

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*

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

*Corresponding Author: m.minaei@um.ac.ir

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: 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

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

سجاد طالقانی، عاطفه بردویی، امیرحسین نجفی ده جلالی، مسعود مینایی*

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

*نویسنده عهده دار مکاتبات: m.minaei@um.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: بیابان‌زایی یکی از چالش‌های مهم دنیای امروز است، که پایداری محیط‌زیست را تهدید می‌کند. این پدیده ناشی از تخریب زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و می‌تواند پیامدهای جدی برای محیط‌زیست، اقتصاد و جامعه داشته باشد. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود 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 جهت ارزیابی این پدیده ضروری است. استفاده از فناوری‌های 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 می‌کنند و به مدیریت و حفاظت از مناطق در معرض خطر کمک می‌کنند. این پژوهش با هدف شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در کمربند شرقی ایران (سوچرزون سیستان و بلوچستان و بلوک افغان) با استفاده از مدل تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (OPA) است.

مواد و روش‌ها: زون زمین‌شناسی سیستان و بلوچستان و بلوک افغان با مساحت بیش از ۱۰۶ هزار کیلومتر مربع در کمربند شرقی ایران قرار دارد، و شامل بخش‌هایی از استان سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی است. این منطقه براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتین در اقلیم خشک و فراخشک قرار می‌گیرد. وجود چنین شرایطی در این منطقه همراه با تخریب پوشش گیاهی و خشک شدن منابع آبی این منطقه را مستعد بیابان‌زایی کرده است. در این پژوهش جهت بدست آوردن نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی در ابتدا نقشه پتانسیل فرسایش بادی و فرسایش آبی به ترتیب توسط مدل‌های RUSLE و RWEQ در منطقه مورد مطالعه بدست آمد، سپس نتایج این مدل‌ها به همراه سایر شاخص‌ها از قبیل پوشش گیاهی، شوری خاک، کاربری اراضی، درجه حرارت، رده بندی خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک و طبقه بندی اقلیمی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر اولویت‌ترتیبی (OPA) وزن دهی شدند، و در نهایت نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی در کمربند شرقی ایران بدست آمد.

نتایج: نتایج این مطالعه نشان داد که میانگین پتانسیل فرسایش بادی در کمربند شرقی ایران ۶۴ کیلوگرم بر مترمربع است. این در حالی است که ۱۶٪ از این منطقه، که عمدتاً در قسمت‌های شرقی و جنوب‌شرقی شامل شهرستان‌های زابل، سراوان و خاش قرار دارد، دارای پتانسیل فرسایش بادی بیش از ۵۱۲ کیلوگرم بر مترمربع هستند. در مقابل، میانگین فرسایش آبی ۳۶/۲۴ تن در هکتار بدست آمده است، که بیشترین

نرخ فرسایش آبی بیش از ۴۰ تن در هکتار ۳۴/۵٪ از مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود که عمدتاً در شمال منطقه شامل شهرستان نهبندان در استان خراسان جنوبی و بخش‌های مرکزی منطقه می‌باشد. در نهایت، نتایج مدل تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر اولویت‌ترتیبی نشان داده که مهم‌ترین شاخص‌ها از منظر متخصصان در شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در این منطقه، شاخص فرسایش بادی، پوشش گیاهی و شوری خاک است. و قسمت‌های شرقی و جنوب‌شرقی منطقه به شدت تحت تأثیر بیابان‌زایی قرار دارند.

بحث و نتیجه‌گیری: 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، بخصوص در نیمه شرقی ایران که در سال‌های اخیر با پدیده خشکسالی گسترده‌ای مواجه شده‌اند بیشترین تأثیر را بر روی بیابان‌زایی داشته است. برای مقابله با این مشکل، نیاز به ابتکارات مدیریتی مانند مدیریت منابع آب، توسعه کشاورزی پایدار و حفاظت از تنوع زیستی است. این ابتکارات 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 جهت تدوین برنامه‌های مدیریتی مؤثر باشد. همچنین، استفاده از شاخص‌هایی مانند مدیریت چرا، جمعیت و سطح آب‌های زیرزمینی در مطالعات آتی، امکان ارزیابی بهتر وضعیت بیابان‌زایی را فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: OPA, RWEQ, RUSLE, MCDM, بیابان‌زایی، فرسایش

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های جهانی که پایداری محیط‌زیست را تهدید می‌کند، بیابان‌زایی است (Salvati, ۲۰۱۴). اکوسیستم‌های بیابانی به شدت آسیب‌پذیر هستند بنابراین حفاظت و تضمین پایداری آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (Minaei, ۲۰۲۳). این فرایند به دلیل تخریب زمین در مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه مرطوب اتفاق می‌افتد که ممکن است ناشی از عوامل طبیعی یا انسانی باشد (Akbari et al., ۲۰۲۱). 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., ۲۰۱۰; Salvati, Zitti, & Perini, ۲۰۱۶). این پدیده می‌تواند پیامدهای جدی برای محیط زیست، اقتصاد و جامعه داشته باشد، در حال حاضر در بیش از ۱۱۰ کشور در سراسر جهان، بیابان‌زایی اثرات منفی خود را نشان می‌دهد و می‌تواند منجر به کاهش بهره‌وری زمین شود (Sepehr et al., ۲۰۰۷)، همچنین به نقل از (Kamali Maskooni, Kamali, & Khanamani, ۲۰۲۱) و براساس برآورد کنفرانس جهانی بیابان‌زایی و بیابان‌زدایی، این پدیده‌ی مخرب تهدیدی برای ۴۰ درصد از مساحت کل سطح زمین است 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 ۵ میلیون نفر خواهد شد.

کشور ایران به دلیل اینکه ۸۵ درصد از مساحتش در قلمرو زمین‌های خشک، نیمه‌خشک و فراخشک قرار دارد، دارای زیست‌بومی شکننده است (Bakhshandehmehr, Soltani, & Sepehr, ۲۰۱۳). بیابان‌زایی و تخریب زیستگاه‌های طبیعی، از مهم‌ترین نگرانی‌های مدیران و برنامه‌ریزان منابع طبیعی است، که حفاظت از این مناطق نیازمند مدیریت علمی و بهره‌گیری از دانش و تخصص کارشناسان است (Sadeghi Ravesh, ۲۰۲۲). با توجه به اثرات مخرب و جبران‌ناپذیر بیابان‌زایی، شناسایی و ارزیابی عوامل مؤثر بر آن و تعیین مناطقی که با این پدیده مواجه هستند، از ضروریات مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (Silakhori et al., ۲۰۱۹).

پیشگیری از بیابان‌زایی نیازمند شناخت وسعت اراضی بیابانی و یافتن روند تغییرات آن‌ها می‌باشد (Dastourani, ۲۰۲۲, Shalmzari &)، همچنین تدوین روش‌های ارزیابی بیابان‌زایی نیازمند شناخت فرایندها، عوامل و شاخص‌های آن است (Pishyar et al., ۲۰۱۹). جهت ارزیابی پدیده بیابان‌زایی و ارائه راهکارهای مطلوب جهت مبارزه با آن، مدل‌های فراوانی ارائه شده است که استفاده از این مدل‌ها جهت درک و پیش‌بینی خطرات احتمالی زیست محیطی از اهمیت فراوانی برخوردار هستند (Afifi & Sohrabi, ۲۰۲۳). استفاده از سنجش از دور^۱ و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲، همراه با به کارگیری روش‌های آماری و ریاضی، مانند روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM^۳)، این تکنیک‌ها را به ابزارهای موثری برای ارزیابی مسائل مختلف زیست‌محیطی، از جمله بیابان‌زایی تبدیل کرده است (Akbari et al., ۲۰۲۱; El Baroudy, ۲۰۱۱). از مزایای استفاده از سنجش از دور نسبت به روش‌های صحرایی جهت ارزیابی پدیده بیابان‌زایی می‌توان به امکان جمع‌آوری داده‌ها بدون نیاز به حضور فیزیکی در مناطق دورافتاده، صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های مرتبط با جمع‌آوری داده‌های میدانی اشاره کرد. همچنین استفاده از این ابزار به دلیل قابلیت پوشش‌دهی وسیع و دستیابی به نواحی غیرقابل دسترس، به پژوهشگران کمک می‌کند تا تغییرات در اکوسیستم‌های بیابانی را به طور دقیق‌تری رصد کنند. در نهایت، این داده‌ها به مدل‌سازی و پیش‌بینی روندهای آینده بیابان‌زایی کمک می‌کنند و می‌توانند به عنوان ابزار تکمیلی برای روش‌های صحرایی مورد استفاده قرار گیرند (Albalawi & Kumar, ۲۰۱۳). مطالعات متعددی در زمینه جنبه‌های مختلف بیابان‌زایی در شرق ایران انجام شده است، از جمله بررسی پوشش گیاهی، خشکسالی، بارش و شناسایی کانون‌های گردوغبار، برخی از این مطالعات شامل پژوهش‌های (Ghasemifar et al., ۲۰۲۲; Cheki et al., ۲۰۲۳) هستند. علاوه بر این، از پژوهش‌هایی که به طور مستقیم به موضوع بیابان‌زایی پرداخته‌اند، می‌توان به موارد پیش رو اشاره کرد:

(Boudjemline and Semar., ۲۰۱۸) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بر اساس مدل مدالوس در حوضه هودنا^۴، الجزایر و بر اساس 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 توسط بوعلی و بهبهانی (۲۰۱۹) بر روی منطقه دشت سگزی اصفهان انجام شد، مهم‌ترین عامل شدت گرفتن بیابان‌زایی در این منطقه کویری را شرایط آب و هوایی، فرسایش بادی و همچنین تصمیمات و سیاست‌های مدیریتی تشخیص دادند.

مطالعه کفاش و همکاران در سال ۲۰۱۸ نشان داد که 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. در

^۱ Remote Sensing

^۲ Geographic Information System

^۳ Multiple-criteria decision analysis

^۴ Hodna

پژوهشی دیگر که توسط (Silakhori et al., ۲۰۱۹) جهت بررسی شدت بیابان زایی در منطقه باشتین سبزوار با استفاده از عوامل اقلیم، پوشش گیاهی و فرسایش با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری^۱ TOPSIS انجام شد، نشان داد که شوری آب و خاک مؤثرترین شاخص‌ها در بیابان‌زایی این منطقه هستند.

خلیل و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP^۲) به بررسی شدت بیابان‌زایی در شرق استان اصفهان پرداختند. در این پژوهش شش معیار اصلی شامل اقلیم، خاک، آب زیرزمینی، پوشش گیاهی، فرسایش خاک و مدیریت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بخش قابل توجهی از منطقه در کلاس شدید بیابان‌زایی قرار دارد و عامل اقلیم بیشترین تأثیر را بر این پدیده در شرق اصفهان داشته است و پس از آن، عوامل مدیریت و خاک به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. همچنین در مطالعه‌ای که به منظور پهنه‌بندی خطر بیابان‌زایی در مرکز عراق توسط Shihab and Al-hameedawi (۲۰۲۰) انجام شد، به وسیله‌ی شاخص‌های جهت شیب، شیب، بارندگی، دما، کاربری زمین و سرعت باد با بکارگیری از روش AHP در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر بیابان‌زایی این منطقه را تهیه کردند. با ارزیابی این شاخص‌ها نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که بارندگی، جهت شیب و کاربری زمین مهم‌ترین تأثیر را بر فرآیند بیابان‌زایی در منطقه مورد نظر داشته است.

دستورانی و شلمزاری (۲۰۲۲) در پژوهشی به مقایسه کارایی دو روش فازی و شاخص ترکیبی بیابان‌زایی (IDI^۳) در شهرستان تربت حیدریه در استان خراسان رضوی به منظور ارزیابی شدت بیابان‌زایی پرداختند. بدین منظور ابتدا شاخص‌های پوشش گیاهی، شوری، خشکسالی و دما برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ میلادی استخراج شدند. سپس با بهره‌گیری از مدل AHP وزن هر یک از شاخص‌ها را بدست آوردند. در نهایت، با روش ترکیب وزنی و شاخص ترکیبی بیابان‌زایی نقشه شدت بیابان‌زایی در منطقه تعیین شد. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص ترکیبی بیابان‌زایی کارایی بیشتری نسبت به روش فازی دارد.

بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره ابزاری کارآمد جهت ارزیابی مسائل مختلف زیست‌محیطی مانند بیابان‌زایی است. اما بیشتر مطالعات انجام شده جهت بررسی بیابان‌زایی در ایران بر پایه مدل‌هایی چون مدالوس^۴ و IMDPA^۵ استوار است. این روش‌ها می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای تدوین معیارها و شاخص‌ها استفاده شوند، ولی به دلیل اهمیت یکسانی که به هر کدام از شاخص‌ها می‌دهند، در عمل وزن و سهم اثر یکسانی به همه معیارها و شاخص‌ها داده می‌شود. 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

^۱ Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

^۲ Analytic hierarchy process

^۳ Integrated Desertification Index

^۴ Medalus

^۵ Iranian model of desertification potential assessment

به نظر می‌رسد. به همین جهت در این پژوهش به منظور شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی از روش تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (OPA^1) استفاده می‌شود، که یکی از مهمترین مزیت‌های این مدل تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره که آن را از میان سایر مدل‌ها متمایز می‌کند، اختصاص وزن به کارشناسان است. این امر موجب دستیابی به نتایج دقیق‌تر و متناسب‌تر با شرایط واقعی می‌شود، که باعث می‌شود ارزیابی‌ها و اولویت‌بندی‌ها به شکل عادلانه‌تر و معتبرتری انجام شوند. کمربند شرقی ایران، به‌ویژه در منطقه سیستان، کمبود بارندگی، دمای بالا، و میزان تبخیر و تعرق زیاد، به همراه اقلیم خشک و فراخشک، به شدت اکوسیستم این منطقه را تهدید می‌کند (Zolfaghari et al., ۲۰۱۱). به همین دلیل، این منطقه یکی از حساس‌ترین مناطق جهان در زمینه طوفان‌های شن و فرسایش بادی محسوب می‌شود (Rahdari et al., ۲۰۲۳).

با توجه به ضرورت مطالعات محلی، تاکنون تحقیقاتی در منطقه سوچرزون سیستان و بلوک افغان^۲ انجام نشده است. بنابراین در این مطالعه به شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در این منطقه پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

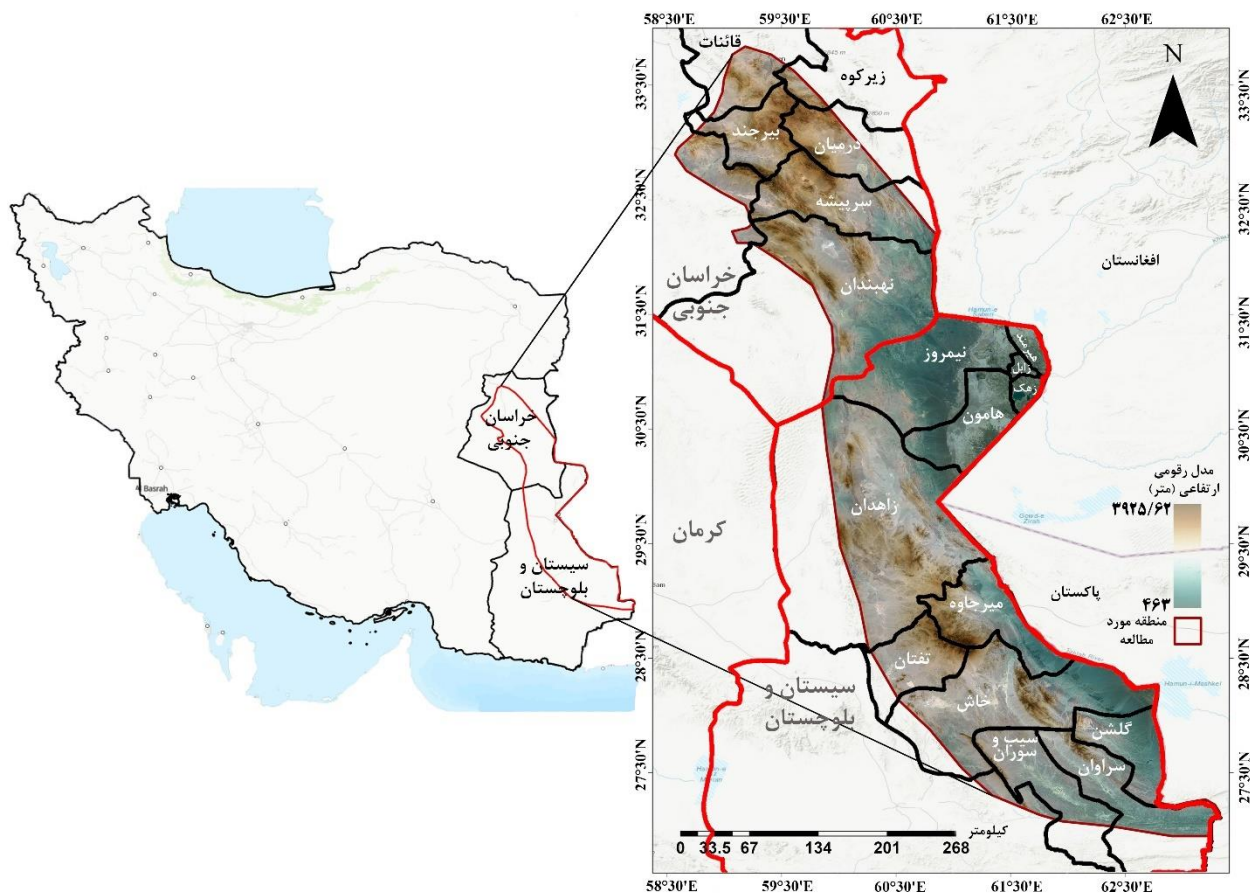
۲-۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، زون زمین‌شناسی سیستان و بلوک 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 دارد، و با وسعت 106685 km^2 بخش‌هایی از استان سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی را شامل می‌شود. بیشترین و کمترین ارتفاع در این منطقه به ترتیب ۳۹۲۵ و ۴۶۳ متر در استان سیستان و بلوچستان و میانگین ارتفاع در این منطقه ۱۳۴۰ متر از سطح دریا است (شکل ۱). میانگین دمای سالانه $22/48$ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی‌متر در این منطقه، نشان‌دهنده شرایط اقلیمی خشک و فراخشک براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن است. با توجه به نقشه کاربری و پوشش اراضی برگرفته از مرکز مطالعات تغییرات اقلیمی سازمان فضایی اروپا (ESA^۳) $45/46\%$ از اراضی این منطقه فاقد پوشش و زمین‌های بایر هستند؛ در حالی که تنها $1/34\%$ 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 فرآیند بیابان‌زایی قرار گیرد. بنابراین، شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در این منطقه برای برنامه‌ریزی آینده از اهمیت بالایی برخوردار است.

^۱ Ordinal Priority Approach

^۲ Sistan Suture Zone and Afghanistan Blocks

^۳ European Space Agency <https://cds.climate.copernicus.eu>



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کمر بند شرقی ایران

۲-۲- داده های مورد استفاده

به منظور شناخت و دستیابی به مؤثرترین شاخص‌ها در شناسایی مناطق مستعد بیابانی در منطقه مورد مطالعه از نظر کارشناسان بهره گرفته شد، که لیستی از شاخص‌ها و منابع آن‌ها در (جدول ۱) نشان داده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل داده های هواشناسی از قبیل سرعت باد، رطوبت خاک، عمق برف، بارندگی، درجه حرارت و طبقه بندی اقلیمی است. ترکیب مکانیکی، ماده آلی، شوری و چندین ویژگی دیگر خاک از پایگاه داده جهانی خاک همگن شده (OLM^۱) به دست آمد که بر اساس پیش‌بینی‌های صورت گرفته توسط یادگیری ماشین از بانک داده‌های پروفیل‌ها و نمونه‌های خاک است. اطلاعات موجود در مجموعه داده OLM در قالب شش عمق استاندارد

^۱ OpenLandMap

(۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر) تقسیم شدند. شاخص پوشش گیاهی^۱ NDVI برای استفاده در مدل‌های فرسایش بادی، فرسایش آبی و مدل OPA به ترتیب از (MODIS^{۱۳Q۱}) تابش سنج طیفی تصویربرداری با وضوح متوسط ناسا (MODIS)،^۸ landsat و sentinel-۲ بدست آمد. داده‌های مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از ماموریت توپوگرافی رادار شاتل سازمان ملی هوانوردی و فضایی (NASA-SRTM^۲) گرفته شد. همچنین داده‌های پوشش زمین استفاده شده در این مطالعه نیز از مرکز مطالعات تغییرات اقلیمی (CCI^۳) در سازمان فضایی اروپا (ESA^۴) استخراج شد.

جدول ۱: جمع‌آوری داده‌ها و منابع آن‌ها

مرحله	داده	منبع	سال	تفکیک مکانی (متر)	تفکیک زمانی
۱. مدل فرسایش بادی RWEQ	سرعت باد	ERA ^{۵*}	۲۰۲۲	۱۱۱۳۲	ساعتی
	رطوبت خاک	FLDAS [*]	۲۰۲۲	۱۱۱۳۲	ساعتی
	عمق برف	ERA ^{۵*}	۲۰۲۲	۱۱۱۳۲	ساعتی
	ویژگی‌های خاک	OpenLandMap [*]	-	۲۵۰	-
	مدل رقومی ارتفاعی (DEM)	SRTM [*]	-	۳۰	-
	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)	MODIS MOD ^{۱۳Q۱*}	۲۰۲۲	۲۵۰	۱۶ روز
۲. مدل فرسایش آبی RUSLE	بارندگی	CHIRPS Pentad [*]	۲۰۲۲	۵۵۶۶	روزانه
	خاک	OpenLandMap [*]	-	۲۵۰	-
	کاربری اراضی	MODIS MCD ^{۱۳Q۱*}	۲۰۲۲	۵۰۰	سالانه
	مدل رقومی ارتفاعی (DEM)	SRTM [*]	-	۳۰	-
	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)	Sentinel-۲ MSI [*]	۲۰۲۲	۱۰	۵ روز
	پوشش گیاهی	landsat ^{۸*}	۲۰۲۲	۳۰	۱۶ روز
۳. لایه‌های ورودی مدل OPA	درجه حرارت	GLDAS [*]	۲۰۲۲	۲۷۸۳۰	ساعتی
	طبقه بندی اقلیمی	سازمان جنگل‌ها و مراتع کل کشور	-	-	-
	ویژگی‌های خاک	OpenLandMap [*]	-	۲۵۰	-
	کاربری اراضی	ESA_CCI	۲۰۲۲	۳۰۰	سالانه

* به این معنی است که مجموعه داده مورد نظر در GEE^۵ قابلیت دسترسی دارد.

۲-۳- روش شناسی

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

^۱ Normalized Difference Vegetation Index

^۲ National Aeronautics and Space Administration Shuttle Radar Topographic Mission

^۳ Climate Change Initiative

^۴ European Space Agency

^۵ Google earth engine

-
- The flowchart illustrates the proposed method for land suitability analysis, organized into five main steps:
- 1. جمع‌آوری داده‌ها (Data Collection):** This step involves gathering various data sources, including:
 - W/F (عامل اقلیم - Climate Factor): Derived from precipitation, evaporation, and soil depth.
 - SCF (عامل پوسته شدن سطح - Surface Erosion Factor): Derived from soil erosion rates.
 - EF (جزء فرسایش پذیر - Erosion Susceptibility): Derived from soil erosion rates.
 - K' (ضریب زبری خاک - Soil Coefficient): Derived from soil texture.
 - C (ضریب محصول ترکیبی - Composite Crop Coefficient): Derived from crop yield and soil fertility.
 - PH (خاک): Derived from soil pH.
 - Model DEM (ارتفاع): Derived from digital elevation data.
 - NDVI (شاخص نورال شده تفاوت پوشش گیاهی): Derived from satellite imagery.
 - 2. انتخاب مدل (Model Selection):** This step involves selecting the appropriate models for the analysis:
 - Model RWEQ:** A model that integrates the W/F, SCF, EF, K', and C factors.
 - Model RESLE:** A model that integrates the K, R, P, LS, and S factors.
 - 3. مدل RWEQ:** This model is used to calculate the RWEQ index, which is then used to determine the land suitability index (LSI).
 - 4. مدل RESLE:** This model is used to calculate the RESLE index, which is then used to determine the land suitability index (LSI).
 - 5. استفاده از مدل همپوشانی وزنی جهت تولید نقشه مناطق مستعد بیابان زایی (Use of the Weighted Overlay Model for the Production of the Map of Suitable Areas for Desertification):** This step involves using the weighted overlay model to produce the final map of suitable areas for desertification.

۲-۴- معادله فرسایش بادی اصلاح شده (RWEQ)

¹ Revised wind erosion equation
² Revised Universal Soil Loss Equation
³ WIND EROSION EQUATION

توجهی در ورودی‌ها برخوردار است. ورودی‌های این مدل شامل فاکتورهای آب و هوا (WF)، ضریب پوسته شدن خاک (SCF)، ضریب فرسایش پذیری (EF)، زبری خاک (K) و پوشش گیاهی (C) است (Youssef et al., ۲۰۱۲). خروجی این مدل نیز جرمی از خاک است که، در یک واحد عرض و از سطح خاک تا ارتفاع ۲ متری حمل می‌شود و مانند اکثر مدل‌های فرسایش بادی، باد به عنوان نیروی محرکه اصلی در این مدل نقش کلیدی ایفا می‌کند (Fryrear et al., ۱۹۹۹).

در این مطالعه با استفاده از داده‌های سنجش از دور، پتانسیل فرسایش بادی در منطقه سوچرزون سیستان و بلوچستان در سال ۲۰۲۲ بر اساس مدل RWEQ تولید شد:

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

در رابطه (۱) SWEP مقدار پتانسیل فرسایش بادی در واحد سطح (kg/m^2)؛ x فاصله از لبه باد مخالف میدان (m)؛ s طول میدان بحرانی (m) است که برای مناطق خشک ۱۰ متر در نظر گرفته می‌شود (Han et al., ۲۰۲۳; Lyu et al., ۲۰۲۱; Yang et al., ۲۰۲۳).

$$Q_{\max} = ۱۰^9 / ۸ * WF * EF * SCF * K' * C \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$S = ۱۵۰ / ۷۱ * (WF * EF * SCF * K' * C) - ۰ / ۳۷۱۱ \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۲ و ۳) $Q_{\max}$ حداکثر ظرفیت انتقال (kg/m)؛ WF فاکتور اقلیمی (kg/m)؛ EF ضریب فرسایش پذیری خاک (بدون بعد)؛ SCF عامل پوسته شدن سطح (بدون بعد)؛ K' ضریب زبری خاک (بدون بعد) و C نشان دهنده ضریب پوشش گیاهی (بدون بعد) است.

فاکتور اقلیمی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

در رابطه (۴) SW رطوبت خاک (بدون بعد)، SD ضریب پوشش برف (بدون بعد) که نشان دهنده نسبت روزهای بدون پوشش برفی به تعداد کل روزهای مورد مطالعه است، عمق پوشش برف کمتر از ۲۵/۴ میلی متر نشان دهنده عدم وجود پوشش برفی است.

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

در این رابطه u^2 سرعت باد در ۲ متر (متر بر ثانیه)، ut سرعت آستانه باد در ۲ متر، N تعداد مشاهدات سرعت باد در دوره $(u^2 > ut)$ 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 به صورت زیر محاسبه کرد روابط (۶ و ۷).

$$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33\frac{Sa}{Cl} - 2.59 OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad \text{رابطه (۶)}$$

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

در این روابط 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 عدم وجود داده‌های مربوط به میزان کربنات کلسیم خاک در مجموعه داده‌های گوگل ارتش انجین در نتیجه از پارامتر pH استفاده می‌شود، زیرا رابطه مثبت غیرخطی بین pH و کربنات کلسیم خاک وجود دارد، بر اساس بیش از ۱۵۰۰۰ واحد مختلف نقشه‌برداری خاک، یک معادله نمایی برای کمی کردن رابطه بین pH خاک و کربنات کلسیم خاک ($CaCO_3$) پیشنهاد شده است، رابطه (۸) (Djili & Doud, ۱۹۹۹).

$$PH = 4.576 * CaCO_3^{0.9089} + 2.378 \quad \text{رابطه (۸)}$$

ضریب زبری خاک (K') را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

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

در رابطه (۹) α گرادیان شیب (برحسب درجه) است، که می‌تواند توسط مدل رقومی ارتفاعی (DEM) محاسبه شود. داده‌ی مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از ($NASA-SRTM^1$) (با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) با استفاده از سامانه گوگل ارتش انجین بدست آمده است.

ضریب محصول ترکیبی (C) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

¹ National Aeronautics and Space Administration Shuttle Radar Topographic Mission

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

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

در روابط (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 نشان دهنده $NDVI_{veg}$ و $NDVI_{soil}$ می باشد.

۲-۵- مدل فرسایش آبی RUSLE

این مدل تجربی جهت برآورد میزان خاک از دست رفته در اثر فرسایش آبی مورد استفاده قرار می گیرد، که براساس روابط متعددی میان عوامل مؤثر بر فرسایش خاک مانند بارش، شیب زمین، نوع خاک، و پوشش گیاهی توسعه یافته است. معادله ی RUSLE تلفات خاک را بر حسب تن در هکتار بر اساس پنج پارامتر به صورت زیر محاسبه می کند:

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

در رابطه (۱۲) A میزان فرسایش خاک (بر حسب تن در هکتار) و پارامترهای، R فرساینده گی باران، K فرسایش پذیری خاک، LS عامل توپوگرافی، C پوشش گیاهی و P عامل حفاظت خاک بر اساس کاربری زمین را نشان می دهد.

عامل فرساینده گی باران با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می شود، که بر اساس میزان بارش در منطقه محاسبه می شود:

$$R = 79 + 0.263 * Xa \quad (۱۳)$$

که در این رابطه Xa میانگین بارندگی سالانه بر حسب میلی متر است.

عامل K فرسایش پذیری خاک را نشان می دهد. که وابسته به خصوصیات خاک و مقاومت ذاتی آن در برابر فرسایش توسط باران و رواناب، و بازتابی از فعل و انفعالات، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک است که بر آن تأثیر می گذارد. مقدار K با استفاده از جدول منتشر شده توسط (Stone, ۲۰۰۰) تعیین می شود (جدول ۱).

جدول ۲: ویژگی های خاک و عامل K مربوطه

عامل K	بافت خاک
۰/۴۹	Clay (رس)
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 تاثیر توپوگرافی بر فرسایش را توصیف می کند، که به طور مستقیم با طول دامنه و شیب ارتباط دارد. نقشه عامل LS با استفاده از رابطه (۱۴) که توسط (Moore & Burch, ۱۹۸۶; D. Moore & J. Burch, ۱۹۸۶) پیشنهاد شده تولید شد.

$$LS = \left(\frac{\sin slope}{0.896} \right)^{1.3} * \left(\frac{\text{اندازه پیکسل}}{22.13} \right)^{0.4} * \text{طول جریان} \quad (14)$$

که در آن شیب و طول دامنه توسط مدل رقومی ارتفاعی SRTM بدست آمد.

عامل C نشان دهنده تاثیر پوشش گیاهی بر فرسایش است. در ابتدا نقشه پوشش گیاهی نرمال شده منطقه توسط sentinel۲ بدست آمد، سپس با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) که توسط (Durigon et al., ۲۰۱۴) پیشنهاد شده است نقشه عامل C محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{NDVI+1}{2} \quad (15)$$

عامل P تاثیر انواع کاربری زمین بر نرخ هدررفت خاک را توصیف می کند. در این مطالعه از طبقه بندی 'LULC با استفاده از پروداکت MOD۱۲Q۱ ماهواره مودیس برای تعیین فاکتور P استفاده شد. سپس با استفاده از جدول شماره ۳ که توسط (Usda, ۱۹۸۵) ارائه شده جهت بدست آوردن نقشه عامل P استفاده شد.

جدول ۳: فاکتور P برای طبقات مختلف 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 (P,LS,K,R,C) نقشه نهایی فرسایش آبی منطقه بر حسب (تن در هکتار در سال) بدست آمد.

۲-۶- مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره OPA

با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چند معیاره مبتنی بر اولویت ترتیبی (OPA) (Ataei et al., ۲۰۲۰) که دارای نتایج و دقت بالا و پیاده‌سازی سریع برای محاسبه ایجاد شده، وزن معیارها ارزیابی شد. فرآیند دستیابی به وزن معیارها شامل مراحل زیر است (Mahmoudi et al., ۲۰۲۱): ۱. در ابتدا فهرستی از 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 که معیارهای مورد نظر را رتبه‌بندی کنند، پس از آن، با انجام تجزیه و تحلیل پرسشنامه و تعیین رتبه برای هر متخصص، بازخورد کارشناسان در مورد رتبه‌بندی آن‌ها و اولویت معیارها بر اساس دیدگاه متخصصان بدست آمد. ۳. مدل ریاضی خطی OPA با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه شد؛

Max ϕ

$$S.t: \phi \leq i \left(j \left(k \left(W_{ijk^r} - W_{ijk^{r+1}} \right) \right) \right) \forall i, j, k, r$$

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

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

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

۴. در نهایت وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شد؛

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

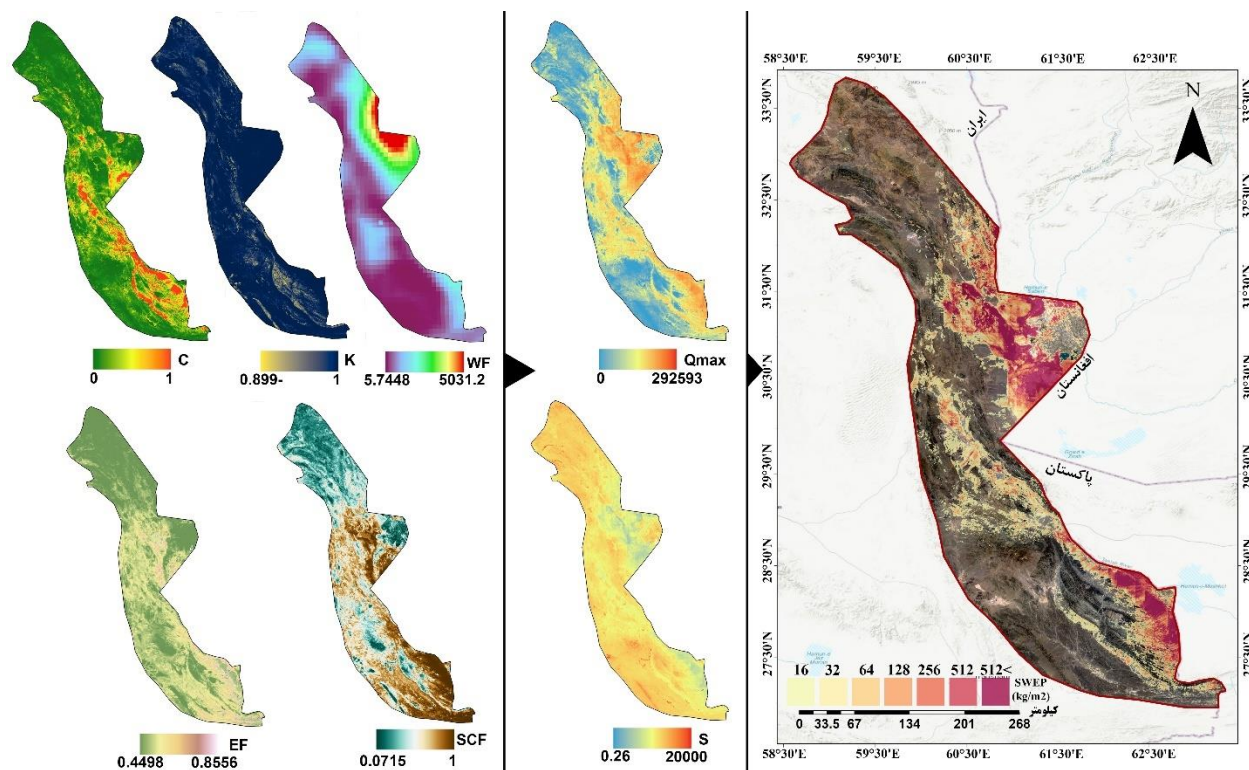
که در این رابطه ϕ : تابع هدف، J تعداد معیارها، K تعداد گزینه‌ها، I تعداد متخصصان، j شاخص معیارها $(1, \dots, n)$ ، k شاخص گزینه‌ها $(1, \dots, k)$ ، i شاخص خبرگان $(1, \dots, I)$ ، W_{ij} وزن اصلی معیار j توسط متخصص I در رتبه r است.

در مرحله آخر، تحلیل همپوشانی وزنی برای تولید نقشه نهایی پتانسیل بیابان‌زایی با استفاده از ArcGIS Pro انجام شد. ابتدا لایه‌ها استاندارد سازی شد، سپس هر معیار در وزن متناظرش ضرب و باهم جمع می شود و در نهایت نقشه پتانسیل بیابان‌زایی منطقه بدست آمد.

۳- نتایج

۳-۱- فرسایش بادی

شکل ۳ توزیع مکانی پتانسیل فرسایش بادی همراه با ۵ عامل محرک و تأثیرگذار بر آن را در سوچرزون سیستان و بلوک افغان در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد. پتانسیل فرسایش بادی تنوع مکانی قابل توجهی را نشان می‌دهد که دامنه آن بین ۰-۵۸۴ kg/m^2 و میانگین آن در این منطقه ۶۴/۳ kg/m^2 است. میزان پتانسیل فرسایش بادی در قسمت‌های شمالی، مرکزی و جنوبی منطقه مورد مطالعه کمتر از ۱۶ kg/m^2 است که حدود ۶۸٪ از کل این منطقه را تشکیل می‌دهد. پتانسیل فرسایش بادی ۱۶ تا ۱۲۸ kg/m^2 قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی سربیشه و نهبندان در خراسان جنوبی، قسمت‌های مرکزی زاهدان تا شرق میرجاوه، شمال سراوان و مرکز خاش در استان سیستان و بلوچستان را تشکیل می‌دهد، که تنها ۹٪ از کل منطقه را شامل می‌شود. بیش از ۲۲٪ منطقه که عموماً در قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی قرار دارند، شامل شهرستان‌های نیمروز، هیرمند، هامون، زابل، سراوان و خاش در استان سیستان و بلوچستان همچنین جنوب شرقی نهبندان در استان خراسان جنوبی در کلاس بالای فرسایش بادی بیش از ۱۲۸ kg/m^2 قرار می‌گیرند. همانطور که در شکل ۳ مشخص است، این مناطق به علت پوشش گیاهی ضعیف، وجود خاک‌های ضعیف و شکننده، مسطح بودن و همچنین تأثیر پذیری از وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، پتانسیل بالای فرسایش بادی را تجربه می‌کنند.

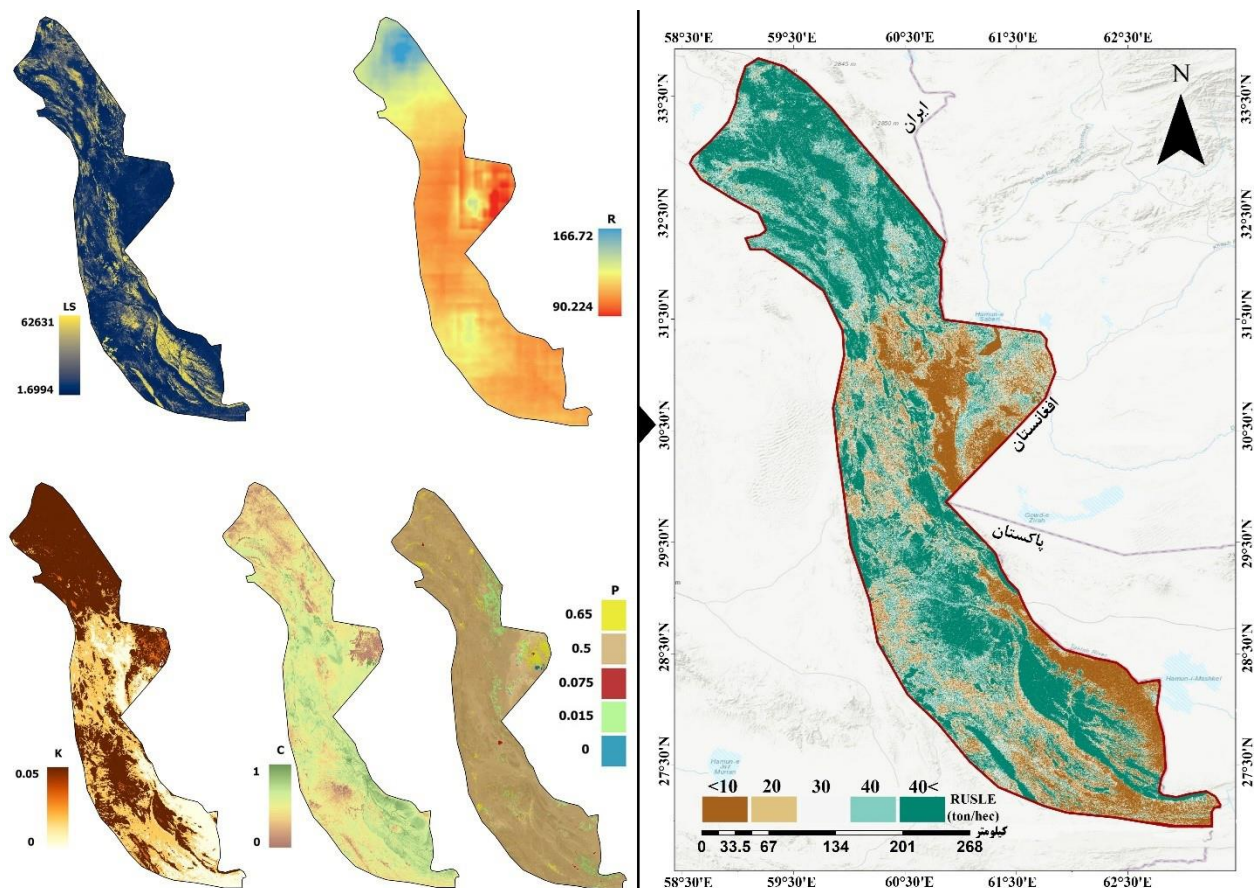


شکل ۳: پتانسیل فرسایش بادی (SWEP) همراه با عامل‌های C: ضریب پوشش گیاهی، K: ضریب زبری خاک، WF: عامل اقلیم، EF: جزء فرسایش پذیر و SCF: ضریب پوسته خاک.

۳-۲- فرسایش آبی

نقشه‌ی عوامل موثر در فرسایش آبی توسط مدل RUSLE شامل نقشه عامل‌های فرساینده‌ی باران، فرسایش پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و عامل کاربری زمین در شکل ۴ ارائه شده است. میزان شاخص فرساینده‌ی باران برای کمربند شرقی ایران از ۹۰ تا ۱۶۶ ($\text{mm ha}^{-1} \text{y}^{-1}$) متغیر بود که در نواحی شمالی در جنوب خراسان جنوبی بیشترین میزان را به خود اختصاص داده بود. این منطقه دارای خاک‌های نسبتاً حساس به فرسایش اند و خاک‌های قسمت‌های مرکزی، شرقی و جنوبی این منطقه به مراتب نسبت به خاک‌های شمالی، فرسایش پذیری بیشتری دارند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عامل فرسایش‌پذیری خاک در کمربند شرقی ایران از صفر (مناطق فاقد خاک) تا ۰/۰۵ متغیر است. میزان شاخص توپوگرافی این منطقه از ۱/۴۹ تا ۶۲۶۳۱ متغیر است. کمترین میزان این عامل مربوط به مناطق مسطح (شرق منطقه شامل هامون، نیمروز، زهک، زابل و هیرمند) و بیشترین میزان آن مربوط به مناطق مرتفع (رشته کوه‌های شمال و جنوب منطقه) است. شاخص پوشش گیاهی در نواحی با پوشش گیاهی بیشتر شامل قسمت‌های شمالی، شرقی و جنوب غربی ارزش صفر و در نواحی فاقد پوشش ارزش بیشتری دارد. همچنین عامل کاربری زمین هرچقدر ارزش عددی بیشتری داشته باشد بدین معنی است که این عامل نقش کمتری در حفاظت خاک در مقابل فرسایش آبی دارند. در نهایت پس از

تلفیق لایه‌ها میزان فرسایش آبی برآورد شده توسط مدل RUSLE در این منطقه بدست 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) می‌باشد. این مناطق با فرسایش کم عمدتاً مربوط به زمین‌های زراعی است که با توپوگرافی تحت سلطه طبقات کم شیب مشخص می‌شود، در مناطق مسطح تاثیر عامل توپوگرافی کاهش و بیشتر نوع خاک و میزان پوشش گیاهی بر مقدار فرسایش خاک اثر می‌گذارد. تقریباً $43/2\%$ از منطقه دارای فرسایش متوسط (10 تا 30 تن در هکتار) می‌باشد؛ که در مناطقی با شیب‌های تند، زمین‌های ناهموار و پوشش گیاهی ضعیف این میزان از فرسایش رخ می‌دهد، در نهایت $34/5\%$ از سطح این منطقه دارای نرخ فرسایش بالا (> 30 تن در هکتار) می‌باشد که در مناطق کوهستانی در شمال و بخش‌های مرکزی کمربند شرقی ایران شامل قسمت‌هایی از شهرستان نهبندان در خراسان جنوبی، سراوان، خاش و تفتان در سیستان و بلوچستان این میزان از فرسایش رخ می‌دهد.



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

۳-۳- مناطق مستعد بیابان‌زایی

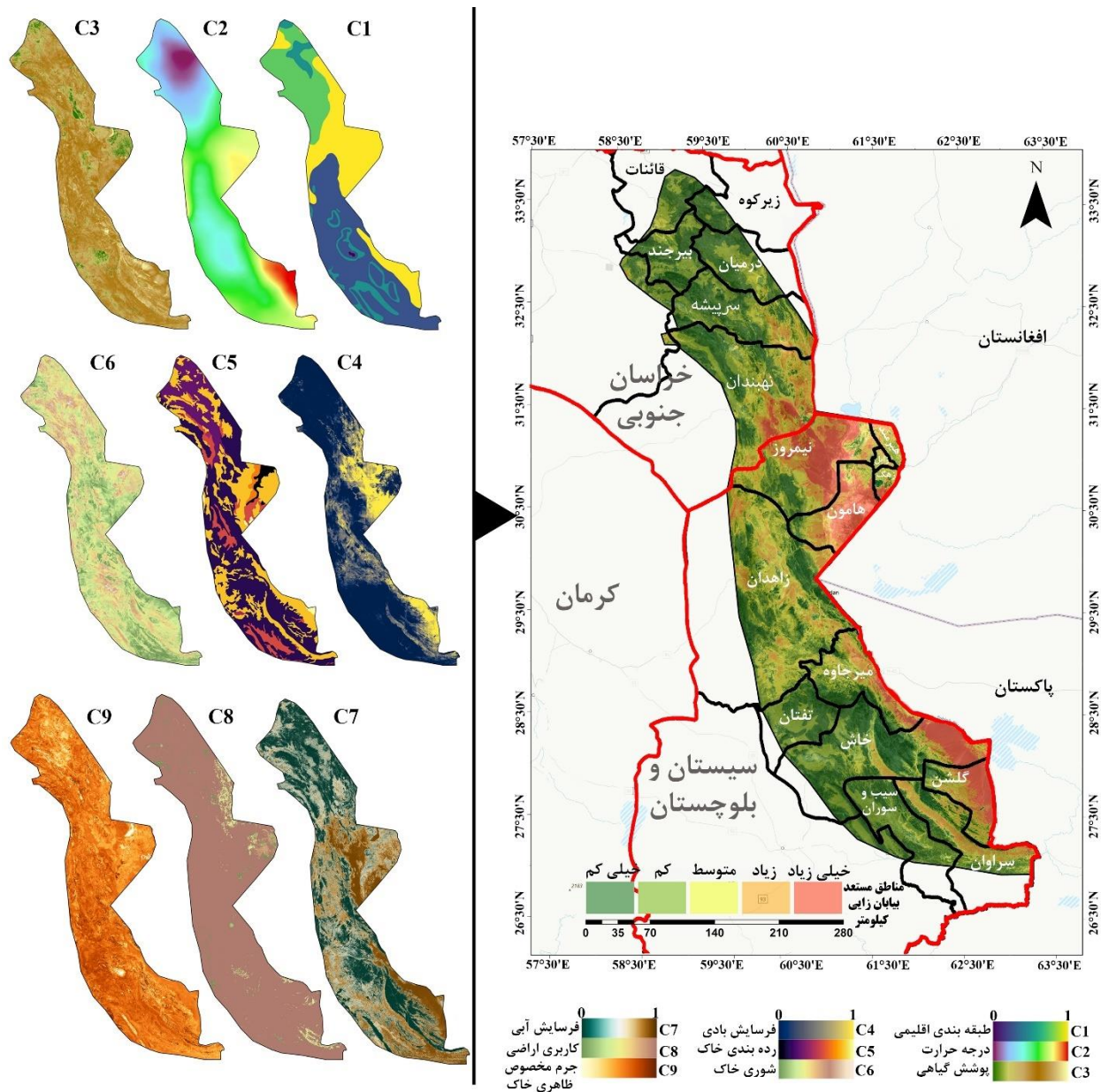
شاخص‌های مورد بررسی جهت شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در این مطالعه شامل: طبقه‌بندی اقلیمی، درجه حرارت، پوشش گیاهی، فرسایش بادی، بافت خاک، شوری خاک، فرسایش آبی، کاربری اراضی و جرم مخصوص ظاهری خاک می‌باشد. نتایج الگوریتم تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی برای وزن بهینه معیارهای ارزیابی به همراه فهرست خبرگانی که در تجزیه و تحلیل پرسشنامه شرکت کردند و رتبه اولویت آن‌ها برای معیارهای مورد ارزیابی بر اساس تجربیات و دانش آن‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج حاصل از وزن‌دهی نشان می‌دهد که مهمترین شاخص از منظر متخصصان به منظور شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی در منطقه سوچرزون سیستان و بلوک افغان شاخص فرسایش بادی (C_4) با ارزش وزنی ۲۵/۸۸٪ و به دنبال آن پوشش گیاهی (C_3) و شوری خاک (C_6) که به ترتیب دارای وزن‌های ۲۲/۳۸٪ و ۱۰/۱۷٪ قرار دارند. از سوی دیگر، معیارهای طبقه‌بندی اقلیمی (C_1) و درجه حرارت (C_2) دارای کمترین وزن و به ترتیب ۵/۲۴٪ و ۵/۳۶٪ بودند.

نام خبره	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	وزن بدست آمده
رتبه خبره	1	8	7	9	2	11	12	4	10	13	3	5	6	توسط مدل OPA
شاخص ها	رتبه بندی شاخص ها توسط خبره ها													
C1	8	8	6	6	5	9	7	9	6	8	7	6	7	0/052488
C2	7	7	5	6	6	7	6	9	7	7	6	7	9	0/053612
C3	2	5	1	1	2	3	1	2	1	1	2	1	1	0/223842
C4	1	3	2	2	3	1	2	1	3	4	1	2	2	0/258842
C5	5	6	3	3	4	5	3	4	6	5	4	3	6	0/084742
C6	4	4	4	3	3	6	3	3	4	2	4	4	3	0/101775
C7	5	4	5	7	6	4	7	6	5	4	5	7	5	0/068258
C8	4	2	2	2	4	5	5	4	4	4	3	5	4	0/101725
C9	6	5	7	5	7	8	7	6	8	6	8	8	8	0/054717

شکل ۵: نتایج وزن دهی توسط مدل OPA برای هر کدام از معیارها: C^۱: طبقه بندی اقلیمی، C^۲: درجه حرارت، C^۳: پوشش گیاهی، C^۴: فرسایش بادی، C^۵: رده بندی خاک، C^۶: شوری خاک، C^۷: فرسایش آبی، C^۸: کاربری اراضی، C^۹: جرم مخصوص ظاهری خاک.

به منظور استخراج الگوی مکانی مناطق مستعد بیابان‌زایی، از تحلیل همپوشانی وزنی استفاده شد. نتایج این تحلیل، پس از طبقه‌بندی بر اساس روش شکست طبیعی جنک (Natural Breaks Jenks)، در شکل ۶ نشان داده شده است. روش شکست طبیعی جنک یک روش معمول برای طبقه‌بندی پدیده‌های طبیعی است که بر اساس ماهیت داده‌ها طبقه‌بندی می‌شوند (Becerril-Piña et al., ۲۰۱۶).

نتایج حاصل از نقشه مناطق مستعد بیابان‌زایی برای منطقه سوچرزون سیستان و بلوک افغان نشان می‌دهد که بیشترین سطح منطقه با ۳۸٪ در کلاس بیابان‌زایی کم عمدتاً در شمال منطقه واقع در استان خراسان جنوبی و جنوب غربی منطقه در استان سیستان و بلوچستان است؛ ۳۳٪ در کلاس بیابان‌زایی متوسط که در قسمت‌های مرکزی و جنوبی منطقه که شهرستان‌های زاهدان، تفتان، قسمت‌های غربی خاش و سیب سوران در استان سیستان و بلوچستان را شامل می‌شود؛ و بیابان‌زایی شدید و بسیار شدید ۲۹٪ منطقه عمدتاً در شرق و جنوب شرقی منطقه که واقع در جنوب شرقی نهبندان در خراسان جنوبی، هامون و نیمروز و قسمت‌های شرقی گلشن، خاش، میرجاوه و سراوان در استان سیستان و بلوچستان طبقه بندی می‌شود.



شکل ۶: مناطق مستعد بیابان‌زایی

۴- بحث و نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، با استفاده از مدل تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (OPA) با بهره‌گیری 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 بدست آمد. برای بدست آوردن شاخص‌های فرسایش بادی و آبی به ترتیب از مدل‌های RUSLE و RWEQ استفاده شد. بطور کلی از منظر فرسایش این منطقه به شدت تحت تاثیر فرسایش بادی قرار دارد، بطوریکه فرسایش بادی در این منطقه بخصوص شرق آن به

دلیل نداشتن پوشش گیاهی مناسب، خشکی محیط، شیب کم و عدم وجود رطوبت خاک پتانسیل بسیار بالایی دارد، که یکی از مناطق مستعد برای تولید گردوغبار در خاورمیانه را تشکیل می‌دهد. خشک شدن سومین دریاچه بزرگ ایران (دریاچه هامون) که خود از سه دریاچه کوچک با نام‌های هامون پوزک، هامون صابری و هامون هلمند (هیرمند) تشکیل شده است، باعث شده که این سه دریاچه کوچک به یکی از فعال‌ترین منابع گرد و غبار تبدیل شوند، و شدیدترین منطقه با پتانسیل بالای فرسایش بادی در کمربند شرقی ایران باشد. به دلیل تغییر کاربری و خشک شدن دریاچه‌های هامون، فراوانی و شدت طوفان‌های گرد و غبار به طور قابل توجهی افزایش یافته است. تجزیه و تحلیل شاخص کیفیت هوا در شهر زابل نشان می‌دهد که ۶۱٪ از روزها با خطر بالای سلامتی همراه هستند، در حالی که ۳۰/۱٪ روزها حتی به عنوان روزهای خطرناک شناخته می‌شوند (Rashki et al., ۲۰۱۲). میانگین پتانسیل فرسایش بادی توسط مدل RWEQ در این مطالعه ۴۳ کیلوگرم بر مترمربع برآورد شده است که با مطالعه عباسی 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 قسمت‌های جنوب شرقی استان خراسان جنوبی میزان بالاتری دارد، که با نتایج تحقیق چکی‌فورک و همکاران ۲۰۲۳ که کانون‌های برداشت گردوغبار در استان خراسان جنوبی شناسایی کرده‌اند مطابقت دارد. در صورتی که از منظر فرسایش آبی با توجه به اینکه ارتفاعات این منطقه در قسمت‌های شمالی، مرکزی و جنوبی منطقه مورد مطالعه وجود دارد، میزان پتانسیل فرسایش آبی در این مناطق بیش از ۲۰ تن در هکتار و در برخی مناطق پرشیب به ۶۰ تن در هکتار نیز می‌رسد، که با یافته‌های (Ansari, ۲۰۱۱; Organization, ۲۰۰۹; Shahrooz, ۲۰۱۵) همخوانی دارد. در نهایت وزن‌های حاصل از مدل OPA نشان داد که فرسایش بادی و پوشش گیاهی مؤثرترین محرک برای بیابان‌زایی بود، در حالی که عوامل اقلیمی شامل طبقه بندی اقلیمی و درجه حرارت کمترین اثر را از منظر متخصصان داشت. نقشه نهایی مناطق مستعد بیابان‌زایی نشان داد که ۲۴۳۵۶ کیلومتر مربع از منطقه مورد مطالعه به عنوان حساس به بیابان‌زایی طبقه بندی شده است. مناطق بحرانی ۳۰/۱۳٪ از کل منطقه را شامل می‌شود، که عمدتاً در شرق و جنوب شرقی منطقه در شهرستان‌های زابل، زاهدان، خاش و سروان قرار دارند؛ که با توجه به نتایج پژوهش نگارش و همکاران ۲۰۱۶ که به ارزیابی بیابان‌زایی در جنوب شرق ایران پرداختند، می‌توان به نتایج بدست آمده در این پژوهش اطمینان نمود. وضعیت کنونی شرایط محیطی ناشی از اقلیم خشک، از بین رفتن پوشش گیاهی و همچنین مدیریت نادرست، بویژه همراه با فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در تسریع فرآیند بیابان‌زایی در این منطقه دارد. مطالعاتی که توسط (Fathi-Taperasht et al., ۲۰۲۲; Ghasemifar et al., ۲۰۲۳; Shafizadeh-Moghadam et al., ۲۰۱۹) انجام شده نشان می‌دهد که تخریب پوشش گیاهی، از بین رفتن منابع آبی و تبدیل این مناطق به زمین‌های بایر، بخصوص در نیمه شرقی ایران که در سال‌های اخیر با پدیده خشکسالی گسترده‌ای مواجه شده‌اند بیشترین تأثیر را بر روی بیابان‌زایی داشته است. این مناطق شکننده و بحرانی به نوعی در سرتاسر نیمه شرقی ایران وجود دارند و با مناطقی که پتانسیل فرسایش بادی در آن‌ها بالاست منطبق هستند. این مناطق نیاز به ابتکارات مدیریتی از قبیل مدیریت منابع آب، توسعه کشاورزی پایدار، حفاظت از تنوع زیستی، جنگلکاری و غیره دارند که بتواند به طور مؤثر به بازسازی و مبارزه با بیابان‌زایی بپردازند. لازم به ذکر است که هر منطقه شرایط

زیستی خاصی دارد و بهتر است ابتکارات مدیریتی محلی را با مشارکت جوامع محلی و متخصصان مبتنی بر علم و تکنولوژی‌های مدرن که قابل پیاده‌سازی و پایدار باشند، طراحی و اجرا شود، تا به طور مؤثر به بازسازی منطقه و مبارزه با بیابان‌زایی کمک کنند. مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به محققان کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن معیارهای متعدد و مدیریت عدم قطعیت‌ها، تصمیمات جامع، شفاف و اولویت بندی شده‌ای اتخاذ کنند (Minaei et al., ۲۰۲۱). بر همین اساس مدل مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (MCDM-OPA) یک ابزار ارزشمند برای شناسایی و ارزیابی مناطق آسیب‌پذیر به بیابان‌زایی است، و می‌تواند برای توسعه برنامه‌های مدیریتی برای کاهش اثرات تخریب زمین استفاده شود. روش مدل تحلیل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر رویکرد اولویت‌ترتیبی (OPA) با توجه به در نظر گرفتن شاخص‌های مناسب به علت سادگی، کم هزینه بودن و منعطف بودن، روش نسبتاً دقیقی است. استفاده از این روش می‌تواند مدیران و برنامه‌ریزان را در شناسایی و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت و احیاء مناطق بیابانی متناسب با شرایط هر منطقه کمک نمایند. با این حال، در مطالعات آینده استفاده از سایر شاخص‌ها مانند مدیریت چرا، جمعیت، سطح آب‌های زیرزمینی و غیره به طور کلی امکان ارزیابی بهتر وضعیت بیابان‌زایی را فراهم می‌کند.

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), 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), 38-59. <https://sanad.iau.ir/en/Article/983390>.
- Akbari, M., Memarian, H., Neamatollahi, E., Jafari Shalamzari, M., Alizadeh Noughani, M., & Zakeri, D. (۲۰۲۱). Prioritizing policies and strategies for desertification risk management using MCDM-DPSIR approach in northeastern Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 23, ۲۵۰۳-۲۵۲۳. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00684-3>.
- Albalawi, E. K., & Kumar, L. (۲۰۱۳). Using remote sensing technology to detect, model and map desertification: A review. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, ۱۱(۲), ۷۹۱-۷۹۷.
- Ansari, M., Mahmoodi, H., & Jafari, A. (2011). Assessment of water erosion in Bampour watershed. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 19(2), 279-293.
- Ataei, Y., Mahmoudi, A., Feylizadeh, M. R., & Li, D.-F. (۲۰۲۰). Ordinal Priority Approach (OPA) in Multiple Attribute Decision-Making. *Applied Soft Computing*, 86, ۱۰۵۸۹۳. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105893>.
- Bakhshandehmehr, L., Soltani, S., & Sepehr, A. (۲۰۱۳). Assessment of present status of desertification and modifying the MEDALUS model in Segzi plain of Isfahan. *Journal of Range and Watershed Management*, 66(۱), ۲۷-۴۱.
- Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C. A., & González-Sosa, E. (۲۰۱۶). Integration of remote sensing techniques for monitoring desertification in Mexico. *Human and Ecological Risk*

- Assessment: An International Journal*, 22(6), 1323–1340.
<https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1169914>.
- Blanco, H., & Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management* (Vol. 167169). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-420-8709-7>.
- 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), 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*, 131–140. DOI:10.1007/978-90-481-8607-0.11.
- 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-2018-002.
- Chepil, W., & Woodruff, N. P. (1969). *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), 71–84. doi: 10.22111/gaij.2023.4203.3.34.
- 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), 63–70. doi: 10.29252/aridbiom.2023.18283.1887.
- D. Moore, I., & J. Burch, G. (1986). Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Transactions of the ASAE*, 29(6), 1624–1630.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1331/2013.3.363>.
- Djili, K., & Doud, Y. (1999). Relationship between pH and calcium carbonate content of soils. The case of Northern Algeria soils. *Agrochimica (Italy)*. DOI:10.1177/trxb2016014.243.
- 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), 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), 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, 109146.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109146>.

- Fryrear, D., Sutherland, P., Davis, G., Hardee, G. & Dollar, M. (۱۹۹۹). Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm, ۱۰th International Soil Conservation Organization Meeting, Purdue University.
- Ghasemifar, E., Minaei, M., Shen, M., & Rezaei, M. (۲۰۲۲). Analysing spatio-temporal patterns in wintertime rainfall across Iran's deserts using GPM DPR data. *Arid Land Research and Management*, ۳۷(۱), ۲۰-۵۰. <https://doi.org/10.1080/10324984.2022.2084703>.
- Habashi, K., Karimzadeh, H. R., Pour Manafi, S., & Jafari, R. (۲۰۱۸). Assessment of desertification in east Isfahan using integration MEDALUS model and multi criteria analysis (MCA). *Desert Management*, ۵(۱۰), ۹۹-۱۱۵. [doi: ۱۰.۲۲۴۴/jdmal.۲۰۱۸.۳۰۶۷۱](https://doi.org/10.22۴۴/jdmal.۲۰۱۸.۳۰۶۷۱).
- Han, Y., Zhao, W., Zhou, A., & Pereira, P. (۲۰۲۳). Water and wind erosion response to ecological restoration measures in China's drylands. *Geoderma*, 435, ۱۱6۵۱۴. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116۵۱۴>.
- Kafash, R., Ruhimoghaddam, A., Einali, A., Afshari, & Zolfaghari. (۲۰۱۸). 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*, ۱۴(۲), ۱۵-۲۹.
- Kamali Maskooni, E., Kamali, M. A., & Khanamani, A. (۲۰۲۱). 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(۱۲), ۱۶۳-۱۷۸. [doi: ۱۰.۲۲۰۳۴/jest.2021.3۰۶۱۸.39۱۷](https://doi.org/10.22۰۳۴/jest.2021.3۰۶۱۸.39۱۷).
- Lyu, X., Li, X., Wang, H., Gong, J., Li, S., Dou, H., & Dang, D. (۲۰۲۱). Soil wind erosion evaluation and sustainable management of typical steppe in Inner Mongolia, China. *Journal of Environmental Management*, 277, ۱۱۱۴۸۸. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111۴۸۸>.
- Mahmoudi, A., Deng, X., Javed, S. A., & Yuan, J. (۲۰۲۱). Large-scale multiple criteria decision-making with missing values: project selection through TOPSIS-OPA. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(۱۰), ۹۳۴۱-۹۳۶۲. <https://doi.org/10.10۰۷/s۱۲۶۵۲۰۲۰۰۲۶۴۹-w>.
- Minaei, F., Minaei, M., Kougiyas, I., Shafizadeh-Moghadam, H., & Hosseini, S. A. (۲۰۲۱). Rural electrification in protected areas: A spatial assessment of solar photovoltaic suitability using the fuzzy best worst method. *Renewable Energy*, ۱۷۶, ۳۳۴-۳۴۵. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.0۰.۸۷>.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (۱۹۸۶). Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(۵), ۱۲۹۴-۱۲۹۸. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615990.0000000000000042x>.
- Negaresh, H., Rakhshani, Z., Firoozi, F., & Alinia, H. (۲۰۱۶). Desertification assessment using the analytic hierarchy process and gis in southeast iran. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, ۹۸(۱), ۱-۱۴. <https://doi.org/10.1111/geoa.121۲۰>.
- Negaresh H, Fotoohi S, soraya R. 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* ۲۰۲۰; ۷(۱):۳۳-۴۸. [doi: ۱۰.29۲۵۲/jsaeh.۷.۱.۴](https://doi.org/10.29۲۵۲/jsaeh.۷.۱.۴).
- Parysow, P., Wang, G., Gertner, G., & Anderson, A. B. (۲۰۰۳). Spatial uncertainty analysis for mapping soil erodibility based on joint sequential simulation. *CATENA*, 53(۱), ۶۵-۷۸. [https://doi.org/10.1016/S۰۳۴۱-۸۱۶۲\(۰۲\)۰۰۹۸۸-۴](https://doi.org/10.1016/S۰۳۴۱-۸۱۶۲(۰۲)۰۰۹۸۸-۴).

- Pishyar, S., Khosravi, H., Tavili, A., & Malekian, A. (۲۰۱۶). Ranking effective desertification indices using TOPSIS and analytic hierarchy process (case study: Kashan region). *Journal of Natural Environmental Hazards*, ۵(۸), ۸۳-۹۶. [doi: ۱۰,۲۲۱۱۱/jneh.۲۰۱۶,۲۸۱۸](https://doi.org/10.22111/jneh.2016.2818).
- Rahdari, M. R., Caballero-Calvo, A., Kharazmi, R., & Rodrigo-Comino, J. (۲۰۲۳). Evaluating temporal sand drift potential trends in the Sistan region, Southeast Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, ۳۰(۵۷), ۱۲۰۲۶۶-۱۲۰۲۸۳.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. J. d., Eriksson, P. G., Qiang, M., & Gupta, P. (۲۰۱۲). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, ۵۱-۶۲. [https://doi.org/https://doi.org/1۰,۱۰۱۱۶/j.aeolia.۲۰۱۱,۱۲,۰۰۱](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.12.001).
- Sadeghi Ravesh, M. H. (۲۰۲۲). Applying Fuzzy Logic in Quantitative Analysis of Strategies Adopted for Combating Desertification Using Critical Analysis Approach. *Desert Ecosystem Engineering*, ۱۱(۳۴), ۱۵-۳۲. [doi: ۱۰,۲۲۰۵۲/deej.۲۰۲۱,۱۱,۳۴,۱۱](https://doi.org/10.22052/deej.2021.11.34.11).
- Salvati, L. (۲۰۱۴). Toward a 'Sustainable' land degradation? Vulnerability degree and component balance in a rapidly changing environment. *Environment, Development and Sustainability*, 16, ۲۳۹-۲۵۴. [https://doi.org/1۰,۱۰۰۷/s1۰۶۶۸-۰۱۳-۹۴۶۳-z](https://doi.org/10.1007/s10668-013-9463-z).
- Salvati, L., Zitti, M., & Perini, L. (۲۰۱۶). Fifty years on: long-term patterns of land sensitivity to desertification in Italy. *Land degradation & development*, 27(۷), ۹۷-۱۰۷. [https://doi.org/1۰,۱۰۰۲/ldr.۲۲۲۶](https://doi.org/10.1002/ldr.2226).
- Sepehr, A., Hassanli, A., Ekhtesasi, M., & Jamali, J. (۲۰۰۷). Quantitative assessment of desertification in south of Iran using MEDALUS method. *Environmental monitoring and Assessment*, 134, ۲۴۳-۲۵۴. [https://doi.org/1۰,۱۰۰۷/s1۰۶۶۱-۰۰۷-۹۶۱۳-۶](https://doi.org/10.1007/s10661-007-9613-6).
- Shafizadeh-Moghadam, H., Minaei, M., Feng, Y., & Pontius, R. G. (۲۰۱۹). GlobeLand۳۰ maps show four times larger gross than net land change from ۲۰۰۰ to ۲۰۱۰ in Asia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, ۷۸, ۲۴۰-۲۴۸. [https://doi.org/https://doi.org/1۰,۱۰۱۶/j.jag.۲۰۱۹,۰۱,۰۰۳](https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.003).
- Shahroozi, M., Ahmadi, F., & Hekmatnia, H. (۲۰۱۵). Evaluation of water erosion in the Zahak watershed using the RUSLE model. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, ۲۲(۱), ۴۳-۵۸.
- Shihab, T. H., & Al-hameedawi, A. N. (۲۰۲۰). Desertification Hazard Zonation in Central Iraq Using Multi-criteria Evaluation and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(۳), ۳۹۷-۴۰۹. [https://doi.org/1۰,۱۰۰۷/s1۲۰۲۴-۰۱۹-۰۱۰۷۹-۲](https://doi.org/10.1007/s12024-019-01079-2).
- Silakhori, E., ownegh, M., & soleimani sardo, M. (۲۰۱۹). Assessment of Risk and Hazard desertification using Topsis-GIS method (Case Study: Bashtin, Sabzevar, Razavi province). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, ۱۰(۳۵), ۴۴-۵۹.
- Usda, S. (۱۹۸۵). Hydrology, national engineering handbook, Section ۴. US Department of Agriculture, Washington, DC, USA
- Stone, R. P. H., D. (۲۰۰۰). Fact Sheet, Universal Soil Loss Equation. *Ministry of Agriculture*.
- Woodruff, N. P., & Siddoway, F. (۱۹۶۵). A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Journal*, 29(۵), ۶۰۲-۶۰۸. [https://doi.org/1۰,۲۱۳۶/sssaj196۵,۰۳۶۱۰۹۹۰.۰۲۹.۰۰۰۵.۰۳۰X](https://doi.org/10.2136/sssaj1965.03610990.029.0005.030X).
- Yang, X., Yang, Q., Zhu, H., Wang, L., Wang, C., Pang, G., Du, C., Mubeen, M., Waleed, M., & Hussain, S. (۲۰۲۳). Quantitative Evaluation of Soil Water and Wind Erosion Rates in Pakistan. *Remote Sensing*, 15(۹), ۲۴۰۴. [https://doi.org/1۰,۳۳۹۰/rs1۵۰۹۲۴۰۴](https://doi.org/10.3390/rs15092404).
- Youssef, F., Visser, S., Karssenbergh, D., Bruggeman, A., & Erpul, G. (۲۰۱۲). Calibration of RWEQ in a patchy landscape; a first step towards a regional scale wind erosion model.

Aeolian Research, 3(۴), ۴۶۷-۴۷۶.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.03.009>.

ZOLFAGHARI, F., SHAHRIARI, A., FAKHIREH, A., RASHKI, A.R., NOORI, S., & KHOSRAVI, H.. (۲۰۱۱). ASSESSMENT OF DESERTIFICATION POTENTIAL USING IMDPA MODEL IN SISTAN PLAIN. WATERSHED MANAGEMENT RESEARCHES (PAJOUHESH-VA-SAZANDEGI), ۲۴(۲ (۹۱)), ۹۷-۱۰۷. SID. <https://sid.ir/paper/200655>.

نسخه پیش انتشار