

Original Article



Assessment of Areas Susceptible to Desertification with Emphasis on Erosion Models Using Multi-Criteria Decision Analysis A Case Study (Sistan Suture Zone and Afghan Blocks)

Sajjad Taleghani, Atefeh Bardooei, Amirhossein Najafi Deh Jalali, Masoud Minaei^{*}

Affiliation

Dep. of Geography,
Geographic Information
Science/ System and Remote
Sensing Laboratory (GISSRS:
Lab), Ferdowsi University of
Mashhad, Mashhad, Iran.

ABSTRACT

Introduction: Desertification is one of the major challenges of today's world, threatening environmental sustainability. This phenomenon arises from land degradation in arid and semi-arid regions and can have serious consequences for the environment, economy, and society. Due to its geographic location in the dry and semi-arid belt of the world, Iran is at risk of desertification. To combat this phenomenon, it is essential to identify and assess the influential factors, determine vulnerable areas, and use models to evaluate this issue. The use of remote sensing technologies and Geographic Information Systems (GIS) can be beneficial in assessing and monitoring desertification. These technologies enable comprehensive and accurate examination of land cover changes and assist in the management and protection of at-risk areas. This study aims to identify areas susceptible to desertification in the eastern belt of Iran (Sistan Suture Zone and Afghan Blocks) using multi-criteria decision analysis models based on the Ordered Preferential Approach (OPA).

Materials and Methods: The geological zone of Sistan and the Afghan Blocks, covering an area of over 106,000 square kilometers, is located in the eastern belt of Iran and includes parts of Sistan and Baluchestan and South Khorasan provinces. According to the De Martonne climate classification, this area falls within the arid and hyper-arid climate zones. Such conditions, along with vegetation degradation and the drying up of water resources, have made this region susceptible to desertification. In this study, to obtain a map of areas prone to desertification, wind and water erosion potential maps were first generated using the RWEQ and RUSLE models, respectively, in the study area. The results of these models, along with other indicators such as vegetation cover, soil salinity, land use, temperature, soil classification, bulk density, and climate classification, were weighted using a multi-criteria decision analysis model based on the Ordered Preferential Approach (OPA). Finally, a map of areas susceptible to desertification in the eastern belt of Iran was produced.

Results and Discussion: The results of this study showed that the average wind erosion potential in the eastern belt of Iran is 64 kg per square meter. Notably, 16% of this area, primarily located in the eastern and southeastern parts, including the cities of Zabol, Saravan, and Khash, has a wind erosion potential exceeding 512 kg per square meter. In contrast, the average water erosion was found to be 24.36 tons per hectare, with the highest rates of water erosion exceeding 40 tons per hectare covering 34.5% of the study area, primarily in the northern region, including the city of Nehbandan in South Khorasan province and central parts of the area. Finally, the results of the multi-criteria decision analysis model based on the Ordered Preferential Approach indicated that the most significant factors identified by experts in recognizing areas susceptible to desertification in this region are wind erosion, vegetation cover, and soil salinity. The eastern and southeastern parts of the area are severely affected by desertification.

Conclusion: Erosion in the eastern belt of Iran has multiple negative consequences, including reduced soil fertility and threats to livelihoods, food security, and public health. The degradation of vegetation, loss of water resources, and conversion of these areas into barren lands, particularly in the eastern half of Iran, which has faced extensive drought in recent years, have had the most significant impact on desertification. To deal with this problem, there is a need for management such as resource management, sustainable agricultural development and biodiversity conservation. These initiatives should be designed and implemented considering the specific conditions of each region and with the participation of local communities and experts. The results of this study indicate that the use of models based on the Ordered Preferential Approach can be effective in identifying vulnerable areas for the formulation of effective management plans. Additionally, incorporating indicators such as grazing management, population, and groundwater levels in future studies will facilitate a better assessment of desertification status.

Keywords: OPA, RWEQ, RUSLE, MCDM, Desertification, Erosion.

Citation:

Taleghani, S., Bardooei, A.,
Najafi Deh Jalali, A., Minaei,
M., Assessment of Areas
Susceptible to Desertification
with Emphasis on Erosion
Models Using Multi-Criteria
Decision Analysis A Case
Study (Sistan Suture Zone and
Afghan Blocks), Iran J Remote
Sens GIS. 17(4): 59-78.

* Corresponding Author: m.minaei@um.ac.ir
DOI: <https://doi.org/10.48308/gisj.2024.234399.1198>

Received: 2024.01.09
Accepted: 2024.09.14





ارزیابی مناطق مستعد بیابان‌زایی با تأکید بر مدل‌های فرسایش به کمک تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی: سوچرزون سیستان و بلوک افغان)

سجاد طالقانی، عاطفه بردویی، امیرحسین نجفی ده جلالی، مسعود مینائی^{۱۵*}

سمت

گروه جغرافیا دانشگاه فردوسی مشهد،
آزمایشگاه علم/سیستم اطلاعات جغرافیایی
و سنجش از دور (GISRS: Lab)، مشهد،
ایران

چکیده

سابقه و هدف: بیابان‌زایی یکی از چالش‌های مهم دنیای امروز است که پایداری محیط‌زیست را تهدید می‌کند. این پدیده از تخریب زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک ناشی می‌شود و می‌تواند پیامدهای جدی برای محیط‌زیست، اقتصاد و جامعه داشته باشد. ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی‌اش در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، در معرض خطر بیابان‌زایی قرار دارد. برای مقابله با این پدیده، شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر، تعیین مناطق آسیب‌پذیر و استفاده از مدل‌هایی به منظور ارزیابی این پدیده ضروری است. در این راستا، استفاده از علم سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند در ارزیابی و نظارت بر بیابان‌زایی مفید باشد. این فناوری‌ها امکان بررسی گسترده و دقیق تغییرات پوشش زمین را فراهم می‌آورند و به مدیریت و حفاظت از مناطق در معرض خطر کمک می‌کنند. هدف این پژوهش شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در کمربند شرقی ایران (سوچرزون سیستان و بلوک افغان)، با استفاده از مدل تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (OPA) است.

مواد و روش‌ها: زون زمین‌شناسی سیستان و بلوک افغان، با مساحت بیش از ۱۰۶ هزار کیلومترمربع، در کمربند شرقی ایران قرار دارد و شامل بخش‌هایی از استان سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی می‌شود. این منطقه، براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومازن، در اقلیم خشک و فراخشک قرار می‌گیرد. وجود چنین شرایطی در این منطقه، همراه با تخریب پوشش گیاهی و خشک شدن منابع آبی، آن را مستعد بیابان‌زایی کرده است. در این پژوهش برای به دست آوردن نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی، در ابتدا، نقشه پتانسیل فرسایش بادی و فرسایش آبی، به ترتیب با استفاده از مدل‌های RUSLE و RWEQ در منطقه مورد مطالعه حاصل شد. سپس نتایج این مدل‌ها به همراه سایر شاخص‌ها، از قبیل پوشش گیاهی، شوری خاک، کاربری اراضی، درجه حرارت، رده‌بندی خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک و طبقه‌بندی اقلیمی، با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر اولویت‌ترتیبی (OPA) وزن‌دهی شدند و در نهایت، نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی در کمربند شرقی ایران به دست آمد.

نتایج و بحث: نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین پتانسیل فرسایش بادی، در کمربند شرقی ایران، ۶۴ کیلوگرم بر مترمربع است. این درحالی است که ۱۶٪ این منطقه، که اغلب در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی قرار دارد و شامل شهرستان‌های زابل، سراوان و خاش می‌شود، دارای پتانسیل فرسایش بادی بیش از ۵۱۲ کیلوگرم بر مترمربع است. در مقابل، میانگین فرسایش آبی ۳۶/۲۴ تن در هکتار به دست آمده است؛ بیشترین میزان فرسایش آبی بیش از ۴۰ تن در هکتار و در ۳۴/۵٪ از مساحت منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد که اغلب در شمال منطقه، شامل شهرستان نهبندان در استان خراسان جنوبی و بخش‌های مرکزی منطقه واقع شده است. در نهایت، نتایج مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر اولویت‌ترتیبی نشان داد که مهم‌ترین شاخص‌ها از منظر متخصصان، در شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در این منطقه، شاخص‌های فرسایش بادی و پوشش گیاهی و شوری خاک است و بخش‌های شرقی و جنوب‌شرق ناحیه به شدت تحت تأثیر بیابان‌زایی قرار دارند.

بحث و بررسی: فرسایش در کمربند شرقی ایران پیامدهای منفی متعددی دارد؛ از جمله کاهش حاصلخیزی خاک و تهدید معیشت، امنیت غذایی و سلامت مردم. تخریب پوشش گیاهی، از بین رفتن منابع آبی و تبدیل این مناطق به زمین‌های بایر، به خصوص در نیمه شرقی ایران که در سال‌های اخیر با پدیده خشکسالی گسترده‌ای مواجه شده‌اند، بیشترین تأثیر را در بیابان‌زایی داشته است. برای مقابله با این مشکل، به ابتکارات مدیریتی مانند مدیریت منابع آب، توسعه کشاورزی پایدار و حفاظت از تنوع زیستی نیاز است. این ابتکارها باید، با توجه به شرایط خاص هر منطقه و با مشارکت جوامع محلی و متخصصان، طراحی و اجرا شوند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مدل‌های مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی می‌تواند، در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر به منظور تدوین برنامه‌های مدیریتی، مؤثر باشد. همچنین استفاده از شاخص‌هایی مانند مدیریت چرا، جمعیت و سطح آب‌های زیرزمینی، در مطالعات آبی، امکان ارزیابی بهتر وضعیت بیابان‌زایی را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: OPA، RUSLE، MCDM، بیابان‌زایی، فرسایش.

استناد:

طالقانی، س.، بردویی، ع.، نجفی ده جلالی، ا.ح.، مینائی، م.، ارزیابی مناطق مستعد بیابان‌زایی با تأکید بر مدل‌های فرسایش به کمک تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی: سوچرزون سیستان و بلوک افغان)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴: ۵۹-۷۸.



۱- مقدمه

یکی از چالش‌های جهانی که پایداری محیط‌زیست را تهدید می‌کند، بیابان‌زایی است (Salvati, 2014). اکوسیستم‌های بیابانی به شدت آسیب‌پذیرند؛ بنابراین حفاظت و تضمین پایداری آن‌ها اهمیت چشمگیری دارد (Minaei, 2023). این فرایند به دلیل تخریب زمین در مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب اتفاق می‌افتد که ممکن است ناشی از عوامل طبیعی یا انسانی باشد (Akbari et al., 2021). بیابان‌زایی نتیجه تعامل عوامل محیطی (توپوگرافی، اقلیم، خاک و گیاهان) و عوامل انسانی، مانند از بین بردن جنگل‌ها و شیوه‌های نامناسب مدیریتی است (Bouabid et al., 2010; Salvati et al., 2016). این پدیده می‌تواند پیامدهای خطرناکی برای محیط‌زیست، اقتصاد و جامعه داشته باشد. در حال حاضر، در بیش از ۱۱۰ کشور سراسر جهان، بیابان‌زایی تأثیرات منفی خود را نشان می‌دهد و چه‌بسا به کاهش بهره‌وری زمین منجر شود (Sepehr et al., 2007). همچنین به‌نقل از کمالی مسکونی^۱ و همکاران (۲۰۲۱) و براساس برآورد کنفرانس جهانی بیابان‌زایی و بیابان‌زدایی، این پدیده مخرب تهدیدی برای ۴۰٪ از مساحت کل سطح زمین به شمار می‌رود و سالانه ۱۲ میلیون هکتار از این اراضی را تحت تأثیر مستقیم خود قرار می‌دهد. این موضوع موجب تحمیل ۴۲ میلیارد دلار آسیب به اقتصاد جهانی و همچنین مهاجرت پنج‌میلیون نفر خواهد شد.

کشور ایران، به دلیل اینکه ۸۵٪ مساحتش در قلمرو زمین‌های خشک، نیمه‌خشک و فراخشک قرار دارد، دارای زیست‌بومی شکننده است (Bakhshandehmehr et al., 2013). بیابان‌زایی و تخریب زیستگاه‌های طبیعی از مهم‌ترین نگرانی‌های مدیران و برنامه‌ریزان منابع طبیعی است و حفاظت از این مناطق نیازمند مدیریت علمی و بهره‌گیری از دانش و تخصص کارشناسان است (Sadeghi Ravesh, 2022). با توجه به تأثیرات مخرب و جبران‌ناپذیر بیابان‌زایی، شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر در آن و تعیین مناطقی که با این پدیده مواجه‌اند،

از ضروریات شایان تأمل درمورد مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Silakhori et al., 2019). برای پیشگیری از بیابان‌زایی، باید درمورد وسعت اراضی بیابانی و روند تغییرات آن‌ها شناخت به دست آورد (Dastorani & Jafari Shalamzari, 2022). همچنین تدوین روش‌های ارزیابی بیابان‌زایی نیازمند شناخت فرایندها، عوامل و شاخص‌های آن است (Pishyar et al., 2016). به‌منظور ارزیابی پدیده بیابان‌زایی و بیان راهکارهای مطلوب برای مبارزه با آن، مدل‌های فراوانی مطرح شده است؛ استفاده از این مدل‌ها برای درک و پیش‌بینی خطرهای احتمالی زیست‌محیطی اهمیت فراوانی دارد (Afifi & Sohrabi, 2023). استفاده از سنجش از دور^۲ و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۳ همراه با به‌کارگیری روش‌های آماری و ریاضی، مانند روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)^۴، این دانش‌ها را به ابزارهای مؤثری برای ارزیابی مسائل گوناگون زیست‌محیطی، از جمله بیابان‌زایی، تبدیل کرده است (El Baroudy, 2011; Akbari et al., 2021). از مزایای به کار بردن سنجش از دور، درقیاس با روش‌های صحرایی برای ارزیابی پدیده بیابان‌زایی، می‌توان به امکان جمع‌آوری داده‌ها بدون نیاز به حضور فیزیکی در مناطق دورافتاده، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های ناشی از جمع‌آوری داده‌های میدانی اشاره کرد. همچنین استفاده از این ابزار، به دلیل امکان پوشش‌دهی وسیع و دستیابی به نواحی دسترس‌ناپذیر، به پژوهشگران کمک می‌کند تغییرات اکوسیستم‌های بیابانی را دقیق‌تر پایش کنند. در نهایت، این داده‌ها به مدل‌سازی و پیش‌بینی روندهای آینده بیابان‌زایی کمک می‌کنند و می‌توانند، به‌منزله ابزار تکمیلی، برای روش‌های صحرایی استفاده شوند (Albalawi & Kumar, 2013). درباره جنبه‌های متفاوت بیابان‌زایی در شرق ایران، مطالعات متعددی انجام شده است؛

1. Kamali Maskooni

2. Remote Sensing

3. Geographic Information System

4. Multi-Criteria Decision Analysis

از جمله بررسی پوشش گیاهی، خشکسالی، بارش و شناسایی کانون‌های گردوغبار. برخی از این مطالعات عبارت است از پژوهش‌های قاسمی‌فر^۱ و همکاران (۲۰۲۲) و چکی‌فورک^۲ و همکاران (۲۰۲۳). علاوه بر این، پژوهش‌هایی مستقیماً به موضوع بیابان‌زایی پرداخته‌اند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.

بوجملاین و سمار^۳ (۲۰۱۸) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، براساس مدل مدالوس^۴ در حوضه هودنا^۵ (الجزایر) و طبق داده‌های مربوط به عوامل محیطی (اقلیم، پوشش گیاهی، خاک) و همچنین عوامل انسانی، مانند تراکم جمعیت و دام‌پروری، مناطق حساس به بیابان‌زایی را شناسایی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که حوضه هودنا در الجزایر به شدت در معرض خطر بیابان‌زایی قرار دارد. همچنین در مطالعه‌ای که بوعلی و بهبهانی^۶ (۲۰۱۹) درباره منطقه دشت سگزی اصفهان انجام دادند، مهم‌ترین عامل شدت گرفتن بیابان‌زایی، در این منطقه کویری، شرایط آب‌وهوایی و فرسایش بادی و همچنین تصمیم‌ها و سیاست‌های مدیریتی تشخیص داده شد.

پژوهش کفاش^۷ و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد بیش از نیمی از منطقه مرادآباد سراوان در معرض خطر بیابان‌زایی قرار دارد. در این منطقه، پوشش گیاهی مهم‌ترین عامل و خاک کم‌اهمیت‌ترین عامل بیابان‌زایی بود. سیلاخوری^۸ و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از عوامل اقلیم، پوشش گیاهی و فرسایش و با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری TOPSIS^۹، شدت بیابان‌زایی در منطقه باشتین سبزوار را بررسی کردند. نتایج این تحقیق شوری آب و خاک را مؤثرترین شاخص‌ها، در بیابان‌زایی این منطقه، نشان داد.

خلیل و همکاران (۲۰۱۸)^{۱۰}، با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^{۱۱}، شدت بیابان‌زایی در شرق استان اصفهان را بررسی کردند. در این پژوهش، شش معیار اصلی شامل اقلیم، خاک، آب زیرزمینی، پوشش گیاهی، فرسایش خاک و مدیریت ارزیابی شد.

نتایج این پژوهش نشان داد که بخش شایان توجهی از منطقه در کلاس شدید بیابان‌زایی قرار دارد؛ همچنین عامل اقلیم بیشترین تأثیر را در این پدیده، در شرق اصفهان، داشته است و پس از آن، عوامل مدیریت و خاک در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در مطالعه‌ای که شیهاب و الحمیداوی^{۱۲} (۲۰۲۰) به‌منظور پهنه‌بندی خطر بیابان‌زایی در مرکز عراق انجام دادند، با استفاده از شاخص‌های جهت شیب، شیب، بارندگی، دما، کاربری زمین و سرعت باد و نیز به‌کارگیری روش AHP، نقشه پهنه‌بندی خطر بیابان‌زایی این منطقه تهیه شد. نتایج حاصل از ارزیابی این شاخص‌ها، در این پژوهش، نشان داد که بارندگی و جهت شیب و کاربری زمین مهم‌ترین تأثیر را در فرایند بیابان‌زایی، در منطقه مورد نظر، داشته است.

دستورانی و جعفری شلمزاری^{۱۳} (۲۰۲۲)، به‌منظور ارزیابی شدت بیابان‌زایی، کارایی دو روش فازی و شاخص ترکیبی بیابان‌زایی (IDI)^{۱۴} را در شهرستان تربت حیدریه، استان خراسان رضوی، مقایسه کردند. بدین‌منظور ابتدا شاخص‌های پوشش گیاهی، شوری، خشکسالی و دما متعلق به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ میلادی استخراج شد. سپس با بهره‌گیری از مدل AHP، وزن هریک از شاخص‌ها به دست آمد. در نهایت، با روش ترکیب وزنی و شاخص ترکیبی بیابان‌زایی، نقشه شدت بیابان‌زایی در منطقه تعیین شد.

1. Ghasemifar
2. Cheki Forak
3. Boudjemline & Semar
4. Medalus
5. Hodna
6. Boali & Behbahani
7. Kafash
8. Silakhori
9. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
10. Habashi
11. Analytic Hierarchy Process
12. Shihab & Al-hameedawi
13. Dastorani & Jafari Shalamzari
14. Integrated Desertification Index

انجام نشده است. بنابراین طی این مطالعه، مناطق مستعد بیابان‌زایی در این ناحیه شناسایی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

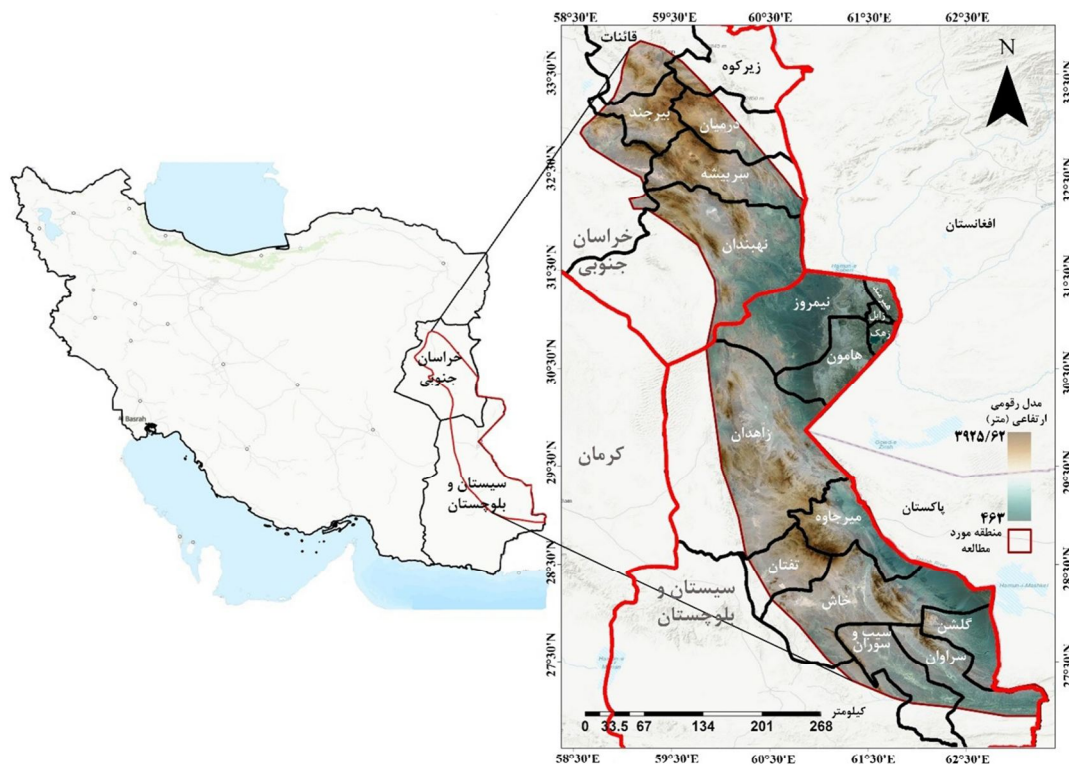
منطقه مورد مطالعه، در این پژوهش، زون زمین‌شناسی سیستان و بلوچ افغان است که در محدوده جغرافیایی $58^{\circ}33'$ تا $63^{\circ}20'$ طول شرقی و $33^{\circ}50'$ تا $50^{\circ}26'$ عرض شمالی در کمربند شرقی ایران قرار گرفته است و با وسعت 106685 کیلومترمربع، بخش‌هایی از استان سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی را شامل می‌شود. بیشترین و کمترین ارتفاع در این منطقه، به ترتیب با 3925 و 463 متر، در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد و میانگین ارتفاع آن 1340 متر از سطح دریاست (شکل ۱). میانگین دمای سالانه $22/48$ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه 250 میلی‌متر در این منطقه، براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، نشان‌دهنده شرایط اقلیمی خشک و فراخشک است. با توجه به نقشه کاربری و پوشش اراضی برگرفته از مرکز مطالعات تغییرات اقلیمی سازمان فضایی اروپا (ESA)^۴، $45/46\%$ از اراضی این منطقه فاقد پوشش‌اند و در دسته زمین‌های بایر قرار می‌گیرند و فقط $1/34\%$ از منطقه دارای پوشش انبوه و متراکم است. وجود چنین شرایطی، همراه با از بین رفتن پوشش گیاهی و خشک شدن منابع آبی، در سال‌های اخیر باعث شده است که این منطقه تحت تأثیر فرایند بیابان‌زایی قرار گیرد. بنابراین شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در آن، برای برنامه‌ریزی آینده، دارای اهمیت بسیار است.

نتایج این مطالعه نشان داد کارآیی شاخص ترکیبی بیابان‌زایی بیشتر از روش فازی است.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای ارزیابی مسائل گوناگون زیست‌محیطی مانند بیابان‌زایی، ابزار کارآمدی است اما بیشتر مطالعات، در زمینه بررسی بیابان‌زایی در ایران، بر پایه مدل‌هایی همچون مدل‌های IMDPA^۱ استوار است. این روش‌ها می‌توانند به منزله پایه‌ای برای تدوین معیارها و شاخص‌ها استفاده شوند اما، به دلیل اهمیت یکسانی که به هر یک از شاخص‌ها می‌دهند، در عمل، همه معیارها و شاخص‌ها وزن و سهم اثر یکسانی دریافت می‌کنند. بنابراین لزوم پرداختن به روش‌هایی که بتواند راه‌حل‌های بهینه را بر مبنای منطق و اصول قوی و مبانی نظری مستدل ارائه دهد، در حوزه مدیریت مناطق بیابانی، ضروری به نظر می‌رسد. به همین علت در این پژوهش، به منظور شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی، از روش تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (OPA)^۲ استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این مدل تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره که آن را از سایر مدل‌ها متمایز می‌کند، اختصاص وزن به کارشناسان است. این نکته موجب دستیابی به نتایج دقیق‌تر و متناسب‌تر با شرایط واقعی می‌شود و در نتیجه، ارزیابی‌ها و اولویت‌بندی‌ها عادلانه‌تر و معتبرتر انجام می‌شوند. کمبود بارندگی، دمای بالا و میزان تبخیر و تعرق زیاد، به همراه اقلیم خشک و فراخشک، به شدت اکوسیستم کمربند شرقی ایران، به ویژه منطقه سیستان را تهدید می‌کند (Zolfaghari et al., 2011). به همین دلیل این منطقه یکی از حساس‌ترین مناطق جهان در زمینه طوفان‌های شن و فرسایش بادی محسوب می‌شود (Rahdari et al., 2023).

با توجه به ضرورت مطالعات محلی، تا کنون تحقیقاتی در منطقه سوچرزون سیستان و بلوچ افغان^۳

1. Iranian Model of Desertification Potential Assessment
2. Ordinal Priority Approach
3. Sistan Suture Zone and Afghanistan Blocks
4. European Space Agency
(<https://cds.climate.copernicus.eu>)



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کمربند شرقی ایران

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

مدل‌های فرسایش بادی، فرسایش آبی و مدل OPA، به‌ترتیب از محصول MOD13Q1 تابش‌سنج طیفی تصویربرداری، با وضوح متوسط ناسا (مادیس)، لندست-۸ و سنتینل-۲ به دست آمد. داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM)^۲ طی مأموریت توپوگرافی رادار شاتل سازمان ملی هوانوردی و فضایی (NASA-SRTM)^۴ دریافت شد. داده‌های پوشش زمین به‌کاررفته در این مطالعه نیز از مرکز مطالعات تغییرات اقلیمی (CCI)^۵ در سازمان فضایی اروپا استخراج شد.

به‌منظور شناخت مؤثرترین شاخص‌ها در شناسایی مناطق مستعد بیابانی در منطقه مورد مطالعه و دستیابی به آن‌ها، از نظر کارشناسان بهره‌گرفته شد؛ فهرستی از شاخص‌ها و منابع آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های هواشناسی، از قبیل سرعت باد، رطوبت خاک، عمق برف، بارندگی، درجه حرارت و طبقه‌بندی اقلیمی است. ترکیب مکانیکی، ماده آلی، شوری و چندین ویژگی دیگر خاک از پایگاه داده جهانی خاک همگن‌شده (OLM)^۱ به دست آمد که براساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده با روش یادگیری ماشین، از بانک داده‌های پروفیل‌ها و نمونه‌های خاک حاصل شده است. اطلاعات موجود در مجموعه داده OLM در شش عمق استاندارد (۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) دسته‌بندی شد. شاخص پوشش گیاهی NDVI^۲ برای استفاده در

1. OpenLandMap
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Digital Elevation Model
4. National Aeronautics and Space Administration Shuttle Radar Topographic Mission
5. Climate Change Initiative

جدول ۱. جمع‌آوری داده‌ها و منابع آن‌ها

مرحله	داده	منبع	سال	تفکیک مکانی (متر)	تفکیک زمانی
۱. مدل فرسایش بادی RWEQ	سرعت باد	ERA5*	۲۰۲۲	۱۱۱۳۲	ساعتی
	رطوبت خاک	FLDAS*	۲۰۲۲	۱۱۱۳۲	ساعتی
	عمق برف	ERA5*	۲۰۲۲	۱۱۱۳۲	ساعتی
	ویژگی‌های خاک	OpenLandMap*	-	۲۵۰	-
	مدل رقومی ارتفاعی	SRTM*	-	۳۰	-
	شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی	MODIS MOD13Q1*	۲۰۲۲	۲۵۰	شانزده‌روزه
۲. مدل فرسایش آبی RUSLE	بارندگی	CHIRPS Pentad*	۲۰۲۲	۵۵۶۶	روزانه
	خاک	OpenLandMap*	-	۲۵۰	-
	کاربری اراضی	MODIS MCD12Q1*	۲۰۲۲	۵۰۰	سالانه
	مدل رقومی ارتفاع	SRTM*	-	۳۰	-
	شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی	Sentinel-2 MSI*	۲۰۲۲	۱۰	پنج‌روزه
	پوشش گیاهی	landsat 8*	۲۰۲۲	۳۰	شانزده‌روزه
۳. لایه‌های ورودی مدل OPA	درجه حرارت	GLDAS*	۲۰۲۲	۲۷۸۳۰	ساعتی
	طبقه‌بندی اقلیمی	سازمان جنگل‌ها و مراتع کل کشور	-	-	-
	ویژگی‌های خاک	OpenLandMap*	-	۲۵۰	-
	کاربری اراضی	ESA_CCI	۲۰۲۲	۳۰۰	سالانه

* به این معنی است که امکان دسترسی به مجموعه داده مورد نظر، در GEE^۱، وجود دارد.

۳-۲- روش‌شناسی

براساس هدف این مطالعه، مراحل این تحقیق مطابق آنچه در نمای کلی پژوهش (شکل ۲) آمده، انجام شده است. این تحقیق شامل سه مرحله اصلی است:

(۱) برآورد پتانسیل فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه، براساس مدل RWEQ^۲؛

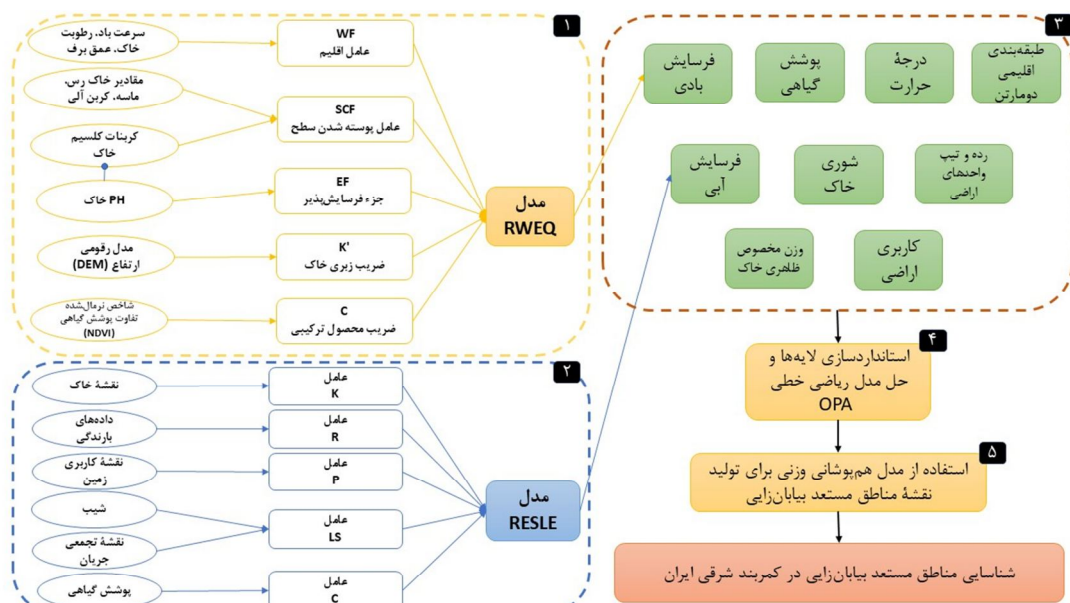
(۲) تهیه نقشه فرسایش آبی با استفاده از مدل RUSLE^۳؛

(۳) در نهایت، استفاده از تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره OPA برای محاسبه وزن لایه‌های مؤثر در پدیده بیابان‌زایی و تولید نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی در کمربند شرقی ایران.

۴-۲- معادله فرسایش بادی اصلاح‌شده

در دهه ۱۹۶۰، معادله فرسایش بادی (WEQ)^۴ اولین مدل تجربی فرسایش بادی براساس تلاش‌های چپیل و وودراف^۵ (۱۹۵۹) بود که برای ارزیابی فرسایش متوسط خاک در واحد جرم بر مساحت در سال، با استفاده از تونل باد و اندازه‌گیری‌های میدانی، ایجاد شد (Woodruff & Siddoway, 1965). مدل RWEQ بر مبنای مدل پایه WEQ توسعه یافته و شامل اجزای

1. Google Earth Engine
2. Revised Wind Erosion Equation
3. Revised Universal Soil Loss Equation
4. Wind Erosion Equation
5. Chapil & Woodruff



شکل ۲. نمای کلی روش تحقیق

$$\text{SWEP} = \frac{2x}{s^2} Q_{\max} e^{-\left(\frac{x}{s}\right)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، SWEP مقدار پتانسیل فرسایش بادی در واحد سطح (kg/m^2)، x فاصله از لبه باد مخالف میدان (m)، و s طول میدان بحرانی (m) است که درمورد مناطق خشک، ده متر در نظر گرفته می‌شود (Han et al., 2023; Lyu et al., 2021; Yang et al., 2023).

$$Q_{\max} = 109/8 * WF * EF * SCF * K' * C \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$S = 150/71 * (WF * EF * SCF * K' * C) - 0/3711 \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه‌های (۲) و (۳)، $Q_{\max}$ حداکثر ظرفیت انتقال (kg/m)، WF فاکتور اقلیمی (kg/m)، EF ضریب فرسایش‌پذیری خاک (بدون بعد)، SCF عامل پوسه شدن سطح (بدون بعد)، K' ضریب زبری خاک (بدون بعد) و C نشان‌دهنده ضریب پوشش گیاهی (بدون بعد) است.

تجربی و مبتنی بر فرایند است. این مدل، با تلفیق داده‌های میدانی و شبیه‌سازی رایانه‌ای، توانایی توصیف فرایندهای فیزیکی فرسایش بادی و پیش‌بینی آن را دارد؛ از این رو به‌منزله مدلی نیمه‌تجربی-نیمه‌فرایندی طبقه‌بندی می‌شود (Fryrear et al., 2008; Blanco & Lal, 1999). این مدل اصلاح‌شده دارای انعطاف‌پذیری چشمگیری در ورودی‌هاست. ورودی‌های آن شامل فاکتورهای آب‌وهوا (WF)، ضریب پوسه شدن خاک (SCF)، ضریب فرسایش‌پذیری (EF)، زبری خاک (K) و پوشش گیاهی (C) می‌شود (Youssef et al., 2012). خروجی این مدل نیز جرمی از خاک است که در یک واحد عرض و از سطح خاک تا ارتفاع دومتری حمل می‌شود و مانند بیشتر مدل‌های فرسایش بادی، باد نقش نیروی محرک اصلی را در این مدل بر عهده دارد (Fryrear et al., 1999).

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های سنجش از دور، نقشه پتانسیل فرسایش بادی در منطقه سوچرزون سیستان و بلوچستان طی سال ۲۰۲۲، براساس مدل RWEQ تولید شد.

فاکتور اقلیمی این‌گونه محاسبه می‌شود:

$$WF = Wf * (\rho/g) * SW * SD \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)، SW رطوبت خاک (بدون بعد) و SD ضریب پوشش برف (بدون بعد) است که نسبت روزهای بدون پوشش برفی به تعداد کل روزهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. عمق پوشش برف کمتر از ۲۵/۴ میلی‌متر بر وجود نداشتن پوشش برفی دلالت دارد.

$$Wf = \frac{\sum_{i=1}^N U_2(U_2 - U_t)^2}{500} * N_d \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این معادله، U_2 سرعت باد در ۲ متر (متر بر ثانیه)، U_t سرعت آستانه باد در ۲ متر، N تعداد مشاهدات سرعت باد ($U_2 > U_t$) در دوره مورد مطالعه، N_d تعداد روزهای دوره مورد نظر، ρ چگالی هوا (kg/m^3) و g شتاب ناشی از گرانش (m/s^2) است.

جزء فرسایش‌پذیر (EF) و ضریب پوسته شدن خاک (SCF) را می‌توان طبق روابط (۶) و (۷) محاسبه کرد.

$$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33\frac{Sa}{Cl} - 2.59 OM - 0.95CaCO_3}{100}$$

رابطه (۶)

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(Cl)^2 + 0.021(OM)^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این معادلات، Sa مقدار ماسه (%، Si مقدار سیلت (%، Sa/Cl نسبت ماسه به رس (%، OM ماده آلی (%، $CaCO_3$ کربنات کلسیم (% و Cl مقدار رس (%) است.

به دلیل وجود نداشتن داده‌هایی درباره میزان کربنات کلسیم خاک در مجموعه داده‌های گوگل ارث انجین، از پارامتر pH استفاده می‌شود زیرا، بین pH و کربنات کلسیم خاک، رابطه مثبت غیرخطی وجود دارد. براساس بیش از ۱۵۰۰۰ واحد گوناگون نقشه‌برداری خاک، معادله‌ای نمایی برای کمی کردن رابطه بین pH و کربنات کلسیم خاک پیشنهاد شده است که در رابطه (۸) مشاهده می‌شود (Djili & Doud, 1999).

$$PH = 4.576 * CaCO_3^{0.09089} + 2.378$$

رابطه (۸)

ضریب زبری خاک (K') را می‌توان بدین صورت

محاسبه کرد:

$$K' = \cos \alpha \quad \text{رابطه (۹)}$$

در رابطه (۹)، α گرادیان شیب (برحسب درجه) است که می‌توان آن را از طریق مدل رقومی ارتفاعی به دست آورد. داده مدل رقومی ارتفاعی از NASA-SRTM (با قدرت تفکیک مکانی سی متر) با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین به دست آمده است.

ضریب محصول ترکیبی (C) را می‌توان از این

طریق محاسبه کرد:

$$C = e^{-0.0483(SC)} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$SC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در معادلات (۱۰) و (۱۱)، SC پوشش گیاهی (%، $NDVI_{soil}$ مقدار NDVI محاسبه شده در یک پیکسل خاک بدون پوشش و $NDVI_{veg}$ حداکثر مقدار NDVI در منطقه مورد مطالعه است. مقدار NDVI در فراوانی تجمعی ۹۵٪ و ۵٪، به ترتیب، نشان‌دهنده $NDVI_{veg}$ و $NDVI_{soil}$ است.

۵-۲- مدل فرسایش آبی RUSLE

این مدل تجربی در برآورد میزان خاک از دست‌رفته برآثر فرسایش آبی کاربرد دارد و براساس روابط متعددی میان عوامل مؤثر در فرسایش خاک، مانند بارش، شیب زمین، نوع خاک، و پوشش گیاهی، توسعه یافته است. معادله RUSLE تلفات خاک را برحسب تن در هکتار، براساس پنج پارامتر، طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌کند:

$$A = R * K * LS * C * P \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در این معادله، A میزان فرسایش خاک (برحسب تن در هکتار) است و پارامترهای R فرسایش باران، K فرسایش‌پذیری خاک، LS عامل توپوگرافی، C پوشش گیاهی و P عامل حفاظت خاک، براساس کاربری زمین را نشان می‌دهند.

$$C = \frac{NDVI+1}{2} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

عامل P تأثیر انواع کاربری زمین در میزان هدررفت خاک را توصیف می‌کند. در این مطالعه، فاکتور P براساس طبقه‌بندی LULC استخراج‌شده از محصول MOD12Q1 ماهواره مادیس تعیین شد. سپس، به‌منظور تهیه نقشه عامل P، از جدول ارائه‌شده از سوی USDA (۱۹۸۵) بهره گرفته شد.

جدول ۳. فاکتور P برای طبقات متفاوت پوشش زمین (LULC)

کاربری‌ها	عامل P
شهر	۰/۰۷۵
کشاورزی	۰/۶۵
بوته‌زار	۰/۰۱۵
زمین‌های بایر	۰/۵
پهنه‌های آبی	۰

در نهایت، با ضرب عوامل (C, R, K, LS, P) نقشه نهایی فرسایش آبی منطقه برحسب (تن در هکتار در سال) به دست آمد.

۶-۲- مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره OPA

با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر اولویت ترتیبی (Ataei et al., 2020) که دارای نتایج و دقت بالا و اجرای سریع برای محاسبه است، وزن معیارها ارزیابی شد. فرایند دستیابی به وزن معیارها شامل این مراحل است (Mahmoudi et al., 2021): ۱) ابتدا، فهرست معیارهای مورد نظر تهیه شد؛ ۲) سپس پرسشنامه متشکل از معیارهای مورد نظر، بین کارشناسان متخصص در این زمینه، توزیع و از متخصصان خواسته شد معیارها را رتبه‌بندی کنند. پس از آن، با تحلیل پرسشنامه و تعیین رتبه برای هر متخصص، بازخورد کارشناسان درمورد رتبه‌بندی و اولویت معیارها براساس دیدگاه متخصصان به دست آمد؛ ۳) مدل ریاضی خطی OPA با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه شد.

عامل فرساینده‌گی باران با استفاده از رابطه (۱۳) و براساس میزان بارش در منطقه محاسبه می‌شود.

$$R = 79 + 0.363 * Xa \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در این معادله، Xa میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر است.

عامل K شاخص فرسایش‌پذیری خاک است که براساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و مقاومت ذاتی آن در برابر فرسایش ناشی از باران و رواناب تعیین می‌شود. مقدار K با استفاده از جدولی تعیین می‌شود که استون^۱ (۲۰۰۰) منتشر کرده است (جدول ۱).

جدول ۲. ویژگی‌های خاک و عامل K مورد نظر

عامل K	بافت خاک
۰/۴۹	Clay (رسی)
۰/۶۰	Clay Loam (رسی لومی)
۰/۶۷	Loam (لومی)
۰/۰۹	Loamy sand (لومی ماسه‌ای)
۰/۰۴	Sand (ماسه)
۰/۴۵	Sandy Clay (ماسه‌ای رسی)
۰/۵۸	Silty Clay (سیلنتی رسی)

عامل LS تأثیر توپوگرافی در فرسایش را توصیف می‌کند که با طول دامنه و شیب، ارتباط مستقیم دارد. نقشه عامل LS با استفاده از رابطه (۱۴) تولید شد که مور و برچ^۲ (۱۹۸۶a; b) پیشنهاد کرده‌اند.

$$LS = \left(\frac{\sin slope}{0.896} \right)^{1.3} * \left(\frac{\text{اندازه پیکسل}}{22.13} \right)^{0.4} * \text{طول جریان} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در این معادله، شیب و طول دامنه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM به دست آمد.

عامل C نشان‌دهنده تأثیر پوشش گیاهی در فرسایش است. در ابتدا، نقشه پوشش گیاهی نرمال‌شده منطقه از طریق سنتینل-۲ به دست آمد و سپس نقشه عامل C، با استفاده از رابطه (۱۵) که دوریگان^۳ و همکاران (۲۰۱۴) پیشنهاد کردند، محاسبه می‌شود.

1. Stone
2. Moore & Burch
3. Durigon

شرق و جنوب‌شرق شهرستان‌های سربیشه و نهبندان در استان خراسان جنوبی و نیز عمدتاً در بخش‌های مرکزی زاهدان تا شرق میرجاوه، شمال سراوان و مرکز خاش در استان سیستان و بلوچستان متمرکز است که در مجموع، فقط ۹٪ از کل منطقه مورد مطالعه را دربرمی‌گیرد. بیش از ۲۲٪ منطقه که اغلب بخش‌های شرقی و جنوب‌شرق را دربرمی‌گیرد، شامل شهرستان‌های نیمروز، هیرمند، هامون، زابل، سراوان و خاش در استان سیستان و بلوچستان و همچنین جنوب‌شرق نهبندان در استان خراسان جنوبی، در کلاس بالای فرسایش بادی بیش از ۱۲۸ کیلوگرم بر مترمربع قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، این مناطق به‌علت پوشش گیاهی ضعیف، وجود خاک‌های ضعیف و شکننده، مسطح بودن و همچنین تأثیرپذیری از وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، با پتانسیل بالای فرسایش بادی مواجه‌اند.

۲-۳- فرسایش آبی

نقشه عوامل مؤثر در فرسایش آبی که از طریق مدل RUSLE ایجاد شده، شامل نقشه عوامل‌های فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عامل کاربری زمین است (شکل ۴). میزان شاخص فرساینده باران، برای کمربند شرقی ایران، از ۹۰ تا ۱۶۶ ($\text{mm ha}^{-1} \text{y}^{-1}$) متغیر بود و در نواحی شمالی، در جنوب خراسان جنوبی، بیشترین میزان را به خود اختصاص داده بود. این منطقه دارای خاک‌های نسبتاً حساس به فرسایش است و خاک‌های بخش‌های مرکزی، شرقی و جنوبی این منطقه به‌مراتب فرسایش‌پذیری بیشتری از خاک‌های شمالی دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عامل فرسایش‌پذیری خاک، در کمربند شرقی ایران، از ۰ (مناطق فاقد خاک) تا ۰/۰۵ و شاخص توپوگرافی منطقه مورد مطالعه از ۱/۴۹ تا ۶۲۶۳۱ متغیر است. کمترین میزان این عامل به مناطق مسطح (شرق منطقه، شامل هامون، نیمروز، زهک، زابل و هیرمند) و بیشترین میزان آن به مناطق

Max $\emptyset$

S.t: $\emptyset \leq$

$$i \left(j \left(k \left(W_{ijk}^r - W_{ijk}^{r+1} \right) \right) \right) \forall i, j, k, r$$

$$\emptyset \leq ijm W_{ijk}^m \quad \forall i, j, k \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m W_{ij} = 1$$

$$W_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k$$

(۴) در نهایت، وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۱۷) به دست آمد.

$$W_j = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^m W_{ijk} \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

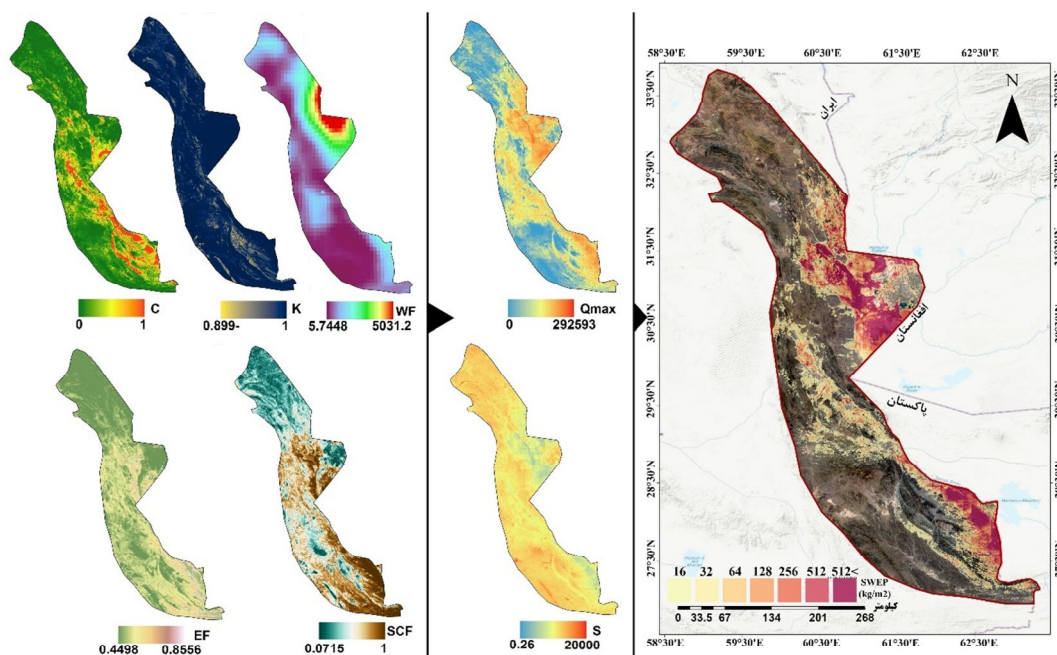
در این معادله، ϕ تابع هدف، J تعداد معیارها، K تعداد گزینه‌ها، I تعداد متخصصان، j شاخص معیارها $(1, \dots, n)$ ، k شاخص گزینه‌ها $(1, \dots, k)$ ، i شاخص خبرگان $(1, \dots, I)$ ، و W_{ij}^3 وزن اصلی معیار j از سوی متخصص I در رتبه r است.

در مرحله آخر با استفاده از ArcGIS Pro، هم‌پوشانی وزنی برای تولید نقشه نهایی پتانسیل بیابان‌زایی، تحلیل شد. ابتدا لایه‌ها استانداردسازی شد، سپس هر معیار در وزن متناظرش ضرب و با هم جمع شد و در نهایت، نقشه پتانسیل بیابان‌زایی منطقه به دست آمد.

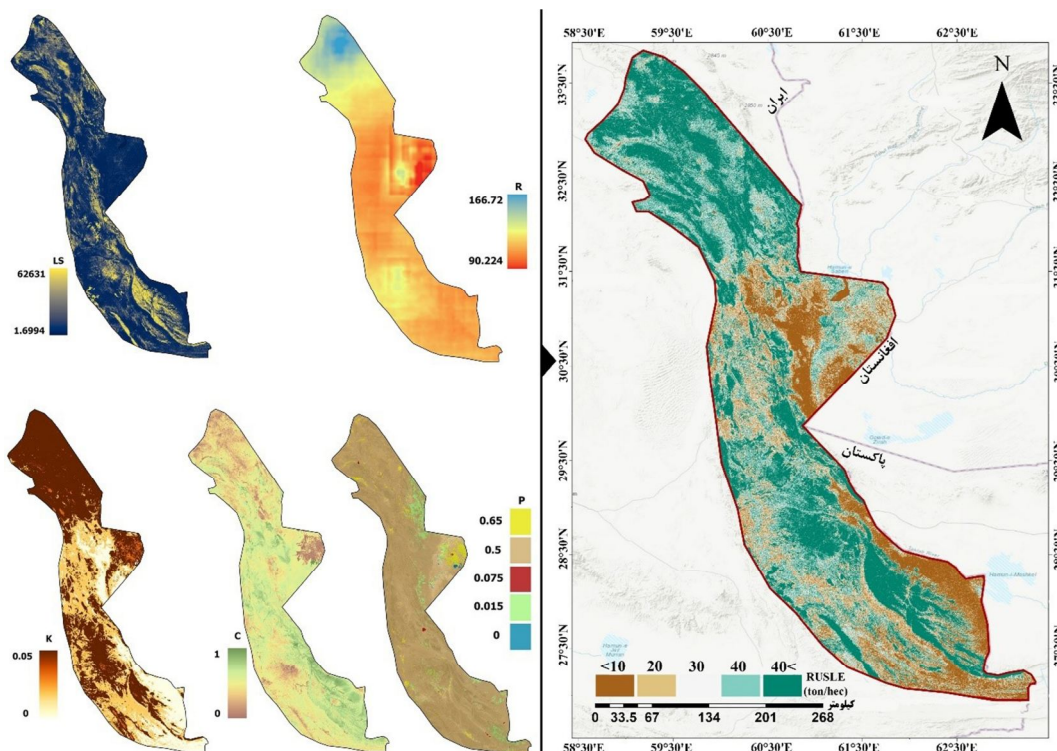
۳- نتایج

۱-۳- فرسایش بادی

شکل ۳ توزیع مکانی پتانسیل فرسایش بادی، همراه با پنج عامل محرک و تأثیرگذار در آن را در سوچرزون سیستان و بلوک افغان طی سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. پتانسیل فرسایش بادی تنوع مکانی شایان توجهی را نشان می‌دهد که در این منطقه، دامنه آن بین ۰ تا ۵۸۴ کیلوگرم بر مترمربع و میانگین آن ۶۴/۳ کیلوگرم بر مترمربع است. میزان پتانسیل فرسایش بادی در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی منطقه کمتر از ۱۶ کیلوگرم بر مترمربع است که حدود ۶۸٪ از کل این منطقه را تشکیل می‌دهد. پتانسیل فرسایش بادی با میزان ۱۶ تا ۱۲۸ کیلوگرم بر مترمربع، در بخش‌هایی از



شکل ۳. پتانسیل فرسایش بادی (SWEP)، همراه با عامل‌های C (ضریب پوشش گیاهی)، K (ضریب زبری خاک)، WF (عامل اقلیم)، EF (جزء فرسایش‌پذیر) و SCF (ضریب پوسته خاک)



شکل ۴. فرسایش آبی (RUSLE) همراه با عامل‌های LS (توپوگرافی)، R (فرساینده باران)، K (فرسایش‌پذیری خاک)، C (پوشش گیاهی)، P (کاربری زمین)

ارزیابی، به‌همراه فهرست خبرگانی که در تحلیل پرسشنامه شرکت کردند و رتبه‌بندی معیارها براساس تجربیات و دانش این افراد، در شکل ۵ آمده است. نتایج حاصل از وزن‌دهی نشان می‌دهد که مهم‌ترین شاخص، از دید متخصصان، به‌منظور شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در منطقه سوچرزون سیستان و بلوک افغان، شاخص فرسایش بادی (C4) با ارزش وزنی $25/88\%$ و به‌دنبال آن، پوشش گیاهی (C3) و شوری خاک (C6) است که به‌ترتیب، دارای وزن‌های $22/38\%$ و $10/17\%$ بودند. ازسوی دیگر، معیارهای طبقه‌بندی اقلیمی (C1) و درجه حرارت (C2) دارای کمترین وزن و به‌ترتیب، برابر با $5/24\%$ و $5/36\%$ بودند.

به‌منظور استخراج الگوی مکانی مناطق مستعد بیابان‌زایی، از تحلیل هم‌پوشانی وزنی استفاده شد. نتایج این تحلیل، براساس روش شکست طبیعی جنک^۱، طبقه‌بندی و در شکل ۶ نشان داده شده است. این روش شیوه‌ای معمول برای طبقه‌بندی پدیده‌های طبیعی است که براساس ماهیت داده‌ها انجام می‌شود (Becerril-Piña et al., 2016).

نتایج حاصل از نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی، متعلق به منطقه سوچرزون سیستان و بلوک افغان، نشان می‌دهد که بیشترین سطح منطقه، با میزان 38% ، در کلاس بیابان‌زایی اندک و اغلب در شمال منطقه قرار دارد و استان خراسان جنوبی و جنوب‌غرب منطقه در استان سیستان و بلوچستان را شامل می‌شود؛ 33% در کلاس بیابان‌زایی متوسط قرار می‌گیرد که بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه، یعنی شهرستان‌های زاهدان، تفتان، بخش‌های غربی خاش و سیب سوران در استان سیستان و بلوچستان را شامل می‌شود؛ بیابان‌زایی شدید و بسیار شدید نیز 29% منطقه را دربر گرفته است که شرق و جنوب‌شرق منطقه، یعنی جنوب‌شرق نهبندان در خراسان جنوبی، هامون و نیمروز و بخش‌های شرقی گلشن، خاش، میرجاوه و سراوان در استان سیستان و بلوچستان را شامل می‌شود.

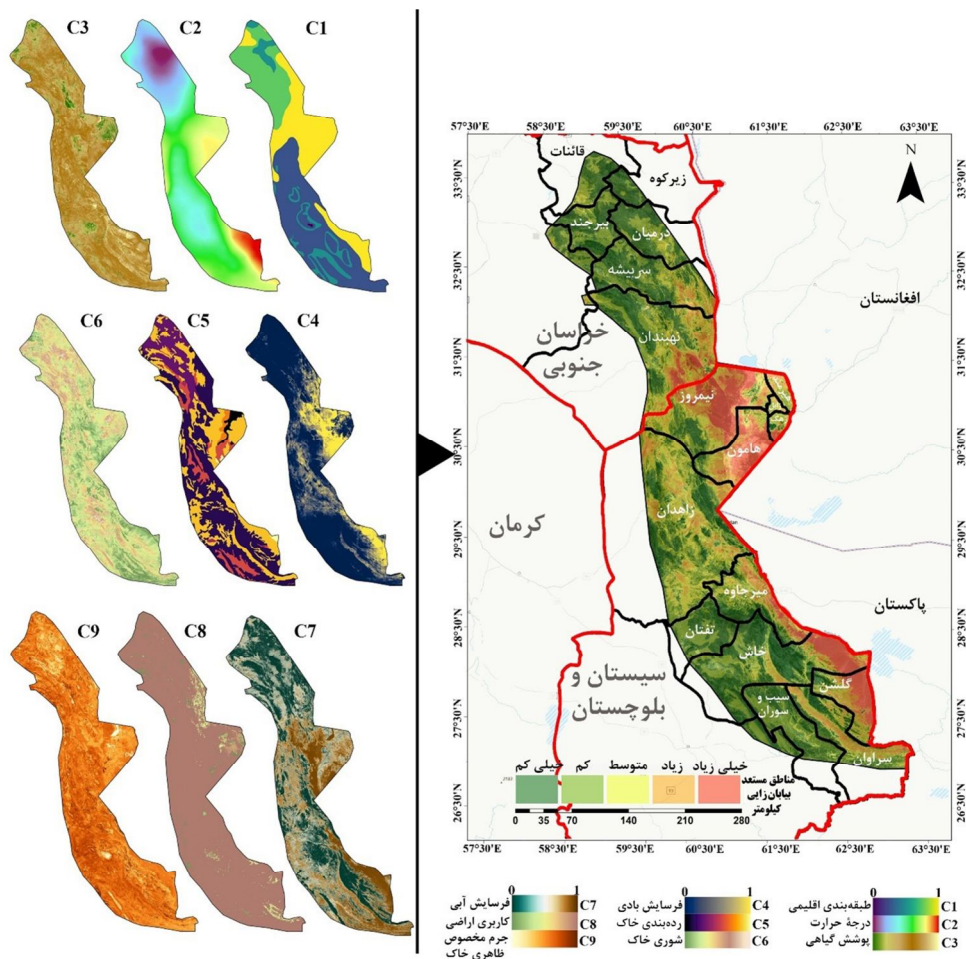
مرتفع (رشته‌کوه‌های شمال و جنوب منطقه) تعلق دارد. شاخص پوشش گیاهی در نواحی دارای پوشش گیاهی بیشتر، شامل بخش‌های شمالی، شرقی و جنوب‌غرب، ارزش صفر و در نواحی فاقد پوشش، ارزش بیشتری دارد. عامل کاربری زمین نیز، هرچه ارزش عددی بیشتری داشته باشد، یعنی این عامل نقش کم‌رنگ‌تری در حفاظت خاک، در مقابل فرسایش آبی دارد. در نهایت، پس از تلفیق لایه‌ها، میزان فرسایش آبی برآورده شده با مدل RUSLE در این منطقه به دست آمد. مدل RUSLE میانگین فرسایش آبی در این منطقه را $36/24$ تن در هکتار برآورد کرده است. یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که $17/98\%$ از منطقه دارای فرسایش کم (> 10 تن در هکتار) است. این مناطق دارای فرسایش اندک اغلب شامل زمین‌های زراعی است که با توپوگرافی تحت سلطه طبقات کم‌شیب مشخص می‌شود. در مناطق مسطح، تأثیر عامل توپوگرافی کاهش می‌یابد و معمولاً نوع خاک و میزان پوشش گیاهی، در مقدار فرسایش خاک، نقش ایفا می‌کند. تقریباً $43/2\%$ از منطقه دارای فرسایش متوسط (10 تا 30 تن در هکتار) است و این میزان از فرسایش در مناطقی با شیب‌های تند، زمین‌های ناهموار و پوشش گیاهی ضعیف رخ می‌دهد. در نهایت، $34/5\%$ از سطح این منطقه دارای فرسایش بالاست (> 30 تن در هکتار) و این میزان در مناطق کوهستانی، در شمال و بخش‌های مرکزی کمربند شرقی ایران، شامل بخش‌هایی از شهرستان نهبندان در خراسان جنوبی و سراوان، خاش و تفتان در سیستان و بلوچستان، رخ می‌دهد.

۳-۳- مناطق مستعد بیابان‌زایی

شاخص‌های مورد بررسی برای شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی، در این مطالعه، این موارد را دربرمی‌گیرد: طبقه‌بندی اقلیمی، درجه حرارت، پوشش گیاهی، فرسایش بادی، بافت خاک، شوری خاک، فرسایش آبی، کاربری اراضی و جرم مخصوص ظاهری خاک. نتایج الگوریتم تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی برای وزن بهینه معیارهای مورد

وزن بدست آمده با استفاده از مدل OPA	E13	E12	E11	E10	E9	E8	E7	E6	E5	E4	E3	E2	E1	نام خیره
رتبه‌بندی شاخص‌ها از سوی افراد خیره	۶	۵	۳	۱۳	۱۰	۴	۱۲	۱۱	۲	۹	۷	۸	۱	رتبه خیره
شاخص‌ها	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C1	C2	C3	C4	
۰.۰۵۲۴۸۸	۷	۶	۷	۸	۶	۹	۷	۹	۵	۶	۶	۸	۸	C1
۰.۰۵۳۶۱۲	۹	۷	۶	۷	۷	۹	۶	۷	۶	۶	۵	۷	۷	C2
۰.۲۲۳۸۴۲	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۵	۲	C3
۰.۲۵۸۸۴۲	۲	۲	۱	۴	۳	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۳	۱	C4
۰.۰۸۴۷۴۲	۶	۳	۴	۵	۶	۴	۳	۵	۴	۳	۳	۶	۵	C5
۰.۱۰۱۷۷۵	۳	۴	۴	۲	۴	۳	۳	۶	۳	۳	۴	۴	۴	C6
۰.۰۶۸۲۵۸	۵	۷	۵	۴	۵	۶	۷	۴	۶	۷	۵	۴	۵	C7
۰.۱۰۱۷۲۵	۴	۵	۳	۴	۴	۴	۵	۵	۴	۲	۲	۲	۴	C8
۰.۰۵۴۷۱۷	۸	۸	۸	۶	۸	۶	۷	۸	۷	۵	۷	۵	۶	C9

شکل ۵. نتایج وزن‌دهی با مدل OPA برای هریک از معیارهای C1 (طبقه‌بندی اقلیمی)؛ C2 (درجه حرارت)؛ C3 (پوشش گیاهی)؛ C4 (فرسایش بادی)؛ C5 (رده‌بندی خاک)؛ C6 (شوری خاک)؛ C7 (فرسایش آبی)؛ C8 (کاربری اراضی)؛ C9 (جرم مخصوص ظاهری خاک)



شکل ۶. مناطق مستعد بیابان‌زایی

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی و استفاده از شاخص‌های فرسایش بادی و آبی، همراه با چهار شاخص اصلی (خاک، اقلیم، پوشش گیاهی و مدیریت)، نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی در کمربند شرقی ایران به دست آمد. برای به دست آوردن شاخص‌های فرسایش بادی و آبی، به ترتیب، از مدل‌های RWEQ و RUSLE استفاده شد. به طور کلی، از منظر فرسایش، این منطقه به شدت تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارد؛ به گونه‌ای که امکان وقوع فرسایش بادی در این منطقه، به ویژه شرق آن به دلیل نداشتن پوشش گیاهی مناسب، خشکی محیط، شیب اندک و نبود رطوبت خاک، بسیار زیاد است و یکی از مناطق مستعد برای تولید گردوغبار در خاورمیانه را تشکیل می‌دهد. خشک شدن سومین دریاچه بزرگ ایران (دریاچه هامون) باعث شده است سه دریاچه کوچک تشکیل‌دهنده آن، با نام‌های هامون پوزک و هامون صابری و هامون هلمند (هیرمند)، به یکی از فعال‌ترین منابع گردوغبار تبدیل شوند و از این رو این منطقه پتانسیل چشمگیری، برای وقوع فرسایش بادی، در کمربند شرقی ایران دارد. به دلیل تغییر کاربری و خشک شدن دریاچه‌های هامون، فراوانی و شدت طوفان‌های گردوغبار افزایش شایان توجهی یافته است. تحلیل شاخص کیفیت هوا در شهر زابل نشان می‌دهد که ۶۱٪ از روزها دارای خطر بسیار برای سلامت‌اند و ۳۰/۱٪ روزها نیز حتی به منزله روزهای خطرناک شناخته می‌شوند (Rashki et al., 2012). میانگین پتانسیل فرسایش بادی، با استفاده از مدل RWEQ در این مطالعه، ۴۳ کیلوگرم بر مترمربع برآورد شده است؛ این مقدار، با پژوهش عباسی^۱ و همکاران (۲۰۱۸) که میزان متوسط فرسایش بادی در هامون را ۳۲ کیلوگرم بر مترمربع برآورد کرده‌اند، هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که میزان فرسایش بادی، در بخش‌های جنوب شرق استان خراسان جنوبی، بیشتر

است؛ این یافته با نتایج تحقیق چکی فورک و همکاران (۲۰۲۳) که کانون‌های برداشت گردوغبار در استان خراسان جنوبی شناسایی کرده‌اند، مطابقت دارد. از منظر فرسایش آبی، با توجه به اینکه ارتفاعات این منطقه در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی واقع شده است، پتانسیل وقوع آن در مناطق یادشده بیش از ۲۰ تن در هکتار است و در برخی مناطق پرشیب، به ۶۰ تن در هکتار نیز می‌رسد؛ این نکته با یافته‌های انصاری^۲ و همکاران (۲۰۱۱)، شهرزوی^۳ و همکاران (۲۰۱۵) و سازمان جنگل‌ها و مراتع^۴ (۲۰۰۹) مشابهت دارد. در نهایت، وزن‌های حاصل از مدل OPA نشان داد که فرسایش بادی و پوشش گیاهی مؤثرترین محرک در بیابان‌زایی بود؛ درحالی‌که عوامل اقلیمی، شامل طبقه‌بندی اقلیمی و درجه حرارت، کمترین نقش را از دیدگاه متخصصان داشت. نقشه نهایی مناطق مستعد بیابان‌زایی نشان داد که ۲۴۳۵۶ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه با عنوان حساس به بیابان‌زایی طبقه‌بندی شده است. مناطق بحرانی ۱۳٪ از کل منطقه را شامل می‌شود که اغلب در شرق و جنوب شرق منطقه، در شهرستان‌های زابل، زاهدان، خاش و سروان قرار دارند؛ با توجه به نتایج پژوهش نگارش^۵ و همکاران (۲۰۱۶) که بیابان‌زایی در جنوب شرق ایران را ارزیابی کردند، می‌توان به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر اطمینان کرد. شرایط محیطی کنونی ناشی از اقلیم خشک، از بین رفتن پوشش گیاهی و همچنین مدیریت نادرست، به ویژه همراه با فعالیت‌های انسانی، نقش مهمی در تسریع فرایند بیابان‌زایی در این منطقه دارد. مطالعات فتحی تپه‌رشت^۶ و همکاران (۲۰۲۲)، قاسمی‌فر و همکاران (۲۰۲۳) و شفیع‌زاده مقدم^۷ و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که تخریب پوشش

1. Abbasi

2. Ansari

3. Shahroozi

4. Forests and Rangelands Organization

5. Negaresh

6. Fathi-Taperasht

7. Shafizadeh-Moghadam

۵- منابع

- Abbasi, H.R., Opp, C., Groll, M., Rohipour, H., Khosroshahi, M., Khaksarian, F. & Gohardoust, A., 2018, **Spatial and Temporal Variation of the Aeolian Sediment Transport in the Ephemeral Baringak Lake (Sistan Plain, Iran) Using Field Measurements and Geostatistical Analyses**, Z. Geomorphol, 61(4), PP. 315-326, <https://doi.org/10.1127/zfg/2018/0451>.
- Afifi, M.E. & Sohrabi, V., 2023, **Assessing the State of Desertification in the Shahrababak Plain Watershed Using Medalus Model and Remote Sensing Data**, Natural Ecosystems of Iran, 1(1), PP. 38-59, <https://sanad.iau.ir/en/Article/983390>.
- Akbari, M., Memarian, H., Neamatollahi, E., Jafari Shalamzari, M., Alizadeh Noughani, M. & Zakeri, D., 2021, **Prioritizing Policies and Strategies for Desertification Risk Management Using MCDM-DPSIR Approach in Northeastern Iran**, Environment, Development and Sustainability, 23, PP. 2503-2523, <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00684-3>.
- Albalawi, E.K. & Kumar, L., 2013, **Using Remote Sensing Technology to Detect, Model and Map Desertification: A Review**, Journal of Food, Agriculture & Environment, 11(2), PP. 791-797.
- Ansari, M., Mahmoodi, H. & Jafari, A., 2011, **Assessment of Water Erosion in Bampour Watershed**, Iranian Journal of Range and Desert Research, 19(2), PP. 279-293.
- Ataei, Y., Mahmoudi, A., Feylizadeh, M.R. & Li, D.-F., 2020, **Ordinal Priority Approach (OPA) in Multiple Attribute Decision-Making**, Applied Soft Computing, 86, P. 105893, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105893>.
- Bakhshandehmehr, L., Soltani, S. & Sepehr, A., 2013, **Assessment of Present Status of Desertification and Modifying the MEDALUS Model in Segzi Plain of Isfahan**, Journal of Range and Watershed Management, 66(1), PP. 27-41.
- Becerril-Piña, R., 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), PP. 1323-1340, <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1169914>.
- گیاهی، از بین رفتن منابع آبی و تبدیل این مناطق به زمین‌های بایر، به‌خصوص در نیمه شرقی ایران که طی سال‌های اخیر با خشکسالی گسترده‌ای مواجه بوده، بیشترین تأثیر را در بیابان‌زایی داشته است. این مناطق شکننده و بحرانی به‌نوعی در سرتاسر نیمه شرقی ایران وجود دارند و با مناطقی که پتانسیل فرسایش بادی در آن‌ها بالاست، منطبق‌اند. درمورد این مناطق به ابتکارهایی مدیریتی، از قبیل مدیریت منابع آب، توسعه کشاورزی پایدار، حفاظت از تنوع زیستی، و جنگل‌کاری نیاز است تا بتوان به‌طور مؤثر به بازسازی منطقه و مبارزه با بیابان‌زایی پرداخت. شایان ذکر است که هر منطقه شرایط زیستی خاصی دارد و بهتر است ابتکارهای مدیریتی محلی با مشارکت جوامع محلی و متخصصان، مبتنی بر علم و تکنولوژی‌های مدرن که پایدار باشند و امکان اجرای آن‌ها وجود داشته باشد، طراحی و اجرا شوند. مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به محققان کمک می‌کند، با در نظر گرفتن معیارهای متعدد و مدیریت عدم قطعیت‌ها، تصمیمات جامع و شفاف و اولویت‌بندی‌شده‌ای اتخاذ کنند (Minaei et al., 2021). بر همین اساس مدل مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (MCDM-OPA) ابزار ارزشمندی برای شناسایی و ارزیابی مناطق آسیب‌پذیر در برابر بیابان‌زایی است و می‌تواند در توسعه برنامه‌های مدیریتی برای کاهش تأثیرات تخریب زمین کاربرد داشته باشد. روش مدل تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی، با توجه به در نظر گرفتن شاخص‌های مناسب، به‌علت سادگی و کم‌هزینه و منعطف بودن، روش نسبتاً دقیقی است. استفاده از این روش می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان را در شناسایی و بیان راهکارهای مناسب برای مدیریت و احیای مناطق بیابانی، متناسب با شرایط هر منطقه، کمک کند. با این حال در مطالعات آینده، استفاده از سایر شاخص‌ها مانند مدیریت چرا، جمعیت و سطح آب‌های زیرزمینی، به‌طور کلی، امکان ارزیابی بهتر وضعیت بیابان‌زایی را فراهم می‌کند.

- Blanco, H. & Lal, R., 2008, **Principles of Soil Conservation and Management**, Vol. 167169, Springer New York, <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8709-7>.
- Boali, A. & Mohammadian Behbahani, A., 2019, **Assessing Intensity, Risk of Desertification and Management Program (Case Study Area: Segazi Plain of Isfahan)**, Geography and Development, 17(56), PP. 181-194, DOI: 10.22111/gdij.2019.4896.
- Bouabid, R., Rouchdi, M., Badraoui, M., Diab, A. & Louafi, S., 2010, **Assessment of Land Desertification Based on the MEDALUS Approach and Elaboration of an Action Plan: The Case Study of the Souss River Basin, Morocco**, Land Degradation and Desertification: Assessment, Mitigation and Remediation, Springer, PP. 131-145, DOI: 10.1007/978-90-481-8657-0-10.
- Boudjemline, F. & Semar, A., 2018, **Assessment and Mapping of Desertification Sensitivity with MEDALUS Model and GIS-Case Study: Basin of Hodna, Algeria**, Journal of Water and Land Development, DOI: 10.2478/jwld-2018-0002.
- Chepil, W. & Woodruff, N.P., 1959, **Estimations of Wind Erodibility of Farm Fields**, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
- Cheki Forak, M., Doostan, R. & Minaei, M., 2023, **Identification of Dust Centers in Birjand City**, Geography and Territorial Spatial Arrangement, 13(46), PP. 61-84, DOI: 10.22111/gaij.2023.42530.3034.
- Dastorani, M. & Jafari Shalamzari, M., 2022, **Comparison of Fuzzy Method and Integrated Desertification Index (IDI) in Assessing the Intensity of Desertification in Torbat-e-Heydariyeh of Khorasan Razavi Province with Emphasis on Vegetation Indices**, Journal of Arid Biome, 12(1), PP. 63-75, DOI: 10.29252/aridbiom.2023.18283.1887.
- Djili, K. & Doud, Y., 1999, **Relationship between pH and Calcium Carbonate Content of Soils. The Case of Northern Algeria Soils**, Agrochimica (Italy), DOI: 10.11766/trxb201605140243.
- Durigon, V.L., Carvalho, D.F., Antunes, M.A.H., Oliveira, P.T.S. & Fernandes, M.M., 2014, **NDVI Time Series for Monitoring RUSLE Cover Management Factor in a Tropical Watershed**, International Journal of Remote Sensing, 35(2), PP. 441-453, <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081>.
- El Baroudy, A., 2011, **Monitoring Land Degradation Using Remote Sensing and GIS Techniques in an Area of the Middle Nile Delta, Egypt**, Catena, 87(2), PP. 201-208, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.023>.
- Forests and Rangelands Organization, 2009, **Preparation of Soil Erosion Potential Map of Sistan and Baluchestan Province**, Forests and Rangelands Organization.
- Fathi-Taperasht, A., Shafizadeh-Moghadam, H., Minaei, M. & Xu, T., 2022, **Influence of Drought Duration and Severity on Drought Recovery Period for Different Land Cover Types: Evaluation Using MODIS-Based Indices**, Ecological Indicators, 141, P. 109146, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109146>.
- Fryrear, D., Sutherland, P., Davis, G., Hardee, G. & Dollar, M., 1999, **Wind Erosion Estimates with RWEQ and WEQ. Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm**, 10th International Soil Conservation Organization Meeting, Purdue University.
- Ghasemifar, E., Minaei, M., Shen, M. & Rezaei, M., 2022, **Analysing Spatio-Temporal Patterns in Wintertime Rainfall across Iran's Deserts Using GPM DPR Data**, Arid Land Research and Management, 37(1), PP. 20-50, <https://doi.org/10.1080/15324982.2022.2084703>.
- Habashi, K., Karimzadeh, H.R., Pour Manafi, S. & Jafari, R., 2018, **Assessment of Desertification in East Isfahan Using Integration MEDALUS Model and Multi Criteria Analysis (MCA)**, Desert Management, 5(10), PP. 99-115, DOI: 10.22034/jdmal.2018.30671.
- Han, Y., Zhao, W., Zhou, A. & Pereira, P., 2023, **Water and Wind Erosion Response to Ecological Restoration Measures in China's Drylands**, Geoderma, 435, P. 116514, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116514>.
- Kafash, R., Ruhimoghaddam, A., Einali, A., Afshari M. & Zolfaghari, F., 2018, **Investigating the Impact of Climate, Vegetation, Wind Erosion and Soil Criteria in Assessing the Potential of Desertification Using GIS (Case Study: Moradabad Saravan Region)**, Pazhuhesh-ha-ye Noin-e Olum-e Jografiya-ye Memari va Shahrsazi, 14(2), PP. 15-29.

- Kamali Maskooni, E., Kamali, M.A. & Khanamani, A., 2021, **Investigation and Preparation of Desertification Map Based on Iranian Model of Desertification Potential (IMDPA) with an Emphasis on Two Criteria of Soil and Vegetation (Case Study: Faryab-Kerman Province)**, Journal of Environmental Science and Technology, 22(12), PP. 163-178, DOI: 10.22034/jest.2021.30618.3917.
- Lyu, X., Li, X., Wang, H., Gong, J., Li, S., Dou, H. & Dang, D., 2021, **Soil Wind Erosion Evaluation and Sustainable Management of Typical Steppe in Inner Mongolia, China**, Journal of Environmental Management, 277, P. 111488, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111488>.
- Mahmoudi, A., Deng, X., Javed, S.A. & Yuan, J., 2021, **Large-Scale Multiple Criteria Decision-Making with Missing Values: Project Selection through TOPSIS-OPA**, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 12(10), PP. 9341-9362, <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02649-w>.
- Minaei, F., Minaei, M., Kougiass, I., Shafizadeh-Moghadam, H. & Hosseini, S.A., 2021, **Rural Electrification in Protected Areas: A Spatial Assessment of Solar Photovoltaic Suitability Using the Fuzzy Best Worst Method**, Renewable Energy, 176, PP. 334-345, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.087>.
- Minaei, M., 2023, **Drones Help to Desert Ecosystems: The Use of RGB Indices and Open Source Software (A Case Study of Lut Desert)**, FOSS4G ASIA 2023 Toward Future of FOSS4G in Asia. Moore, I.D. & Burch, G.J., 1986a, **Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects**, Transactions of the ASAE, 29(6), PP. 1624-1630, <https://doi.org/10.13031/2013.30363>.
- Moore, I.D. & Burch, G.J., 1986b, **Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation**, Soil Science Society of America Journal, 50(5), PP. 1294-1298, <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>.
- Negaresh, H., Rakhshani, Z., Firoozi, F. & Alinia, H., 2016, **Desertification Assessment Using the Analytic Hierarchy Process and GIS in Southeast Iran**, Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 98(1), PP. 1-14, <https://doi.org/10.1111/geoa.12120>.
- Negaresh, H., Fotoohi, S. & Soraya, R., 2020, **Identification of the Factors Influencing the Hazards and the Difference in the Volume of Sediment Accumulated in the Villages of Nimroz**, Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 7(1), PP. 33-48, DOI: 10.29252/jsaeh.7.1.4.
- Parysow, P., Wang, G., Gertner, G. & Anderson, A.B., 2003, **Spatial Uncertainty Analysis for Mapping Soil Erodibility Based on Joint Sequential Simulation**, CATENA, 53(1), PP. 65-78, [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00198-4).
- Pishyar, S., Khosravi, H., Tavili, A. & Malekian, A., 2016, **Ranking Effective Desertification Indices Using TOPSIS and Analytic Hierarchy Process (Case Study: Kashan Region)**, Journal of Natural Environmental Hazards, 5(8), PP. 83-96, DOI: 10.22111/jneh.2016.2818.
- Rahdari, M.R., Caballero-Calvo, A., Kharazmi, R. & Rodrigo-Comino, J., 2023, **Evaluating Temporal Sand Drift Potential Trends in the Sistan Region, Southeast Iran**, Environmental Science and Pollution Research, 30(57), PP. 120266-120283.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Rautenbach, C.J.D., Eriksson, P.G., Qiang, M. & Gupta, P., 2012, **Dust Storms and their Horizontal Dust Loading in the Sistan Region, Iran**, Aeolian Research, 5, PP. 51-62, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.12.001>.
- Sadeghi Ravesh, M.H., 2022, **Applying Fuzzy Logic in Quantitative Analysis of Strategies Adopted for Combating Desertification Using Critical Analysis Approach**, Desert Ecosystem Engineering, 11(34), PP. 15-32, DOI: 10.22052/deej.2021.11.34.11.
- Salvati, L., 2014, **Toward a 'Sustainable' land Degradation? Vulnerability Degree and Component Balance in a Rapidly Changing Environment**, Environment, Development and Sustainability, 16, PP. 239-254, <https://doi.org/10.1007/s10668-013-9463-z>.
- Salvati, L., Zitti, M. & Perini, L., 2016, **Fifty Years on: Long-Term Patterns of Land Sensitivity to Desertification in Italy**, Land Degradation & Development, 27(2), PP. 97-107, <https://doi.org/10.1002/ldr.2226>.
- Sepehr, A., Hassanli, A., Ekhtesasi, M. & Jamali, J., 2007, **Quantitative Assessment of Desertification in South of Iran Using MEDALUS Method**, Environmental

- Monitoring and Assessment, 134, PP. 243-254, <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9613-6>.
- Shafizadeh-Moghadam, H., Minaei, M., Feng, Y. & Pontius, R.G., 2019, **GlobeLand30 Maps Show Four Times Larger Gross than Net Land Change from 2000 to 2010 in Asia**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 78, PP. 240-248, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.003>.
- Shahroozi, M., Ahmadi, F. & Hekmatnia, H., 2015, **Evaluation of Water Erosion in the Zahak Watershed Using the RUSLE Model**, Journal of Water and Soil Conservation Research, 22(1), PP. 43-58.
- Shihab, T.H. & Al-hameedawi, A.N., 2020, **Desertification Hazard Zonation in Central Iraq Using Multi-Criteria Evaluation and GIS**, Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 48(3), PP. 397-409, <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01079-2>.
- Silakhori, E., Ownegh, M. & Soleimani Sardo, M., 2019, **Assessment of Risk and Hazard Desertification Using Topsis-GIS Method (Case Study: Bashtin, Sabzevar, Razavi Province)**, Journal of Arid Regions Geographic Studies, 10(35), PP. 44-59.
- Stone, R.P.H., 2000, **Fact Sheet, Universal Soil Loss Equation**, Ministry of Agriculture.
- USDA, 1985, **Hydrology, National Engineering Handbook**, Section 4, US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.
- Woodruff, N.P. & Siddoway, F., 1965, **A Wind Erosion Equation**, Soil Science Society of America Journal, 29(5), PP. 602-608, <https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03615995002900050035x>.
- Yang, X., Yang, Q., Zhu, H., Wang, L., Wang, C., Pang, G., Du, C., Mubeen, M., Waleed, M. & Hussain, S., 2023, **Quantitative Evaluation of Soil Water and Wind Erosion Rates in Pakistan**, Remote Sensing, 15(9), P. 2404, <https://doi.org/10.3390/rs15092404>.
- Youssef, F., Visser, S., Karssenber, D., Bruggeman, A. & Erpul, G., 2012, **Calibration of RWEQ in a Patchy landscape; A First Step towards a Regional Scale Wind Erosion Model**, Aeolian Research, 3(4), PP. 467-476, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.03.009>.
- Zolfaghari, F., Shahriari, A., Fakhireh, A., Rashki, A.R., Noori, S. & Khosravi, H., 2011, **Assessment of Desertification Potential Using Imdpa Model in Sistan Plain**, Watershed Management Researches (Pajouhesh-va-Sazandegi), 24(2 (91)), PP. 97-107, SID: <https://sid.ir/paper/200655>.

This Page is Intentionally Left Blank