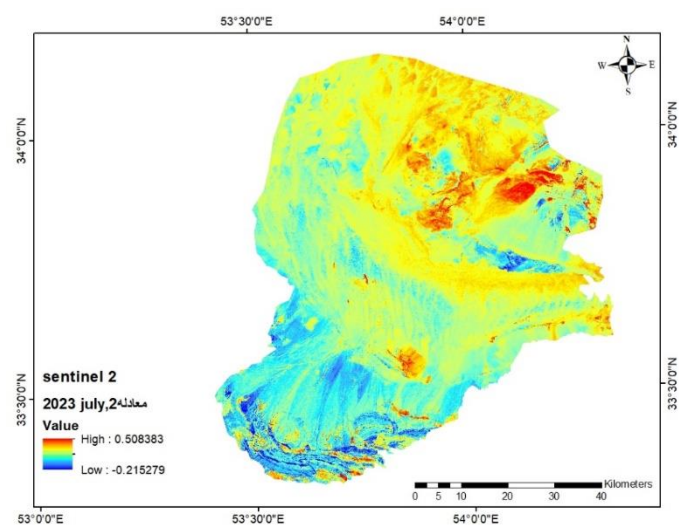
شکل ۲. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۱ برای ماه مارس ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲



شکل ۳. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۱ برای ماه جولای ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲

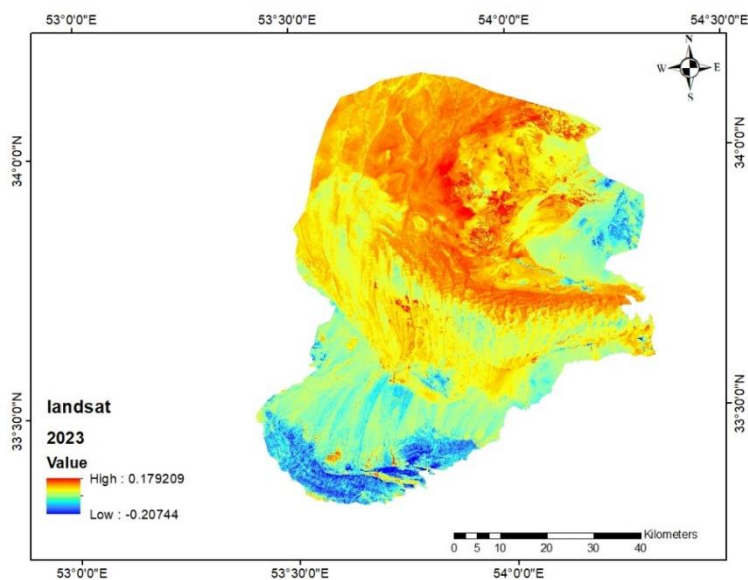


شکل ۴. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۲ برای ماه مارس ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲

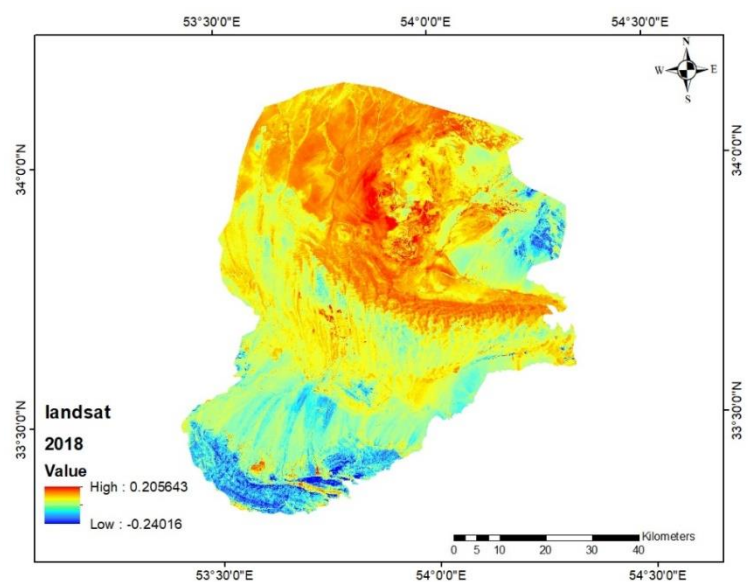


شکل ۵. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۲ برای ماه جولای ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲

شاخص NDESI در تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، تصاویری با وضوح ۳۰ متر تولید می‌کند (شکل ۶ تا ۸). از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ تپه‌های ماسه‌ای از ۲۸۷۳ کیلومتر مربع به ۲۶۳۸ کیلومتر مربع کاهش یافته است. البته این میزان کاهش قابل توجه نیست. بادهای چند جهت به طور قابل توجهی در جابجایی تپه‌های شنی به سمت معادن نقش دارند. در بخش جنوبی این تپه‌های شنی معدن سرب و روی نخلک واقع شده است. از آنجایی که تصاویر سنتینل ۲ در دسترس هستند ردیابی تغییرات تپه‌های شنی با وضوح بسیار بالا (۲۰ متر) در شاخص NDESI امکان‌پذیر بوده است.

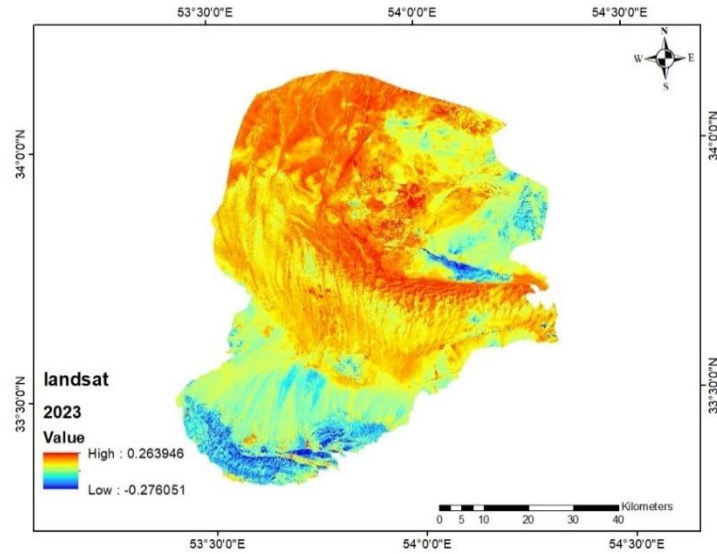


شکل ۶. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۳ برای سال ۲۰۱۳ در تصاویر لندست ۸



شکل ۷. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۳ برای سال ۲۰۱۸ در تصاویر لندست ۸

برای محاسبه آستانه پیشنهادی در معادله ۴، مقادیر حداقل و حداکثر یک تصویر در معادله وارد شده و ضریب از پیش تعریف شده‌ای برای آستانه‌های منحصر به فرد اعمال می‌گردد. این تکنیک قابل اعتمادتر و دقیق‌تر از آستانه‌های ثابت است. مقادیر آستانه‌های فوق در جدول ۴ ارائه شده است.

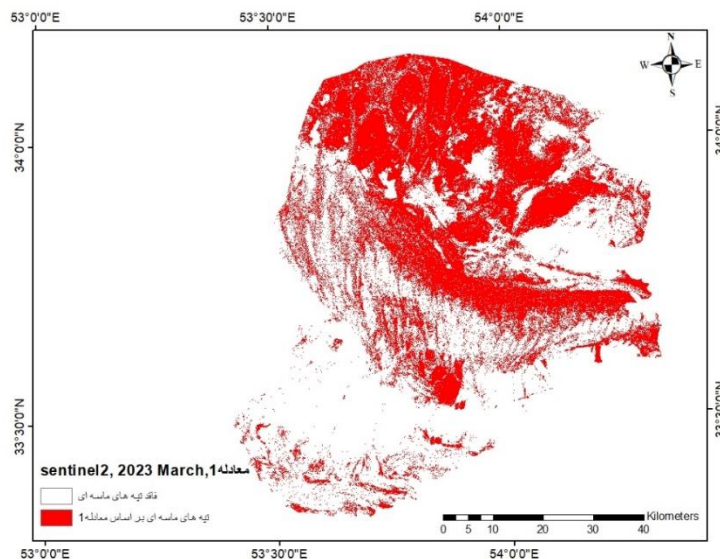


شکل ۸. تصاویر NDESI بر اساس معادله ۳ برای سال ۲۰۲۳ در تصاویر لندست ۸

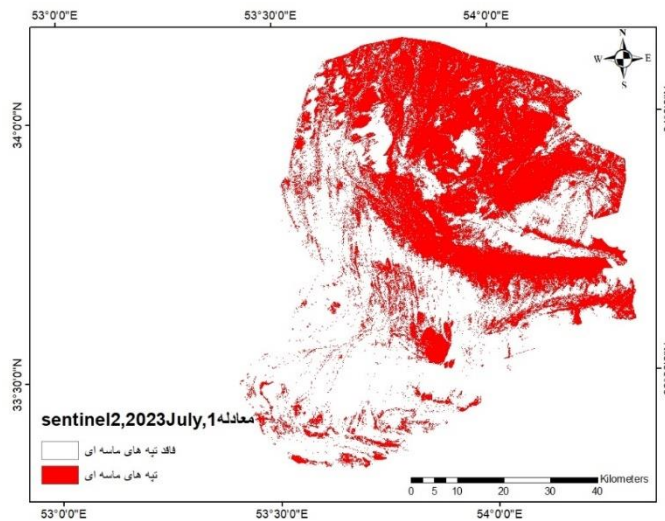
جدول ۴. آستانه‌های شناسایی شده برای تشخیص تپه‌های شنی در ماهواره سنتینل ۲ و لندست ۸

Sand Th	Vmax	Vmin	معادله	ماه و روز	سال	ماهواره
۰/۲۶۱۱	۰/۸۲۸۷	-۰/۱۹۰۶	۱	۵ مارس	۲۰۲۳	سنتینل ۲
۰/۲۱۷	۰/۵۵۰۷	-۰/۴۰۴۵	۲	۵ مارس	۲۰۲۳	
۰/۲۶۱۱	۰/۷۵۲۶	-۰/۱۴۷۶	۱	۸ جولای	۲۰۲۳	
۰/۲۱۷	۰/۵۰۸۳	-۰/۲۱۵۲	۲	۸ جولای	۲۰۲۳	
-۰/۰۶۳	-۰/۱۵۸۸	-۰/۲۰۷۴	۳	۱۶ جولای	۲۰۱۳	لندست ۸
۰/۰۷۳۵	۰/۱۷۸۸	-۰/۲۴۰۱	۳	۱۴ جولای	۲۰۱۸	
۰/۰۷۱	۰/۲۶۳۹	-۰/۲۷۶	۳	۳۰ مارس	۲۰۲۳	

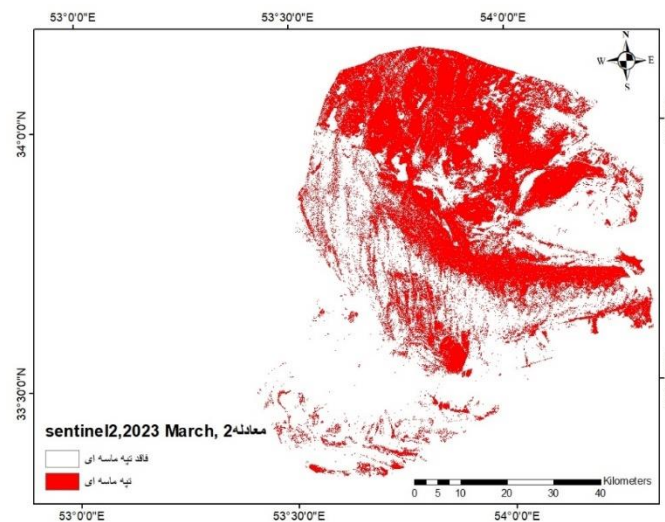
نقشه‌های تولید شده بر اساس آستانه‌های فوق طبقه‌بندی شده و مساحت تپه‌های شنی در آن‌ها برآورد شد (شکل ۹ تا ۱۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد که مساحت‌های تعیین شده بر اساس تصاویر لندست ۸ بیشتر از مساحت‌های تعیین شده در تصاویر سنتینل ۲ است. یکی از علل اصلی این پدیده مربوط به آستانه‌های تعیین شده است.



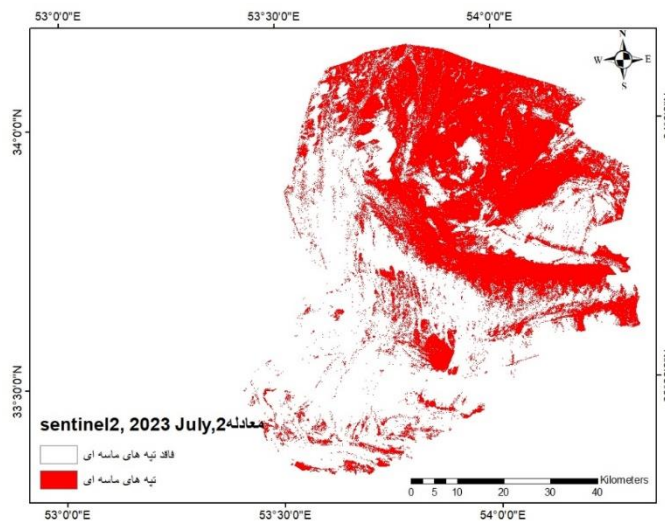
شکل ۹. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۱ برای ماه مارس ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲



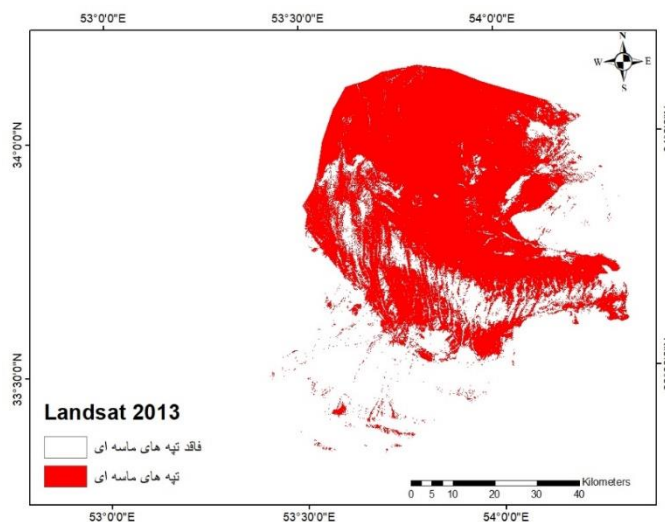
شکل ۱۰. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۱ برای ماه جولای ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲



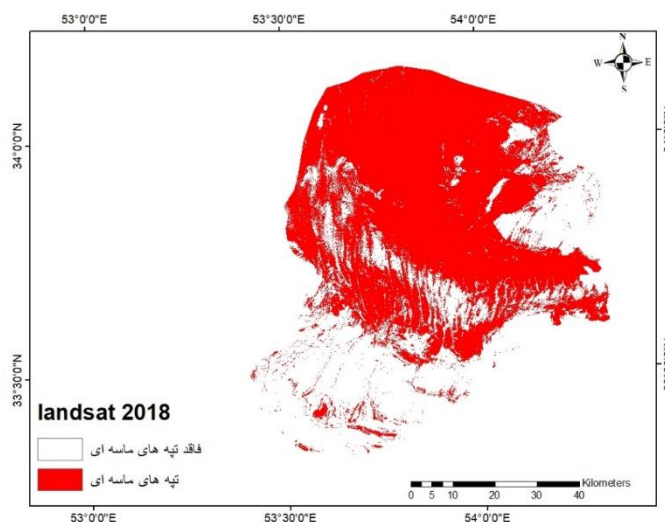
شکل ۱۱. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۲ برای ماه مارس ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲



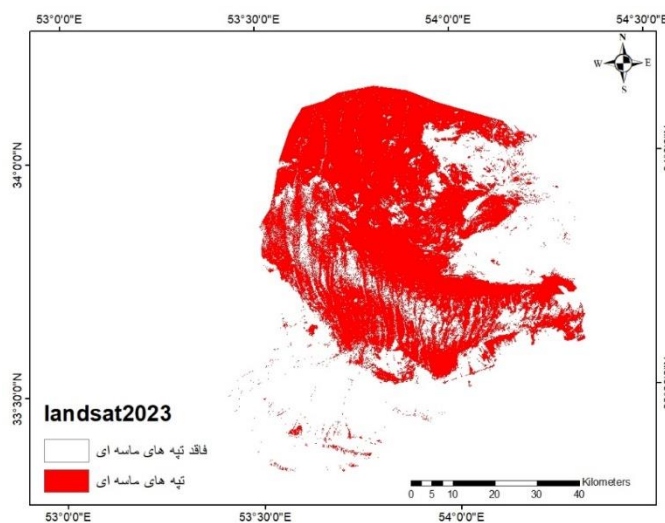
شکل ۱۲. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۲ برای ماه جولای ۲۰۲۳ در تصاویر سنتینل ۲



شکل ۱۳. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۳ برای سال‌های ۲۰۱۳ در تصاویر لندست ۸



شکل ۱۴. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۳ برای سال‌های ۲۰۱۸ در تصاویر لندست ۸



شکل ۱۵. تصاویر طبقه‌بندی شده NDESI بر اساس معادله ۳ برای سال ۲۰۲۳ در تصاویر لندست ۸

تغییر اندک در میزان آستانه‌ها می‌تواند مساحت تپه‌های شنی را بیشتر یا کمتر از حد معمول نشان دهد. معادله مربوط به آستانه‌ها در تصاویر لندست ۸ مقادیر واقع‌بینانه‌تری را نشان می‌دهد. لیکن این امر در تصاویر سنتینل مشاهده نمی‌شود؛ لذا برای تعیین آستانه‌ها در تصاویر سنتینل ۲ از نقطه اوج بازتاب طیفی استفاده شد. مساحت‌های تعیین شده بر اساس این آستانه‌ها در معادله ۱ و ۲ بسیار نزدیک به هم هستند. برای مثال در تصاویر سنتینل مربوط به ماه مارس ۲۰۲۳ مساحت بر اساس معادله ۱ برابر با ۲۱۱۶ کیلومتر مربع بوده و بر اساس معادل ۲ ۲۰۵۲ کیلومتر مربع بوده است. کل مساحت منطقه مورد مطالعه در ریگ جن معادل ۵۱۲۶ کیلومتر مربع است؛ لذا ۴۰/۰۳٪ از منطقه با تپه‌های شنی پوشانده شده است. لیکن این میزان بر اساس معادله ۱ برابر با ۴۱/۲۷ درصد است. این امر نشان می‌دهد که اختلاف بین معادله ۱ و ۲ در حد ۱/۲۴ درصد بوده که قابل چشم‌پوشی است. لیکن تفاوت بین تصاویر سنتینل ۲ و لندست قابل توجه بوده است. بر اساس تصاویر این ماهواره مساحت تپه‌های شنی در سال ۲۰۲۳ معادل ۲۶۳۸ کیلومتر مربع است، به عبارتی ۵۱/۴۶ درصد از مساحت منطقه در اشغال تپه‌های شنی بوده و تفاوت بین ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۲ در معادله ۲ در حد ۱۱/۴۳ درصد بوده است (جدول ۵).

جدول ۵. مساحت تپه‌های شنی بر اساس تصاویر تولید شده در معادلات ۱، ۲ و ۳ ماهواره سنتینل ۲ و لندست ۸

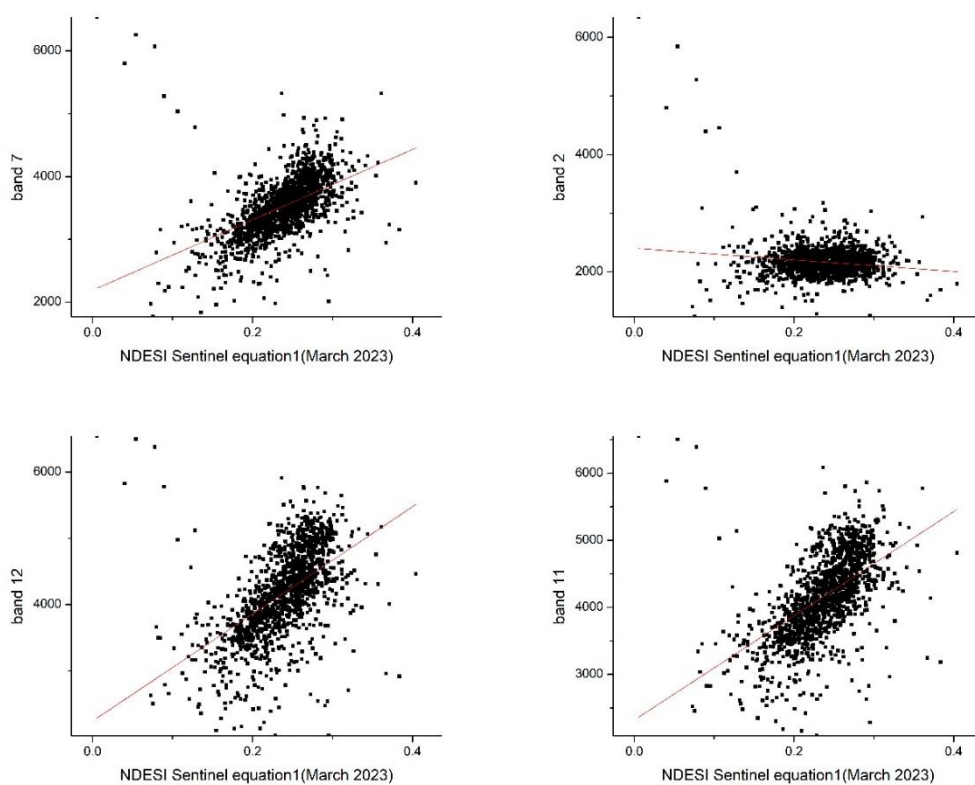
ماهواره	سال	ماه و روز	معادله	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)
سنتینل ۲	۲۰۲۳	۵ مارس	۱	۲۱۱۶	۴۱/۲۷
	۲۰۲۳	۵ مارس	۲	۲۰۵۲	۴۰/۰۳
	۲۰۲۳	۸ جولای	۱	۲۲۶۲	۴۴/۱۲
	۲۰۲۳	۸ جولای	۲	۲۱۶۵	۴۲/۲۳
لندست ۸	۲۰۱۳	۱۶ جولای	۳	۲۸۷۳	۵۶/۰۴
	۲۰۱۸	۱۴ جولای	۳	۳۰۷۹	۶۰/۰۶
	۲۰۲۳	۳۰ مارس	۳	۲۶۳۸	۵۱/۴۶

برای ارزیابی دقت نیز نمونه‌گیری در نرم‌افزار Arc GIS انجام شده و ضریب کاپا و دقت کاربر برای آخرین تصویر محاسبه گردید. دقت کلی معادلات ۱ و ۲ به ترتیب معادل ۸۷/۴ و ۸۳/۷ درصد است. به نظر می‌رسد که شاخص NDESI در معادله ۱ به دلیل انعکاس زیاد ماسه در باند لبه قرمز پوشش گیاهی ماهواره سنتینل ۲ (باند ۷) از دقت بالایی در تشخیص تپه‌های شنی برخوردار است. ارزیابی دقت تصاویر در جدول ۴ نشان داده شده است.

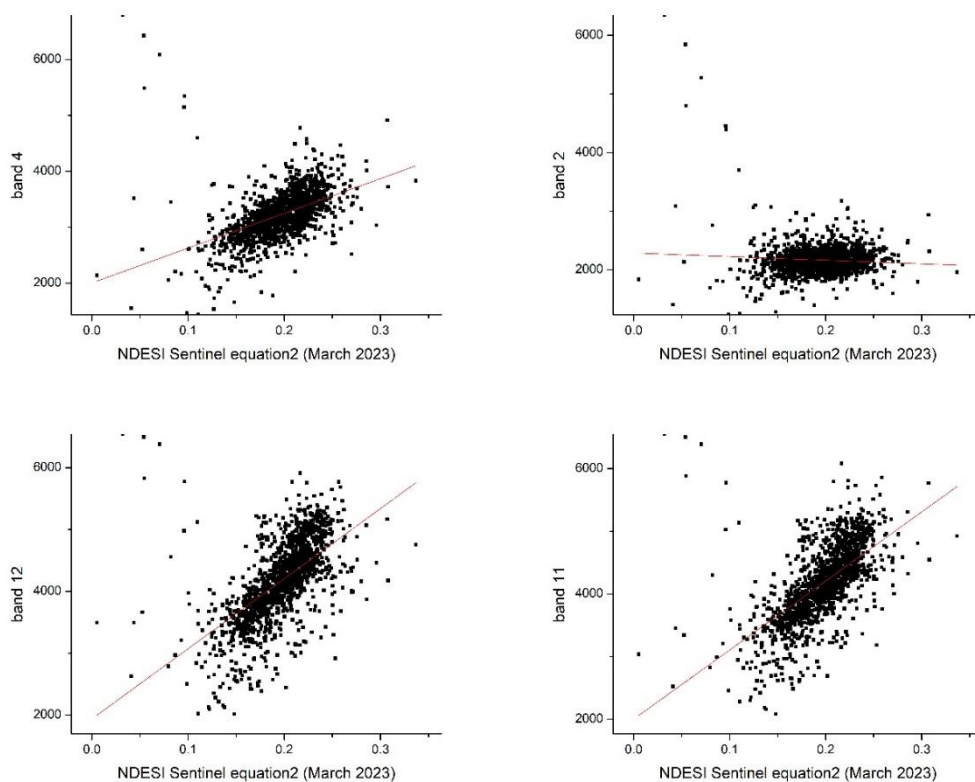
علت استفاده از باندهای مختلف در شاخص NDESI قابلیت آن‌ها در تشخیص تپه‌های شنی است. هر باند واکنش متفاوتی در بازتاب طیفی نشان می‌دهد. به منظور بررسی روابط بین این شاخص با باندهای استفاده شده در این شاخص از رابطه همبستگی پیرسون و ضریب R² استفاده شد (شکل ۱۶ تا ۱۸). نتایج نشان می‌دهد که در تصاویر تولید شده بر اساس معادله ۱ بسترین همبستگی به میزان ۰/۵۴ بین باند ۱۱ و شاخص NDESI برقرار بوده و همبستگی بین باند ۲ و این شاخص معادل ۰/۱۴- است. در بین تمامی معادلات و باندها بیشترین همبستگی به میزان ۰/۶۳ در بین شاخص NDESI و باند ۷ برقرار است. لازم به ذکر است که به علت حجم بالای داده‌ها، همبستگی‌ها فقط برای ماه مارس سال ۲۰۲۳ ماهواره سنتینل ۲ و سال ۲۰۲۳ ماهواره لندست انجام گرفت.

جدول ۶. همبستگی بین NDESI و باندهای استفاده شده در ماه‌های مارس ۲۰۲۳ ماهواره سنتینل ۲

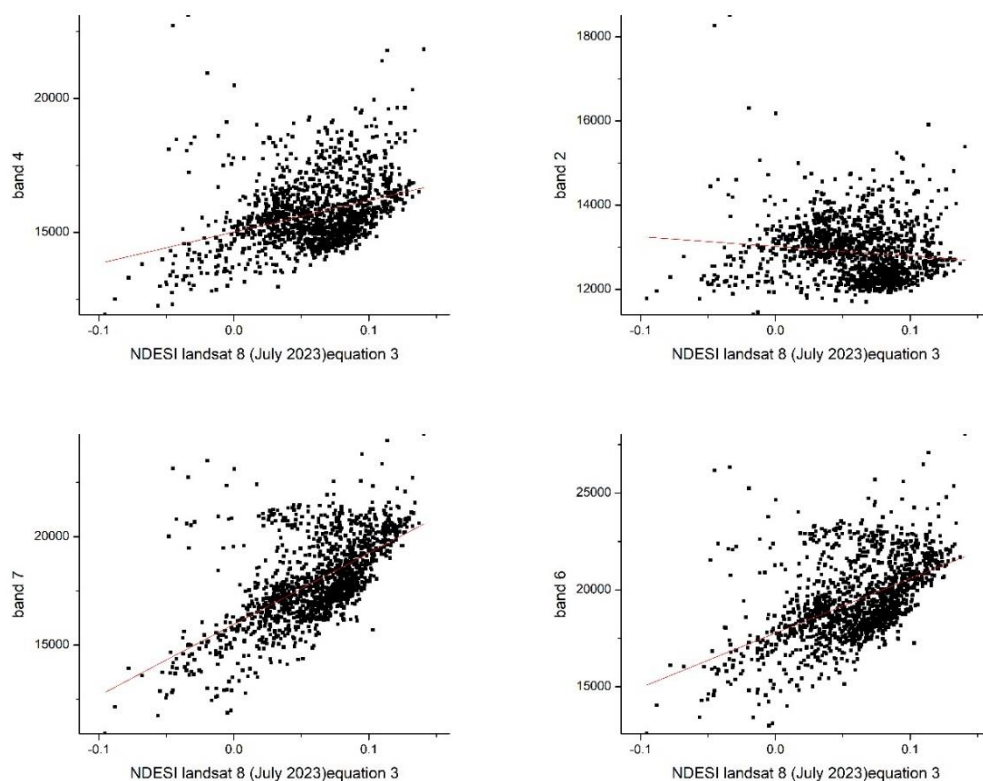
معادله ۳ لندست ۸			معادله ۲ سنتینل ۲			معادله ۱ سنتینل ۲		
۲۰۲۳		شاخص NDESI و باندها	مارس ۲۰۲۳		شاخص NDESI و باندها	مارس ۲۰۲۳		شاخص NDESI و باندها
R ²	همبستگی پیرسون		R ²	همبستگی پیرسون		R ²	همبستگی پیرسون	
۰/۰۱	-۰/۱۲	۲	۰/۰۰۴	-۰/۰۷	۲	۰/۰۲	-۰/۱۴	۲
۰/۱۱	۰/۳۴	۴	۰/۲۲	۰/۴۷	۴	۰/۲۵	۰/۵۱	۷
۰/۲۶	۰/۵۱	۶	۰/۳۸	۰/۶۱	۱۱	۰/۲۹	۰/۵۴	۱۱
۰/۳۹	۰/۶۳	۸	۰/۳۵	۰/۵۹	۱۲	۰/۲۸	۰/۵۳	۱۲



شکل ۱۶. نمودار پراکنش بین شاخص NDESI و باندهای ۲، ۷، ۱۱ و ۱۲ در معادله ۱ ماهواره سنتینل ۲



شکل ۱۷. نمودار پراکنش بین شاخص NDESI و باندهای ۲، ۴، ۱۱ و ۱۲ در معادله ۲ ماهواره سنتینل ۲



شکل ۱۸. نمودار پراکنش بین شاخص NDESI و باندهای ۲، ۴، ۶ و ۷ در معادله ۳ ماهواره لندست ۸

۴- نتیجه گیری

شاخص تفاوت نرمال شده شن و ماسه مازاد (NDESI) شاخص جدیدی برای ترسیم تپه‌های شنی به شمار آمده و بدین منظور از تصاویر سنتینل ۲ و لندست ۸ بهره می‌گیرد. به دلیل عوامل مختل‌کننده، ممکن است تپه‌های شنی تثبیت شده توسط پوشش گیاهی متراکم تشخیص داده نشوند؛ لذا ممکن است از قابلیت استفاده در سراسر جهان برخوردار نباشند. لیکن این شاخص در زمین‌های خشک و بایر که تپه‌های شنی فعال دارند عملکرد بهتری داشته‌اند. هر دو معادله ۱ و ۲ در تصاویر سنتینل ۲ بالاترین مقادیر پیکسل را به شن اختصاص داده و باعث می‌گردد که این پهنه‌ها به راحتی و با روشن‌ترین رنگ قابل تشخیص باشند. بهتر است که معادله ۲ در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم استفاده شود؛ زیرا از این قابلیت برخوردار است که پوشش گیاهی و آب را از تپه‌های شنی مجزا سازد. بر اساس معادلات ارائه شده، شاخص NDESI با داده‌های لندست ۸ مطابقت داده شد. با استفاده از معادله شماره ۳ و باندهای لندست ۸ در بازه‌های زمانی سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۳ تپه‌های شنی تشخیص داده شدند. حرکت محدود تپه‌های شنی در منطقه مورد مطالعه به علت احاطه این ناحیه با نواحی کوهستانی بوده است. تکنیک محاسبه آستانه ماسه امکان انتخاب آستانه صحیح برای هر معادله و هر تصویر را فراهم می‌کند. آستانه‌های به دست آمده از داده‌های تصاویر سنتینل ۲ و لندست ۸ به نتایج قابل قبولی دست یافته است. در نهایت، ارزیابی دقت بر روی تصاویر حاصل از معادلات ۱ و ۲، دقت کلی ۸۷/۴ و ۸۳/۷ درصد را نشان داد.

۵- فهرست منابع

فتاحی، یلدا، نظری، علی اکبر، عباسی، حمیدرضا، احمدی، حسن، (۱۳۹۶)، بررسی تطبیقی جهات باد و مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای ریگ جن، پژوهش‌های دانش زمین، ۸(۲۲)، صص ۱-۱۷.

مختاری، داوود، رضایی مقدم، محمدحسین، محمودی، شبنم، (۱۳۹۶)، بررسی آسیب‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای ساحل شرقی بندر جاسک با استفاده از مدل DVI، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۶(۱)، صص ۱۰۷-۹۰. Doi: 20.1001.1.22519424.1396.6.1.6.3

References

- Abdelkareem, M., Gaber, A., Abdalla, F., Kamaleldin, G. (2020). Use of optimal and radar remote sensing satellites for identifying and monitoring active inactive landforms in the driest in Saudi Arabia, *Geomorphology*, 362: 107197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107197>
- Abdellaoui, A., & Marmi, R. (2010). Mise en evidence de mouvements de sable a partir d'images satellitales ; application au piemont sud de l'atlas saharien (Algerie). *Annals of the University of Bucharest. Geography Series*.
- Adnani, M., Azzaoui, M.A., Elbelrhiti, H., Ahmamou, M., Masmoudi, L., & Chiban, M. (2016). Yerd sand dunes (Erfoud area, southeastern of Morocco): color, composition, sand's provenance, and transport pathways. *Arabian Journal of Geosciences* 9 (5), 366. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2394-x>
- Aydda, A., Althuwaynee, O.F., & Pokharel, B. (2020). An easy method for barchan dunes automatic extraction from multispectral satellite data. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 419. IOP Publishing. DOI:10.1088/1755-1315/419/1/012015
- Aydda, A., Althuwaynee, O.F., Algouti, A., & Algouti, A. (2019). Evolution of sand encroachment using supervised classification of Landsat data during the period 1987–2011 in a part of La'ayoune-Tarfaya basin of Morocco. *Geocarto Int.* 34 (13), 1514–1529. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1493154>
- Dakir, D., Rhinane, H., Saddiqi, O., El Arabi, E., & Baidder, L. (2016). Automatic extraction of dunes from Google Earth images new approach to study the dunes migration in the La'ayoune city of Morocco. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spatial Inf. Sci.* 42. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W1-53-2016>
- Deng, Y., Wu, C., Li, M., & Chen, R. (2015). RNDISI: a ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 39, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.010>
- Ding, C., Zhang, L., Liao, M., Feng, G., Dong, J., Ao, M., Yu, Y. (2020). Quantifying the spatio-temporal patterns of dune migration near Minqin Oasis in northwestern China with timeseries of Landsat 8 and Sentinel 2 observations, *Remote sensing of environment*, 236: 111498. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111498>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., & Meygret, A. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Rem. Sens. Environ.* 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Fadhil, A.M. (2009). Land degradation detection using geo-Information technology for some sites in Iraq. *Al-Nahrain Journal of Science* 12 (3), 94–108. DOI: 10.22401/JNUS.12.3.13
- Fadhil, A.M. (2013). March. Sand dunes monitoring using remote sensing and GIS techniques for some sites in Iraq. In: *PIAGENG 2013: Intelligent Information, Control, and Communication Technology for Agricultural Engineering*, vol. 8762. International Society for Optics and Photonics, p. 876206. DOI: 10.1117/12.2019735
- Fatahi, Y., Nazari, A., Abasi, H., Ahmadi, H. (2017). A comparative study of wind directions and sand dunes morphology of Jen erg, *Research in Earth Sciences*, 8(29): 1-17. [In Persian]
- Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Rem. Sens. Environ.* 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Gao, B.C. (1996). NDWI—a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Rem. Sens. Environ.* 58 (3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Han-Qiu, X.U. (2005). A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing* 5, 589–595. DOI : 10.11834/jrs.20050586
- Horrall, J., Mohan, D., Kochanski, K., & Rountree, B. (2019). December. Machine learning application to sand dune model prediction using generative adversarial Networks (GANs). In: *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 2019. EP54C-14. DOI: 10.48550/arXiv.1912.10798
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Rem. Sens. Environ.* 25 (3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

- Hugenholtz, C.H., Levin, N., Barchyn, T.E., & Baddock, M.C. (2012). Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: a review and outlook. *Earth Sci. Rev.* 111 (3–4), 319–334. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.006>
- Jordan, C.F., (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50 (4), 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
- Kochanski, K., Mohan, D., Horrall, J., Rountree, B., & Abdulla, G. (2019). Deep Learning Predictions of Sand Dune Migration arXiv preprint arXiv:1912.10798. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.10798>
- Lekouch, I., Rognon, P., Kabbachi, B., Benssaou, M., & Ezaidi, A. (2010). The use of a Landsat image to assess the morphometry of a dune field in the Moroccan southwest Sahara. *Sci. Chang. Planétaires S'écher.* 21 (1), 54–62. DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.008
- Marzouki, A., Dridri, A. (2022). Normalized Difference Enhanced sand index for desert sand dunes detection using Sentinel 2 and landsat 8 OLI data, application to the north of Figuig, Morocco, *Journal of Arid environments*, 198, 104693. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104693>
- Mohammadpoor, M., & Eshghizadeh, M. (2021). Introducing an intelligent algorithm for extraction of sand dunes from Landsat satellite imagery in terrestrial and coastal environments. *J. Coast Conserv.* 25 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00789-x>
- Mokhtari, N., Bouabid, R., Bock, L., & Paul, R. (2013). Application of approach medalus for assessing desertification sensitivity of moulouya watershed. Morocco. *Sci. Ed. Mersenne* vol. 5, 131107. Doi: 20.1001.1.22519424.1396.6.1.6.3. **[In Persian]**
- Nguyen, C.T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L.Z. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast asia using Landsat 8. *Land* 10 (3), 231. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
- Pan, X., Zhu, X., Yang, Y., Cao, C., Zhang, X., & Shan, L. (2018). Applicability of downscaling land surface temperature by using normalized difference sand index. *Sci. Rep.* 8 (1), 1–14. DOI: 10.1038/s41598-018-27905-0
- Rasul, A., Balzter, H., Ibrahim, G.R.F., Hameed, H.M., Wheeler, J., Adamu, B., Ibrahim, S. A., & Najmaddin, P.M. (2018). Applying built-up and bare-soil indices from Landsat 8 to cities in dry climates. *Land* 7 (3), 81. <https://doi.org/10.3390/land7030081>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, vol. 351. NASA special publication, p. 309, 1974.
- Roy, P.S., Sharma, K.P., & Jain, A. (1996). Stratification of density in dry deciduous forest using satellite remote sensing digital data—an approach based on spectral indices. *J. Biosci.* 21 (5), 723–734. Doi: 10.1007/bf02703148
- Sahar, A.A., Alhadithi, A.A., Hassan, M.A., & Jasim, A.A. (2021). Integrated remote sensing and GIS for developed new spectral index for estimating Sandy land and its potential hazards. Case study: north-east Al-Muthanna Province area, south of Iraq. *Arabian Journal of Geosciences* 14 (3), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06490-z>
- Sarnthein, M. (1978). Sand deserts during glacial maximum and climatic optimum. *Nature* 272 (5648), 43–46. Doi:10.1038/272043a0
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Rem. Sens.* 27 (14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhao, H., & Chen, X. (2005). July. Use of normalized difference bareness index in quickly mapping bare areas from TM/ETM+. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 3, p. 1666. DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1526319
- Zheng, Z., Du, S., Taubenback, H., Zhange, X. (2022). Remote sensing techniques in the investigation of aedian sand dunes: A review of recent advances. *Remote sensing of environment*, 271: 112913. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112913