



Original Article

Assessing Desertification Risk Potential Using Fuzzy Taxonomy Adaptive Model in GIS Environment in Yazd-Khazarabad Sub-Basin

Mohammad Hassan Sadeghiravesh^{1*}, Hassan Khosravi²

¹Department of Environment, Tak.C., Islamic Azad University, Takestan, Iran

²Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Absratct

Introduction: Desertification is one of the most serious ecological crises, and its control is considered a national concern. Given the increasing spread of this phenomenon and its extensive, long-term effects on the environment and human activities, appropriate management methods within the framework of desert management can reduce its intensity and spread, and prevent the high costs of incorrect decision-making. Therefore, implementation measures in this field should be based on understanding the current state of desertification and its severity. Thus, the present study aimed to evaluate and map the desertification event using multi-attribute decision-making models and geographic information system techniques, as a case study in the Yazd-Khazarabad sub-basin during 2023 to 2024.

Materials and Methods: In this research, an attempt was made to accomplish this using the fuzzy taxonomy method. Therefore, after identifying the decision-making team, consisting of experts familiar with the study area, effective indices were identified and evaluated using the fuzzy Delphi method. In order to select these indicators, three main axes of relationship with the desertification phenomenon, ease of access, and ease of updating were considered within the framework of two factors as cost and time. Then, to prepare a suitable framework for the zoning map of desertification process vulnerability, work units were separated using the geomorphological method in the ArcGIS software environment. The data were fuzzy using the Chen and Huang methods. The fuzzy analysis process was performed on the data. After estimating the combined trapezoidal fuzzy numbers, defuzzification was performed, and the decision matrix was formed. Then, using the fuzzy decision matrix and the TAXONOMY method, the intensity of desertification was estimated. Finally, to facilitate data analysis and achieve results, a mapping of desertification potential was carried out based on the taxonomic level of the working units using ArcView 3.2a.

Results and Discussion: After determining the balanced fuzzy decision matrix, according to the research literature, taxonomic distance (gi) and taxonomic degree (yi), or in other words, desertification intensity, were obtained by separating the working units. Finally, to facilitate the reading and understanding of the estimated results and to show regional differences in vulnerability to desertification, a final map of potential desertification intensity was produced based on the desertification intensity (yi) values of the working units. The results showed that 35.72% and 17.28% of the study area were located in very high and high desertification classes, respectively. Moderately severe desertification (36.32 percent) has the largest share in the study area. In general, the quantitative value of desertification intensity for the entire area was evaluated at 0.74 in the high (IV) class based on the total factors.

Conclusion: The study demonstrated the efficiency and ease of application of fuzzy logic, in the form of a taxonomy model, for assessing the intensity of desertification. The results of this study provide the possibility of planning to minimize desertification resulting from development projects and can create conditions for balancing development plans and the environment based on the study area's priorities and vulnerability zoning.

Keywords: Decision Making, Hierarchical Structure, Fuzzy Taxonomy Model, Pairwise Comparison.

Citation: Sadeghiravesh, M. H., & Khosravi, H. (2025). Assessing Desertification Risk Potential Using Fuzzy Taxonomy Adaptive Model in GIS Environment in Yazd-Khazarabad Sub-basin. *Sustainable Development of Geographical Environment*, Vol. 7, No. 14, (15-32). <https://doi.org/10.48308/sdge.2025.241075.1271>

Received:12/08/2025

Revised:23/10/2025

Accepted:25/10/2025

* Corresponding Author's Email: mh.sadeghiravesh@iau.ac.ir



مقاله پژوهشی

ارزیابی پتانسیل خطر بیابان‌زایی با استفاده از مدل سازشی تاکسنومی فازی در محیط GIS در زیر حوضه آبخیز یزد - خضرآباد

محمدحسن صادقی روش^{۱*}  حسن خسروی^۲ 

۱. گروه محیط‌زیست، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی، تاکستان، ایران.

۲. گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

مقدمه: پدیده بیابان‌زایی یکی از جدی‌ترین بحران‌های اکولوژیکی است که کنترل آن از دغدغه‌های ملی محسوب می‌شود. با توجه به گسترش روزافزون این پدیده و ظهور اثرات گسترده و بلندمدت آن بر محیط‌زیست و فعالیت‌های انسانی، در چارچوب مدیریت عرصه‌های بیابانی، ارائه روش‌های مدیریتی مناسب، قادر است شدت و گسترش این پدیده را کاهش دهد و مانع پرداخت هزینه‌های گزاف تصمیم‌گیری نادرست شود. لذا اقدامات اجرایی در این زمینه باید متکی به شناخت وضعیت فعلی بیابانی شدن اراضی و شدت آن باشد؛ بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و پهنه‌بندی رخداد بیابان‌زایی در زیر حوضه آبخیز یزد - خضرآباد با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی به صورت موردی در زیرحوضه یزد- خضرآباد طی سال‌های ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۳ به انجام رسید.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش سعی شد این مهم توسط روش تاکسنومی فازی به انجام برسد. از این‌رو پس از تعیین اعضاء تیم تصمیم‌گیری تشکیل شده از متخصصان آشنا به منطقه مطالعاتی، شاخص‌های مؤثر از روش دلفی فازی تعیین و ارزش‌دهی شد. به‌منظور انتخاب این شاخص‌ها سه محور اصلی ارتباط با پدیده بیابان‌زایی، سهولت دسترسی و سهولت به‌روزرآوری در چارچوب دو فاکتور هزینه و زمان مدنظر قرار گرفت. سپس به منظور تهیه چارچوبی مناسب جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ناشی از فرایند بیابان‌زایی اقدام به تفکیک واحدهای کاری از روش ژئومورفولوژی و در محیط نرم‌افزار Arc Gis، شد. در ادامه اقدام به فازی‌سازی داده‌ها از روش چن و هوانگ شد و فرایند تحلیل فازی بر روی داده‌ها صورت گرفت. پس از برآورد اعداد فازی دوزنقه‌ای ترکیبی، اقدام به فازی‌زایی و تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری شد و در ادامه در چارچوب ماتریس تصمیم‌گیری فازی و از روش تاکسنومی، شدت بیابان‌زایی برآورد شد. در نهایت به منظور سهولت و دقت در تجزیه و تحلیل داده‌ها و دستیابی به نتایج، بر مبنای درجه تاکسنومیک واحدهای کاری و با استفاده از نرم‌افزار Arc view 3.2a اقدام به نقشه‌سازی میزان پتانسیل بیابان‌زایی شد.

نتایج و بحث: پس از تعیین ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون، مطابق ادبیات تحقیق فاصله تاکسنومیک (Gi) و درجه تاکسنومیک (Vi) یا به عبارتی شدت بیابان‌زایی به تفکیک واحدهای کاری به دست آمد. در نهایت به منظور سهولت در خواندن و فهمیدن نتایج برآورد شده و نشان دادن تفاوت‌های ناحیه‌ای آسیب‌پذیری نسبت به بیابان‌زایی، نقشه نهایی پتانسیل شدت بیابان‌زایی بر مبنای ارزش‌های شدت بیابان‌زایی (Vi) واحدهای کاری شکل گرفت. مطالعات انجام شده نشان داد که ۳۵/۷۲ درصد از کل منطقه مطالعاتی به صورت خیلی شدید و ۱۷/۲۸ درصد به صورت شدید تحت فرایند بیابان‌زایی می‌باشد و بیابان‌زایی با شدت متوسط (۳۶/۳۲ درصد) بیشترین سهم را در منطقه مطالعاتی به خود اختصاص داده است. به‌طور کلی ارزش کمی شدت بیابان‌زایی برای کل منطقه از مجموع عوامل ۰/۷۴ در کلاس شدید یا VI ارزیابی شد.

نتیجه‌گیری: مطالعه صورت گرفته نشان از کارایی و سهولت کاربرد منطق فازی در قالب مدل تاکسنومی در ارزیابی شدت بیابان‌زایی داشت. همچنین نتایج این پژوهش امکان برنامه‌ریزی را برای به حداقل رساندن بیابان‌زایی در اثر انجام طرح‌های توسعه فراهم می‌سازد و می‌تواند شرایطی را ایجاد کند که با توجه به اولویت‌ها و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری منطقه مطالعاتی، تعادل بین طرح‌های توسعه و محیط امکان‌پذیر گردد.

واژه‌های کلیدی: تصمیم‌گیری، ساختار سلسله مراتبی، مدل تاکسنومی فازی، مقایسه زوجی.

استاد: صادقی روش، م. ح. و خسروی. ح. (۱۴۰۴). ارزیابی پتانسیل خطر بیابان‌زایی با استفاده از مدل سازشی تاکسنومی فازی در محیط GIS در زیر حوضه آبخیز یزد- خضرآباد. توسعه پایدار محیط جغرافیایی، دوره ۷، شماره ۱۴، پاییز ۱۴۰۴. (۱۵-۳۲). <https://doi.org/10.48308/sdge.2020.241070.1271>

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱

* رایانامه نویسنده مسئول: mh.sadeghiravesh@iau.ac.ir

مقدمه

مناطق بیابانی یکی از بیوم‌های زیستی و اکولوژیکی در جهان هستند که به طور مستقیم تحت تأثیر توسعه اقتصادی-اجتماعی قرار دارند (Li, et al, 2006). با وجود فعالیت‌های گسترده‌ای که در چند دهه اخیر در زمینه حفاظت از منابع طبیعی تجدیدشونده و نگهداری از بنیان‌های بوم‌شناختی در سطح جهان صورت گرفته، متأسفانه جهان امروز با مشکلات اساسی در زمینه مسائل محیط زیستی روبرو بوده که یکی از این معضلات مهم پدیده بیابانی شدن اراضی است (Jafari, et al, 2004). پرداختن به مسئله بیابان‌زایی به خاطر ماهیت چند معیاری، توسعه روزافزون، گسترده و بلندمدت بودن و تحت تأثیر قرار دادن توأمان منابع سرزمینی و جمعیت‌های انسانی، به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار ضروریست (Sadeghiravesh, 2022). علیرغم تلاش‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی برای مبارزه با بیابان‌زایی، بیابان‌زایی همچنان به عنوان یکی از مشکلات عمده زیست‌محیطی باقی‌مانده است (Cherlet, et al, 2018) و مانع اولیه دستیابی به توسعه پایدار در جوامع درگیر است (United Nations, 1994). از این رو در کنوانسیون سازمان ملل در رابطه با مقابله با بیابان‌زایی^۳ به نقش مهم اقدامات محلی مناسب و درخور، در مقابله با تهدیدات جهانی و بیابان‌زایی و تخریب اراضی تأکید شده است (Briassoulis, 2019). فنون ارزیابی شدت بیابان‌زایی و تهیه نقشه پهنه‌بندی آن همواره یکی از اساسی‌ترین ابزارهای کنترل و پایش در جهت دستیابی به پایداری در عرصه‌های بیابانی به شمار رفته است (Wang, et al, 2008; Pahlavanravi, et al, 2013)؛ بنابراین امروزه نیاز به دانشی دقیق‌تر در رابطه با اثر فاکتورها و مکانیزم‌های بیابان‌زایی به منظور اجرای طرح‌های پایدار مدیریت مناطق بیابانی بیشتر و بیشتر احساس می‌شود (Kardavani, 2010; Jafari and Bakhshandehmehr, 2016) و توسعه روش‌های منطقی و قابل تکرار برای ارزیابی این پدیده در مقیاس‌های مختلف ضروریست (Aslinezhad, et al, 2014; Lamchin, et al, 2015). در این راستا در زمینه ارزیابی مناطق نسبت به بیابانی شدن تاکنون تحقیقات زیادی در سطح بین‌المللی صورت گرفته است، از جمله، روش تحقیقی مقدماتی برای ارزیابی و نقشه‌برداری بیابان‌زایی در سال ۱۹۸۴ (FAO/UNEP, 1984)، مدل تهیه نقشه اراضی حساس به بیابان‌زایی در منطقه مدیترانه یا مدالوس^۴ توسط کمیسیون اروپا در سال ۱۹۸۷ (Kirkby, et al, 1998)، روش ارزیابی فرسایش و تخریب خاک در سطح جهان یا گلاسود^۵ با همکاری مرکز بین‌المللی اطلاعات و منابع خاک در سال ۱۹۹۱ (Oldeman, et al, 1991)، روش ارزیابی تخریب خاک ناشی از عملکرد انسانی در جنوب و جنب شرقی آسیا یا مدل آسود^۶ توسط برنامه محیط‌زیست سازمان ملل در سال ۱۹۹۴ (Van Lynden and Oldeman, 1997)، مدل حساسیت زیست‌محیطی نواحی^۷ یا مدل ESAs توسط کمیسیون اروپا در سال ۱۹۹۹ (European commission, 1999)، ارزیابی تخریب زمین در اراضی خشک^۸ یا مدل LADA توسط سازمان ملل در سال ۲۰۰۲ (Koohafkan, et al, 2003; Nachtergaele and Licona-Manzur, 2009)، پروژه ارزیابی بیابان‌زایی Desert links توسط کمیسیون اروپا در طی سال‌های ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۵ و پروژه مطالعه بیابان‌زایی DE Survey توسط کمیسیون اروپا در طی سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰ (Bakhshandehmehr, 2008). در سطح ملی نیز می‌توان به مدل طبقه‌بندی نوع و شدت بیابان‌زایی در ایران^۹ (Ekhtesasi and Mohajeri, 1995)، مدل بسط یافته طبقه‌بندی نوع و شدت بیابان‌زایی در ایران^{۱۰} (Zehtabian et al, 2002; Abrisham, 2004; Ahmadi et al, 2006)، مدل گروه احیاء مناطق خشک دانشکده منابع طبیعی^{۱۱} (Zehtabian, et al, 2002; Ahmadi, et al, 2006)، مدل تاکسونومی عددی توسعه‌یافته^{۱۲} (Sadeghiravesh, et al, 2009; Sadeghiravesh and Khosravi, 2012; Sadeghiravesh, et al, 2014) اشاره کرد.

با بررسی که بر روی این روش‌ها صورت گرفت، ملاحظه شد که این روش‌ها نیز به‌نوبه خود دارای نواقصی بودند. از جمله، غیربومی و کیفی بودن شاخص‌ها، خطای کارشناسی، کوچک‌مقیاس بودن، عدم امکان تفکیک عوامل انسانی و طبیعی در نتیجه‌گیری‌ها و غیره، هرچند این نواقص در مدل‌های بعدی و به ویژه مدل تاکسونومی تا حدود زیادی مرتفع شد ولی همچنان این مدل‌ها دارای نقص اساسی بودند و آن این بود که در ارزش‌گذاری شاخص‌ها، تنها ارزش مطلق هر شاخص در هر واحد کاری در نظر گرفته می‌شد و اولویت آن‌ها نسبت به هم در ایجاد شرایط بحرانی در نظر گرفته نمی‌شد که

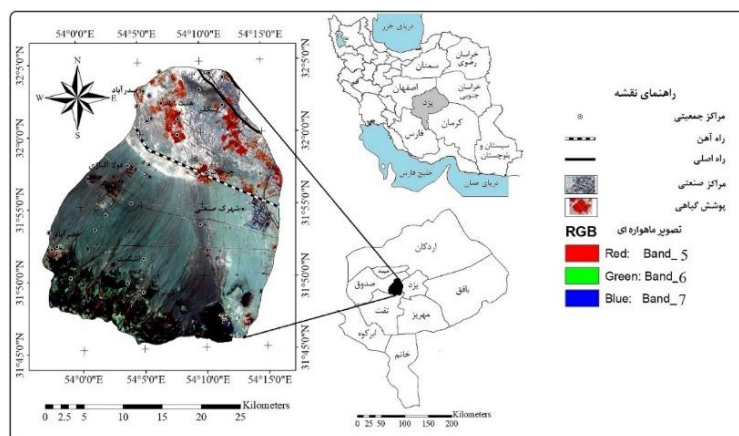
این امر منجر به دستیابی به نتایج غیرواقعی می‌شد. از این رو صادقی روش در سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۴۰۳ هشت مدل آسیب‌پذیری زیست‌محیطی (EVI) (Sadeghiravesh et al, 2012)، مدل آنتروپی شانون^{۱۳} (Sadeghiravesh, 2014)، مدل تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Sadeghiravesh, 2016)، مطلوبیت چند شاخصه (Sadeghiravesh, 2020)، مدل‌های وی پی‌ام و واسپاس (Sadeghiravesh, 2024-a) و مدل‌های مورا و آراس (Sadeghiravesh, 2024-b) را ارائه داد. این مدل‌ها همانند مدل تاکسونومی دارای ساختار سلسله‌مراتبی بودند و علاوه بر این که پتانسیل بیابان‌زایی یا آسیب‌پذیری منطقه را بر مبنای اولویت شاخص‌ها نسبت به هم و اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری برآورد می‌کردند. در عین حال روش‌های مذکور، واجد محدودیت نادیده انگاشتن قضاوت‌های فازی تصمیم‌گیران بودند. از آنجاکه پدیده‌های واقعی همواره فازی، نادقیق و مبهم هستند و زمانی که نیاز به پیروی از رفتار انسانی (فرایند انتخاب و تصمیم‌گیری)^{۱۴} وجود دارد منطق فازی به صورت واقعی‌تر و نزدیک‌تر به رفتار انسانی می‌باشد (Azar and Faraji, 2016; Meixner, 2009; Wang, et al, 2015)، لذا به منظور دستیابی به هدف پهنه‌بندی، کوه‌نباتی (Koohbanani, et al, 2017)، بیدگلی و همکاران (Bidgoli, et al, ۲۰۱۹)، سیلاخوری و همکاران (Silakhori, et al, 2019) و صادقی روش و همکاران (Sadeghiravesh, et al, 2021)، Sadeghiravesh and Khosravi, 2022) بین سال‌های ۹۶ تا ۱۴۰۱ و وانگ و همکاران (Wang, et al, 2015)، در سال ۲۰۱۵ به روش فازی اقدام به ارزیابی خطر بیابان‌زایی کردند.

بنابراین با توجه به محدودیت مطالعات به انجام رسیده در رابطه با کاربرد مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی در تحلیل پتانسیل شدت بیابان‌زایی، لزوم پرداختن به روش‌هایی که بتواند پهنه‌بندی شدت را بر مبنای منطق و اصول قوی و مبنای نظری مستدل در چارچوب منطق فازی^{۱۵} ارائه دهد، در حوزه مدیریت مناطق بیابانی ضروری به نظر می‌رسد. از این رو به دنبال این سؤال که آیا می‌توان با در نظر گرفتن فرایند تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره^{۱۶} (MCDA) در قالب منطق فازی، مدل بهینه‌ای را به منظور پهنه‌بندی پتانسیل شدت بیابان‌زایی ارائه داد؟ در پاسخ به این سؤال، هدف اصلی پژوهش حاضر که پهنه‌بندی توزیع فضایی خطر بیابان‌زایی به صورت جامع، بومی، کمی و انعطاف‌پذیر و با ساختار سلسله‌مراتبی با استفاده از تکنیک تاکسونومی فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در زیرحوضه آبخیز یزد- خضراباد در استان یزد می‌باشد، شکل گرفت.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

زیرحوضه یزد- خضراباد بخشی از حوضه آبخیز بزرگ یزد- اردکان می‌باشد که با وسعتی معادل ۷۸۱۸۰ هکتار در ۱۰ کیلومتری غرب شهر یزد در موقعیت جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).

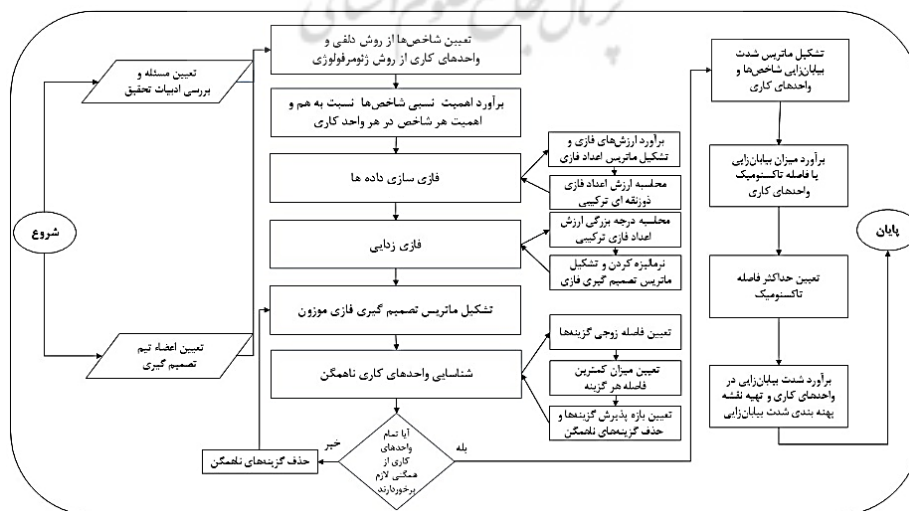


شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)

قسمت اعظم منطقه را اراضی پست متشکل از سازند قدیمی کهر تا رسوبات جوان کواترنر با شیب متوسط ۹/۴۱ درصد تشکیل می‌دهد (Sharifi and Farahbakhsh, 2016). منابع خاک منطقه عمدتاً در رده خاک‌های نارس بیابانی یا آنتی-سول^{۱۷} و زیر رده اورنتز^{۱۸} می‌باشد که دارای رژیم حرارتی ترمیک و رژیم رطوبتی آریدیک و به شدت تحت تأثیر فرایند فرسایش آبی و بادی و تخریب قرار دارد (Gharachelo et al, 2021). از نظر اقلیمی با میانگین دمای متوسط ماهانه ۱۵/۷۲ درجه سانتی‌گراد (میانگین حداکثرهای دمای ماهانه ۲۸/۶۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل‌های ۳/۷۵ درجه سانتی‌گراد) و میانگین بارندگی سالانه ۱۲۱ میلی‌متر، بر مبنای روش دوماتن اصلاح شده اقلیم منطقه در شرایط خشک و فراسرد بیابانی طبقه‌بندی می‌شود. حدود ۱۲۹۳۰ هکتار از اراضی منطقه را پهنه‌های ماسه‌ای شکل داده که ارگ^{۱۹} بزرگ اشکذر با وسعتی معادل ۸۹۲۳ هکتار در شمال منطقه با انواع رخساره‌های تخریبی و فرسایشی به چشم می‌خورد که نشان دهنده وضعیت کاملاً خاص از نظرگاه بیابان‌زایی در منطقه و بیان کننده لزوم ارزیابی شدت بیابان‌زایی در این حوزه است (Sadeghiravesh, 2023).

روش پژوهش

در زمینه سنجش و پهنه‌بندی بیابان‌زایی روش‌ها و تکنیک‌های کمی مختلفی وجود دارد که از این روش‌ها به منظور تسهیل فرایند برنامه‌ریزی و کمک به تصمیم‌گیری در عرصه مدیریت مناطق بیابانی استفاده می‌شود. با توجه به تعدد، پیچیدگی و برهم‌کنش میان شاخص‌های مؤثر در پهنه‌بندی بیابان‌زایی در این پژوهش از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه تاکسنومی استفاده شد. این روش نوعی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره^{۲۰} جبرانی^{۲۱} سازشی^{۲۲} است، اساس کار تکنیک‌های سازشی، محاسبه نزدیکی گزینه‌ها به بهترین و گاهی هم‌زمان با بدترین حالت ممکن است، در این روش شاخص‌های به کار رفته برای مقایسه، می‌توانند دارای واحدهای سنجش متفاوتی بوده و طبیعت منفی و مثبت داشته باشند (Asgharizadeh and Mohammadi Balani, 2021) و با تکیه بر نظر خبرگان، می‌تواند تصویر مناسبی از خطر بیابان‌زایی منطقه مورد مطالعه ارائه دهد (Silakhori, et al, 2019)؛ به عبارت دیگر این روش توأمان هم یک مدل وزن‌گذاری معیارها و هم یک مدل سازشی و تعاملی است، این روش در عین داشتن الگوریتمی ساده، توانایی دخالت دادن معیارهای کمی و کیفی را به تعداد زیاد و به طور هم‌زمان در فرایند تصمیم‌گیری دارد. همچنین قادر است در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف اطلاعات ورودی را تغییر داده و ارزیابی‌های جدیدی بر اساس این تغییر ارائه کند. از این رو مطالعات تطبیقی به سهولت به انجام می‌رسد (Asgharpour, M. J. ۲۰۱۷). همچنین از آنجاکه در ماهیت اکوسیستم‌های طبیعی، مرزهای مشخص و قراردادی وجود ندارد؛ از این رو همواره در مدل‌سازی پدیده‌هایی از قبیل بیابان‌زایی با سطحی از عدم قطعیت روبرو هستیم (Sarkar, et al, 2016). از این رو در پژوهش حاضر جهت برآورد و تلفیق شاخص‌ها از منطق فازی استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۲. نمودار جریان روش تاکسنومی فازی به منظور ارزیابی پتانسیل شدت بیابان‌زایی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)

تعیین شاخص‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق نسبت به بیابان‌زایی

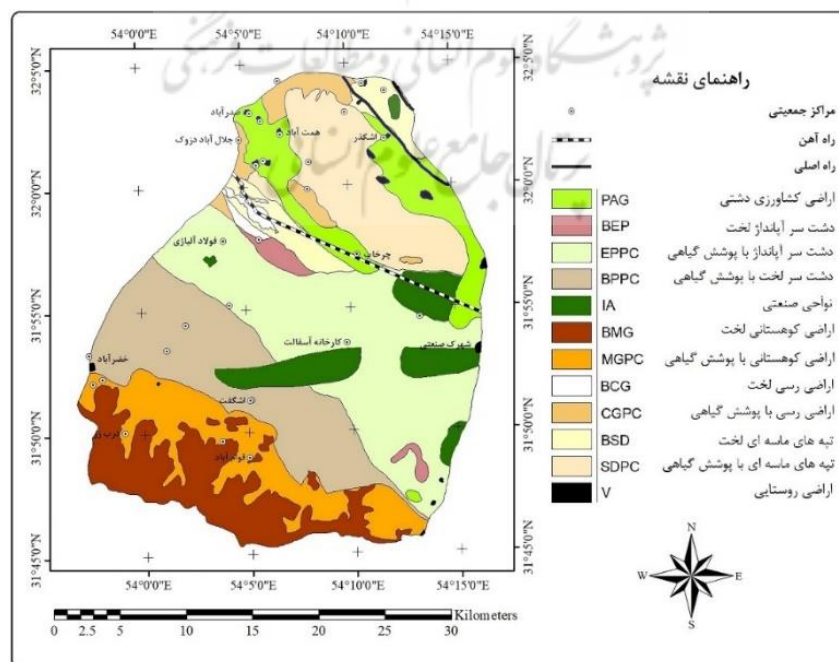
بر پایه اطلاعات به دست آمده از ارزیابی منابع طبیعی و مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای، نهایتاً به روش دلفی^{۲۳} (۱۹۵۰) و نظرخواهی گروهی (Azar and Faraji, 2016)، ۳۰ شاخص مؤثر در بیابان‌زایی تعیین شد. به منظور انتخاب این شاخص‌ها سه محور اصلی ارتباط با پدیده بیابان‌زایی، سهولت دسترسی و سهولت به‌روزرسانی در چارچوب دو فاکتور هزینه و زمان مدنظر قرار گرفت (Sadeghiravesh et al, 2021; Sadeghiravesh, 2020).

جدول ۱. شاخص‌های مؤثر در رخداد بیابان‌زایی در منطقه مطالعاتی

شماره	شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی	شماره	شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی
۱	میانگین بارش سالانه (mm)	۱۶	شخم و آیش
۲	میانگین سرعت باد (m/s)	۱۷	روش آبیاری
۳	شاخص خشکی (P/ETp)	۱۸	کارایی آبیاری (/.)
۴	بافت خاک	۱۹	سیستم آبیاری
۵	شوری خاک (EC-mmhos/cm)	۲۰	کاهش سطح آب زیرزمینی
۶	زهکشی خاک (in/h)	۲۱	رطوبت خاک
۷	عمق خاک (cm)	۲۲	استفاده از ماشین‌آلات، مواد شیمیایی و کود آلی
۸	شیب (/.)	۲۳	الگوی کشت و مدیریت تولید
۹	فرسایش (آب و باد)	۲۴	مشارکت مردمی
۱۰	شوری آب (EC-μmhos/cm)	۲۵	سواد (/.)
۱۱	عمق سطح آب زیرزمینی (cm)	۲۶	اشتغال (/.)
۱۲	تراکم پوشش گیاهی (/.)	۲۷	تراکم بیولوژیک جمعیت (N/km ²)
۱۳	بوته کنی و قطع اشجار (/.)	۲۸	تغییر کاربری اراضی
۱۴	ظرفیت برد مراتع (AU/100 day)	۲۹	آگاهی از نتایج تخریب
۱۵	فشار دام (ظرفیت مراتع/دام موجود)	۳۰	تقسیم اراضی به قطعات کوچک

تعیین واحدهای کاری

به منظور ایجاد قابلیت پهنه‌بندی به مدل‌ها تصمیم‌گیری لازم است قبل از هر چیز، چارچوب مناسبی به منظور تعیین واحدهای کاری یا واحدهایی که در قالب آن‌ها برنامه‌ریزی مدیریت سرزمین به انجام می‌رسد، تعیین شود؛ بنابراین در این پژوهش اقدام به تفکیک واحدهای کاری از روش ژئومورفولوژی شد (Ahmadi, 2011) (شکل ۳).



شکل ۳. واحدهای کاری منطقه خضرآباد (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲)

به این منظور ابتدا تیپ‌ها و رخساره‌های ژئومورفولوژی مورد بررسی قرار گرفت و سپس بعد از تعیین رخساره‌ها و تهیه نقشه آن‌ها، اقدام به هم‌پوشانی دودویی لایه‌های شیب، جهت و ارتفاع با نقشه رخساره‌ها و خلاصه‌سازی لایه‌های اطلاعاتی ثانویه شد. در مرحله بعد با در نظر گرفتن نقشه پوشش گیاهی، کاربری اراضی و نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS، واحدهای کاری بر مبنای لایه‌های اطلاعاتی مذکور شکل گرفت. در نقشه واحدهای کاری، دوازده واحد کاری برحسب اهداف مطالعاتی تفکیک شد.

تعیین اهمیت شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی نسبت به هم و در هر واحد کاری

در ادامه اهمیت شاخص‌ها نسبت به هم (W_j) و اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری (r_{ij}) با استفاده از تکنیک دلفی فازی^{۲۴} (Azar and Faraji, 2016) و با توجه به جدول امتیازدهی چن و وانگ در مقیاس ۰ الی ۷ (خیلی کم تا خیلی زیاد)، مورد ارزیابی کارشناسان گرفت (جداول ۲ و ۳) (Malchefska, 2016) و سپس با محاسبه میانگین هندسی (با فرض یکسان بودن رأی تمام افراد) (رابطه ۱) به ترکیب ماتریس کارشناسان اقدام و در نهایت ماتریس گروه حاصل شد (جدول ۴) (Azar and Rajabzadeh, 2017).

$$M_{ij}^k = \left(\sum_{k=1}^n \tilde{r}_{ij}^k \text{ or } \tilde{W}_j^k \right)^{\frac{1}{N}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه $\tilde{r}_{ij}^k$ مخلفه فازی مربوط به شخص k ام در برآورد درجه اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری و $\tilde{W}_j^k$ مخلفه فازی مربوط به شخص k ام در برآورد اولویت شاخص‌ها نسبت به هم می‌باشد.

جدول ۲. درجه اهمیت و ارجحیت فازی چن و هوانگ، ۱۹۹۲

مقدار دهنده زبانی	ارزش عددی	تعداد مقدار دهنده زبانی			
		۲	۳	۵	۷
خیلی کم	۱			(۰, ۰, ۰/۰, ۱/۲)	(۰, ۰, ۰, ۰/۱)
کم	۲		(۰, ۰, ۰/۲, ۰/۴)	(۰/۱, ۰/۲۵, ۰/۲۵, ۰/۴)	(۰/۱, ۰/۲, ۰/۲, ۰/۳)
نسبتاً متوسط	۳				(۰/۲, ۰/۳, ۰/۴, ۰/۵)
متوسط	۴	(۰/۴, ۰/۵, ۰/۵, ۰/۸)	(۰/۲, ۰/۵, ۰/۵, ۰/۷)	(۰/۳, ۰/۵, ۰/۵, ۰/۷)	(۰/۴, ۰/۵, ۰/۵, ۰/۶)
نسبتاً زیاد	۵				(۰/۵, ۰/۶, ۰/۷, ۰/۸)
زیاد	۶	(۰/۵, ۰/۸, ۰/۸, ۱)	(۰/۶, ۰/۸, ۱, ۱)	(۰/۶, ۰/۷۵, ۰/۷۵, ۰/۹)	(۰/۷, ۰/۸, ۰/۸, ۰/۹)
خیلی زیاد	۷			(۰/۸, ۰/۹, ۱, ۱)	(۰/۸, ۰/۹, ۱, ۱)

جدول ۳. ماتریس ارزشیابی فردی اهمیت شاخص‌های مؤثر نسبت به هم و در هر واحد کاری

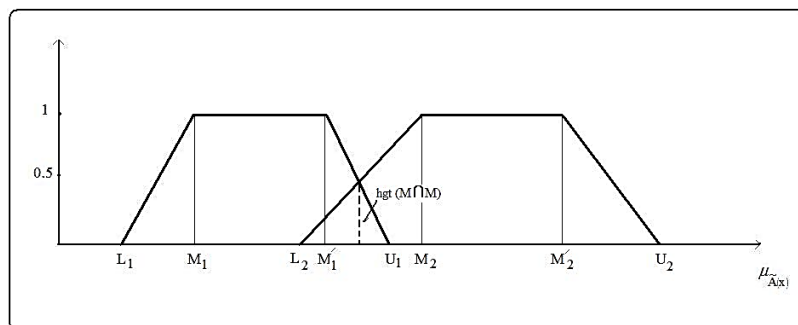
I_j	I_1	I_2	...	I_n
	W_1	W_2	...	W_n
TMU_1				
TMU_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1n}
TMU_2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2n}
...	...	...	...	...
TMU_m	r_{m1}	r_{m2}	...	r_{mn}

فازی‌سازی داده‌ها

تعیین ارزش‌های فازی برای اوزان شاخص‌ها و واحدهای کاری و تشکیل ماتریس اعداد فازی

فرایند فازی‌سازی شامل تغییر و تبدیل داده‌های ورودی به وسیله کنترل‌گر فازی است. در این پژوهش از تابع عضویت دوزنقه‌ای استفاده شد. با توجه به نوع اعداد فازی انتخابی (اعداد فازی دوزنقه‌ای)، از میان روش‌های تصمیم‌گیری چند

شاخصه فازی، روش بونیسون^{۲۵} انتخاب گردید. بونیسون هر عدد فازی دوزنقه‌ای $\tilde{M}$ را با پارامترهای به L , M , M' و U نمایش داد (شکل ۴) (Asgharpour, 2017; Azar and Faraji, 2016).



شکل ۴. نمایش دو عدد فازی دوزنقه‌ای

با توجه به تعدد متغیرهای زبانی از اعداد فازی متناظر با آن‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش از مقیاس هفت رتبه‌ای چن و هوانگ استفاده شد (جدول ۲) (Malchevski, 2016) و در این چارچوب اقدام به تعیین ارزش‌های فازی گروهی ارجحیت شاخص‌ها و اولویت هر شاخص در هر واحد کاری شد (جدول ۴).

جدول ۴. ماتریس گروهی فازی اهمیت شاخص‌های مؤثر نسبت به هم و در هر واحد کاری

I_j	I_1	I_2		I_n
	$\tilde{M}_{1j}^k$	$\tilde{M}_{2j}^k$		$\tilde{M}_{nj}^k$
TMU _i				
TMU ₁	$\tilde{M}_{11}^k$	$\tilde{M}_{12}^k$		$\tilde{M}_{1n}^k$
TMU ₂	$\tilde{M}_{21}^k$	$\tilde{M}_{22}^k$		$\tilde{M}_{2n}^k$
	:	:	:	:
TMU _m	$\tilde{M}_{m1}^k$	$\tilde{M}_{m2}^k$		$\tilde{M}_{mn}^k$

محاسبه ارزش $\tilde{D}_K$ یا اعداد فازی دوزنقه‌ای ترکیبی^{۲۶} برای هر سطر ماتریس فازی از رابطه ۲

$$\tilde{D}_k = \sum_{j=1}^n \tilde{M}_{kj}^k \left[\sum_{i=1}^{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} \tilde{M}_{ij}^k \right]^{-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n_k \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه $\tilde{M}_{ij}^k$ بیانگر مؤلفه فازی مربوط به شخص k ام در برآورد درجه اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری و اولویت شاخص‌ها نسبت به هم می‌باشد و i و j به ترتیب نشان دهنده واحدهای کاری یا شاخص‌ها می‌باشد.

تبدیل داده‌های فازی به غیر فازی و تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون

محاسبه درجه بزرگی ارزش $\tilde{D}_K$ هر سطر ماتریس فازی نسبت به هم از رابطه ۳

$$\begin{cases} v(\tilde{D}_{ij}^k \geq \tilde{D}_j^k) = 1 & m_i \geq m'_j, \quad j = 1, 2, \dots, N_k, \quad j \neq i \\ v(\tilde{D}_{ij}^k \geq \tilde{D}_j^k) = \text{hgt}(D_i \cap D_j) = \frac{U_i - L_j}{(U_i - L_j) + (M'_j - M'_i)} & \text{Otherwise, } j = 1, 2, \dots, N_k, \quad j \neq i \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

در پژوهش حاضر به دلیل حجم زیاد شاخص‌ها و واحدهای کاری، در برآورد درجه بزرگی اعداد فازی دوزنقه‌ای ترکیبی، با تهیه برنامه‌ای منطبق با رابطه ۳ از محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

محاسبه درجه بزرگی هر عدد فازی دوزنقه‌ای ترکیبی از K عدد فازی ترکیبی دیگر از رابطه ۴

$$P_{ih}^k(I_i^k \text{ or } TMU_i^k) = \min v(\tilde{S}_i^k \geq \tilde{S}_j^k), \quad i = 1, 2, \dots, n_k \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه TMU_i^k بیانگر واحد کاری یا شاخص (I_i^k) نام از جدول ماتریس فازی k ام می‌باشد. اعداد حاصل از این فرایند بیانگر اوزان غیر پهنجار شده ارجحیت شاخص‌ها نسبت به هم و اولویت واحدهای کاری نسبت به هر شاخص می‌باشند.

نرمالیزه کردن اوزان ناپهنجار شاخص‌ها و واحدهای کاری از رابطه ۵ و دستیابی به ارجحیت و اولویت شاخص‌ها و واحدهای کاری از نظر گروه از رابطه ۶.

$$P_h^k = \frac{P_{ih}^k (I_i^k \text{ or } TMU_i^k)}{\sum_{i=1}^k P_{ih}^k (I_i^k \text{ or } TMU_i^k)}, \quad i = 1, 2, \dots, n_k \quad \text{رابطه ۵}$$

$$P_h^k = P_{1h}^k, P_{2h}^k, \dots, P_{n_k h}^k \quad \text{رابطه ۶}$$

این رابطه بیانگر ارجحیت هر شاخص نسبت به سایر شاخص‌ها در دستیابی به هدف «ارزیابی خطر بیابان‌زایی» و اولویت هر واحد کاری ماتریس فازی k ام نسبت به هر شاخص است؛ بنابراین ارجحیت شاخص‌ها را می‌توان به صورت رابطه ۷ نمایش داد.

$$w^{k-1} = (w^{k-1}_1, w^{k-1}_2, \dots, w^{k-1}_{n_{k-1}}) \quad \text{رابطه ۷}$$

در این رابطه ارجحیت هر شاخص (I) نسبت به هدف که در سطح بالاتر ($K-1$) قرار گرفته بیان می‌شود و اولویت هر واحد کاری^{۲۶} (TMU) نسبت به هر شاخص (I) که در سطوح بالاتر (K) از واحدهای کاری واقع شده به صورت رابطه ۸ نمایش داده می‌شود.

$$a_{ij}^k = (a_{1i}^k, a_{2i}^k, \dots, a_{n_k i}^k)^T \quad \text{رابطه ۸}$$

تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی^{۲۸} (FDM)

بر مبنای شکل کلی ماتریس تصمیم‌گیری در مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه^{۲۹} و با توجه به روابط ۷ و ۸ ماتریس تصمیم‌گیری فازی شکل گرفت (جدول ۵) (Azar and Faraji, 2016).

جدول ۵. ماتریس تصمیم‌گیری فازی

TMU_i^k	I_1	I_2	...	I_n
	w^{K-1}_1	w^{K-1}_2	...	$w^{K-1}_{n_{K-1}}$
TMU^1	a^k_{11}	a^k_{12}	...	$a^k_{1n_k-1}$
TMU^2	a^k_{21}	a^k_{22}	...	$a^k_{2n_k-1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
TMU^k	a^k_{nk1}	a^k_{nk2}	...	a^k_{nknk-1}

با محاسبه اولویت واحدهای کاری بر مبنای هر شاخص و تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی (جدول ۵)، مشاهده می‌شود که شدت بیابان‌زایی بر مبنای شاخص‌های مختلف، متفاوت خواهد بود؛ لذا به منظور دستیابی به پتانسیل شدت بیابان‌زایی بر مبنای تمامی شاخص‌ها از نظر گروه (y_i) و تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل بیابان‌زایی، عمل تلفیق طی مراحل ذیل بر روی نتایج حاصله از مراحل قبل اعمال شد (Chen, et al, 1992; Asgharpour, 2017; Nadaban, et al, 2016).

تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون^{۳۰}

با استفاده از رابطه ۹ اقدام به موزون‌سازی مؤلفه‌های ماتریس تصمیم‌گیری فازی شد و به این ترتیب شدت بیابان‌زایی در هر واحد کاری به نسبت هر شاخص (D) به دست آمد و ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون حاصل شد (جدول ۶).

$$HFDM_{ij} = a_{ij} \times w_j \quad \text{رابطه ۹}$$

در این رابطه:

$HFD M_{ij}$ = مقدار وزنی موزون یا شدت بیابان‌زایی (D) است که هر واحد کاری با توجه به شاخص مربوطه کسب می‌کند.

a_{ij} = مقدار وزنی که هر واحد کاری با توجه به شاخص مربوطه کسب می‌کند.

w_j = مقدار وزنی (عددی) شاخص مربوطه.

جدول ۶. ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون (شدت بیابان‌زایی)

I_j	I_1	I_2		I_n
TMU_i				
TMU_1	$HFD M_{11}$	$HFD M_{12}$		$HFD M_{1n}$
TMU_2	$HFD M_{21}$	$HFD M_{22}$		$HFD M_{2n}$
	:	:	:	:
TMU_m	$HFD M_{m1}$	$HFD M_{m2}$		$HFD M_{mn}$
O_j	O_1	O_2	---	O_n

در این ماتریس، $HFD M_{ij}$ ، بیانگر شدت بیابان‌زایی (D) شاخص زام را در واحد کاری نام می‌باشد. در این مرحله در انتهای ماتریس، مطلوب‌ترین مقادیر شاخص‌ها در هر ستون تحت عنوان مطلوب‌ترین مقدار O_j (به دست می‌آید (جدول ۶) (Sadeghiravesh and Khosravi, 2022).

تعیین شدت، طبقه‌بندی و تهیه نقشه حساسیت مناطق به بیابانی شدن

تشکیل ماتریس شدت بیابان‌زایی شاخص‌ها و واحدهای کاری

در ادامه با در نظر گرفتن ماتریس اولیه ارزش‌گذاری شدت بیابان‌زایی شاخص‌ها در واحدهای کاری و عدد ایده‌آل (جدول ۶)، مجذور فاصله «شدت بیابان‌زایی هر شاخص، در هر واحد کاری» ($HFD M_{ij}$) را از عدد ایده‌آل همان شاخص (O_j) محاسبه کرده و در ماتریس دوبعدی دیگری تحت عنوان «ماتریس شدت بیابان‌زایی شاخص‌ها و واحدهای کاری» (جدول ۷) وارد می‌کنیم. فاصله کم هر شاخص از عدد ایده‌آل نمایانگر اثر کم آن شاخص (I_n) از نظر بیابان‌زایی در آن واحد کاری (TMU_m) و بالعکس می‌باشد.

برآورد فاصله تاکسونمیک واحدهای کاری

سپس از رابطه ۱۰، مجموع مجذورات انحرافات از عدد ایده‌آل یا فاصله تاکسونمیک (g_i)، در هر واحد کاری مشخص می‌شود (جدول ۷). برحسب فاصله تاکسونمیک می‌توان گزینه‌ها را رتبه‌بندی کرد. هرچقدر این فاصله کمتر باشد، گزینه از رتبه بهتری برخوردار است و بالعکس.

$$g_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (HFD M_{ij} - O_j)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

جدول ۷. ماتریس فاصله و درجه تاکسونومی واحدهای کاری

واحد کاری TMU_i ▼	$(HFD M_{m1} - O_1)^2$	$(HFD M_{m2} - O_2)^2$	...	$(HFD M_{mn} - O_n)^2$	فاصله تاکسونمیک (g_i)	درجه تاکسونمیک (Y_i)
TMU_1	a_1	b_1	...	y_1	g_1	y_1
TMU_2	a_2	b_2	...	y_2	g_2	y_2
:	:	:	...	:	:	:
TMU_m	a_m	b_m	...	y_m	g_m	y_m
◀ O_j	O_1	O_2	...	O_n	μ_g	
					σ_g	

محاسبه حداکثر فاصله تاکسونومیک ممکن

در ادامه به منظور تعیین درجه تاکسونومیک (y_i)، تعیین طبقات، کلاسه‌بندی و تهیه نقشه شدت بیابانزایی، حداکثر فاصله تاکسونومیک ممکن (g^*) از رابطه ۱۱ در کلیه واحدهای کاری محاسبه می‌شود.

$$g^* = \mu_g + 2\sigma_g \quad \text{رابطه ۱۱}$$

برآورد درجه تاکسونومیک (y_i) در واحدهای کاری و تهیه نقشه پهنه‌بندی شدت

درنهایت درجه تاکسونومیک (y_i) که بیانگر شدت بیابانزایی واحدهای کاری در پژوهش حاضر می‌باشند، از رابطه (۱۲) محاسبه شد (جدول ۷).

$$y_i = \frac{g_i}{g^*} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

از آنجاکه بر طبق این روش، مطلوب‌ترین مقدار کمترین مقدار است بنابراین هرچقدر این مفهوم کمتر باشد، نشانگر وضعیت بهتر یا شدت بیابانزایی کمتر، در آن واحد کاری می‌باشد و بالعکس. در نهایت به منظور سهولت و دقت در تجزیه و تحلیل داده‌ها و دستیابی به نتایج، بر مبنای شدت بیابانزایی حاصل شده و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS9.3 اقدام به نقشه‌سازی میزان پتانسیل بیابانزایی شد (Sadeghiravesh, et al, 2009; Asgharizadeh and Mohammadi Balani, ۲۰۲۱).

نتایج و بحث

پس از تعیین شاخص‌های مؤثر (جدول ۱) و تهیه نقشه واحدهای کاری (شکل ۳) با استفاده از تکنیک دلفی و بر مبنای مقیاس ۷ رتبه‌ای چن و هوانگ (جدول ۲)، ماتریس گروهی فازی اهمیت شاخص‌ها نسبت به هم (W_j) و اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری (r_{ij}) شکل داده شد (جدول ۸).

جدول ۸. ماتریس گروهی فازی شده اهمیت شاخص‌ها نسبت به هم و اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری از جهت بیابانزایی

شاخص بیابانزایی (I)	I ₁	I ₂	...	I ₂₉	I ₃₀
	(۰، ۰، ۰، ۰/۱)	(۰/۴، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۶)		(۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸)	(۰/۷، ۰/۸، ۰/۸، ۰/۹)
TMUs					
(BMG)	(۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵)	(۰/۴، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۶)	...	(۰، ۰، ۰، ۰/۱)	(۰، ۰، ۰، ۰/۱)
(MGPC)	(۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸)	(۰/۴، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۶)	...	(۰، ۰، ۰، ۰/۱)	(۰، ۰، ۰، ۰/۱)
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
(IA)	(۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸)	(۰/۴، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۶)	...	(۰/۱، ۰/۲، ۰/۲، ۰/۳)	(۰، ۰، ۰، ۰/۱)
(MAG)	(۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵)	(۰/۴، ۰/۵، ۰/۵، ۰/۶)	...	(۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵)	(۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸)

سپس ارزش $\tilde{D}_K$ یا اعداد فازی دوزنقه‌ای ترکیبی برای هر سطر ماتریس فازی اهمیت شاخص‌ها نسبت به هم و ماتریس-های فازی اهمیت واحد کاری به تفکیک هر شاخص، از رابطه ۲ به دست آمد.

پس از محاسبه $\tilde{D}_K$ ها به منظور تعیین وزن شاخص‌ها و واحدهای کاری به تفکیک هر شاخص و تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، لازم است که مقادیر $\tilde{D}_K$ ها را مرتب کنیم. به این منظور درجه بزرگی هر عدد فازی را بر اعداد فازی دیگر از رابطه ۳ و در محیط نرم‌افزار MATLAB به دست آمد و ماتریس درجه بزرگی شاخص‌ها نسبت به هم و واحدهای کاری به تفکیک هر شاخص شکل داده شد. سپس اوزان نابهنجار واحدهای کاری (P_i) از رابطه ۴ برآورد شد و از رابطه ۵ این اوزان، نرمالیزه یا بهنجار (N_i) شد (جدول ۹).

جدول ۹. ماتریس اوزان بهنجار شده ارجحیت شاخص‌ها و اولویت واحدهای کاری (ماتریس تصمیم‌گیری)

I	۱	۲	...	۲۹	۳۰
	۰/۰۵۳۲۶۶	۰/۰۰۶۶۳	...	-۰/۰۰۲۰۴	-۰/۰۰۲۰۴
TMUs					
(BMG)	۰/۴۰۶۷۷	۰/۰۸۳۳۳۳	...	۰/۱۱۳۱۰۳	۰/۱۰۱۲۴۴
(MGPC)	۰/۰۳۵۶۱۳	۰/۰۸۳۳۳۳	...	۰/۱۱۳۱۰۳	۰/۱۰۱۲۴۴
...	...	...	...	...	...
(IA)	۰/۰۳۵۶۱۳	۰/۰۸۳۳۳۳	...	-۰/۰۰۶۵۳	۰/۱۰۱۲۴۴
(MAG)	۰/۴۰۶۷۷	۰/۰۸۳۳۳۳	...	-۰/۰۰۵۷	-۰/۰۰۶۲۲

در ادامه با برآورد کلیه اوزان بهنجار شده معیارها نسبت به هدف و راهبردها نسبت به هر معیار، در قالب کلی ماتریس تصمیم‌گیری در محیط فازی (جدول ۵)، ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری از نظر گروه، بر مبنای رابطه ۹ از ضرب مقدار وزنی که هر واحد کاری با توجه به شاخص مربوطه کسب می‌کند در ضریب اهمیت شاخص‌ها شکل گرفت (جدول ۱۰).

جدول ۱۰. ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری از نظر گروه

I	۱	۲	...	۲۹	۳۰
TMUs					
(BMG)	۰/۰۲۱۶۶۷	۰/۰۰۰۵۵۳	...	-۰/۰۰۰۲۳	-۰/۰۰۰۲۱
(MGPC)	۰/۰۰۱۸۹۷	۰/۰۰۰۵۵۳	...	-۰/۰۰۰۲۳	-۰/۰۰۰۲۱
...	...	...	...	...	...
(IA)	۰/۰۰۱۸۹۷	۰/۰۰۰۵۵۳	...	۰/۰۰۰۱۳۳	-۰/۰۰۰۲۱
(MAG)	۰/۰۲۱۶۶۷	۰/۰۰۰۵۵۳	...	۰/۰۰۰۱۱۶	۰/۰۰۰۱۲۷
O _j	۰/۰۲۱۶۶۷	۰/۰۰۰۵۹۸	...	۰/۰۰۰۱۳۳	۰/۰۰۰۱۲۷

پس از برآورد ماتریس تصمیم‌گیری فازی موزون، فاصله تاکسونمیک (g_i) در هر واحد کاری از رابطه ۱۰ محاسبه و حداکثر فاصله تاکسونمیک ممکن (g^*) در کلیه واحدهای مورد بررسی از رابطه ۱۱ معادل $۰/۲۳۲۵۰۸$ برآورد شد و در نهایت درجه تاکسونمیک (y_i) یا به عبارتی شدت بیابان‌زایی واحدهای کاری از رابطه ۱۲ به دست آمد (جدول ۱۱).

جدول ۱۱. شدت بیابان‌زایی واحدهای کاری

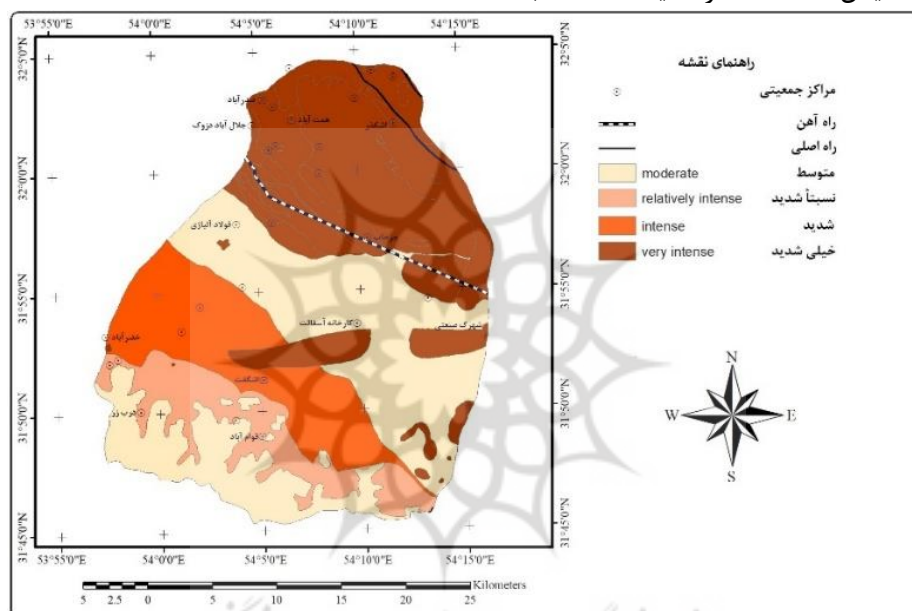
TMUs	g_i	y_i	طبقات شدت	علائم
(BMG)	۰/۱۲۲۹۵۹۸	۰/۵۲۸۸۴۲	متوسط	IV
(MGPC)	۰/۱۴۶۴۵۸۹	۰/۶۲۹۹۱	نسبتاً شدید	V
...	...	...	...	...
(IA)	۰/۱۸۸۶۱۴۴	۰/۸۱۱۲۱۸	خیلی شدید	VII
(MAG)	۰/۱۴۳۶۳۳۶	۰/۶۱۷۷۵۹	نسبتاً شدید	V
μ_g	۰/۱۷۲۰۶۶۹			
σ_g	۰/۰۳۰۲۲۰۴			

در نهایت به منظور رتبه‌بندی واحدهای کاری از دیدگاه پتانسیل بیابان‌زایی و تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل بیابان‌زایی منطقه مطالعاتی، از آنجاکه ارزش‌های پتانسیل شدت برآورد شده، یکسری از ارزش‌های پیوسته هستند که به منظور سهولت در خواندن و فهمیدن نتایج برآورد شده و نشان دادن تفاوت‌های ناحیه‌ای می‌بایستی در سطوح مناسبی طبقه‌بندی شوند. بر مبنای جدول ۱۲، استعداد اراضی جهت بیابان‌زایی از دیدگاه مدل تاکسونومی فازی در منطقه مطالعاتی در هفت سطح، طبقه‌بندی شدند.

جدول ۱۲. طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش اراضی در منطقه خضرآباد بر مبنای تاکسونومی فازی

سطح ارزیابی	شاخص شدت تاکسونومی	کلاس	مساحت (ha)	درصد (%)
آرام (ناچیز)	$V_i \leq 25$	I	-	-
کم	$25 < V_i \leq 35$	II	-	-
نسبتاً متوسط	$35 < V_i \leq 45$	III	-	-
متوسط	$45 < V_i \leq 55$	IV	۲۸۵۰۵/۲۱۷	۳۶/۳۲
نسبتاً شدید	$55 < V_i \leq 65$	V	۸۳۸۴/۲۰۳	۱۰/۶۸
شدید	$65 < V_i \leq 75$	VI	۱۳۵۶۵/۱۰۶	۱۷/۲۸
خیلی شدید	$75 < V_i$	VII	۲۸۰۳۳/۶۰۳	۳۵/۷۲

مطابق جدول ۱۲، هر واحد کاری با توجه به پتانسیل فرسایشی برآورد شده در یکی از طبقات هفتگانه آرام (ناچیز)، کم، نسبتاً متوسط، متوسط، نسبتاً شدید، شدید و خیلی شدید قرار گرفت که در نهایت با اجرای دستور Dissolve، از تلفیق واحدهای دارای طبقات یکسان، نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل استعداد بیابان‌زایی اراضی بر مبنای مدل تاکسونومی فازی (شکل ۵)، به مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ در محیط Arc Gis به دست آمد.



شکل ۵. پتانسیل شدت بیابان‌زایی بر اساس مدل تاکسونومی فازی

با توجه به جدول طبقه‌بندی و نقشه استعداد اراضی حاصل از مدل تاکسونومی فازی (جدول ۱۱ و شکل ۵)، ملاحظه می‌شود که اراضی کشاورزی دشتی^{۳۲} (PAG)، تپه‌های ماسه‌ای لخت^{۳۳} (BSD)، اراضی رسی با پوشش گیاهی^{۳۴} (CGPC)، اراضی رسی لخت^{۳۵} (BCG)، اراضی تپه‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی^{۳۶} (SDPC)، واحد دشت سرآپانداژ لخت^{۳۷} (BEP) و اراضی صنعتی^{۳۸} (IA) با بیشترین ارزش کمی به ترتیب در کلاس خیلی شدید یا VII قرار گرفته‌اند که واجد بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی می‌باشند و ۲۸۰۳۳/۶ هکتار (۳۵/۷۲ درصد) از کل منطقه مطالعاتی را در بر گرفته‌اند. نتایج حاصله نشان داد که منطقه مطالعاتی عاری از بیابان‌زایی آرام (I) تا نسبتاً متوسط (III) می‌باشد. درعین حال ۲۸۵۰۵/۲ هکتار (۳۶/۳۲ درصد) از اراضی منطقه در کلاس IV یا متوسط، ۸۳۸۴/۲ هکتار (۱۰/۶۸ درصد) در کلاس V یا نسبتاً شدید و ۱۳۵۶۵/۱ هکتار (۱۷/۲۸ درصد) در کلاس VII یا شدید، طبقه‌بندی می‌شوند.

به‌طور کلی بر اساس لایه نهایی حاصل شده از مدل تاکسونومی فازی ۶۳/۶۸ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی در معرض خطر نسبتاً تا خیلی شدید بیابان‌زایی قرار دارد. بیشترین اراضی منطقه معادل ۳۶/۳۲ درصد تحت تأثیر بیابان‌زایی متوسط قرار دارد که شامل اراضی لخت کوهستانی^{۳۹} (BMG) و اراضی دشت سرآپانداژ با پوشش گیاهی^{۴۰} (EPPC)، می‌شوند و درعین حال، ارزش کمی پتانسیل بیابان‌زایی برای کل منطقه از مجموع شاخص‌ها معادل ۰/۷۴، در کلاس شدید یا VI ارزیابی شد.

از شاخص‌های انسانی مهم مؤثر در آسیب‌پذیر کردن واحدها در فرایند بیابان‌زایی می‌توان به شخم و آیش نامناسب اراضی زراعی (۳۰ تا ۵۰ درصد اراضی به دلایل مختلف به زیر کشت نمی‌رود)، استفاده نامناسب و کم از ماشین‌آلات زراعی، استفاده ناچیز از کودهای آلی حیوانی و کود سبز و مصرف بی‌رویه سموم و کودهای شیمیایی، روش آبیاری سنتی و نامناسب با راندمان پایین (کمتر از ۴۰ درصد)، افت شدید سفره آب زیرزمینی (۴۵ سانتیمتر در سال) تراکم بالای زیستی جمعیت (مابین ۲۰۰ الی ۵۵۰ نفر در کیلومتر مربع)، تغییر نامناسب کاربری اراضی، بی‌کاری، وسعت ناچیز اراضی کشاورزی (حداکثر ۲ الی ۳ هکتار) و مشارکت ناچیز مردم بومی اشاره کرد.

مهم‌ترین شاخص‌های طبیعی مؤثر در بیابان‌زایی واحدها عبارت‌اند از: دوره خشکی طولانی به صورتی که بخش عمده‌ای از منطقه فاقد ماه مرطوب می‌باشد، بروز روزهای متعدد توأم با ماسه باد (بیش از ۱۰ روز در سال)، بالا بودن بادهای با سرعت بیش از سرعت آستانه فرسایش (۳۹ درصد)، پایین بودن نسبت بارش به تبخیر و تعرق (۰/۰۳ الی ۰/۰۵)، بارندگی کم (کمتر از ۶۰ میلی‌متر در سال)، بافت خاک متوسط تا ریز و دارای زهکشی نامناسب (۱/۲۷ تا ۲/۵۴ سانتیمتر بر ساعت)، وجود لایه‌های محدودکننده گچی و آهکی در عمق خاک به‌خصوص در واحدهای CGPC، BCG و PAG، جابه‌جائی ظاهری تپه‌های ماسه‌ای (بیش از ۱۰ متر در سال)، بالا بودن میزان شوری و کلر آب زیرزمینی (که به ترتیب به ۷۶۲۰ میلی‌موس بر سانتیمتر و ۲۳۵۰ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد)، وضعیت تیپ‌های گیاهی مرتعی فقیر با گرایش منفی به دلیل چرای مفرط و فشار دام (۳/۷ تا ۵/۱ برابر بیشتر از حد قابل تحمل) و بوته‌کشی شدید، (۴۰ درصد الی ۵۰ درصد پوشش گیاهی مرتعی بر اثر بوته‌کشی از بین می‌رود).

نتیجه‌گیری

ارزیابی خطر بیابان‌زایی امروزه نقش مهمی را در مدیریت پایدار منابع طبیعی ایفا می‌کند. از این‌رو، به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر بیابان‌زایی در دشت خضرآباد یزد از مدل تاکسونومی فازی استفاده شد. نتایج حاصله از تحلیل‌های صورت گرفته نشان داد که بیش از ۶۰ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی در معرض خطر نسبتاً شدید تا خیلی شدید بیابان‌زایی قرار دارد که نشان از پتانسیل بالای بیابان‌زایی منطقه دارد به‌طوری‌که ارزش کمی پتانسیل بیابان‌زایی برای کل منطقه از مجموع شاخص‌ها شدید ارزیابی شد.

به دلیل یکسان بودن منطقه مطالعاتی که امکان مقایسه تطبیقی بین نتایج را فراهم می‌نماید، نتایج حاصل از ارزیابی شدت بیابان‌زایی حاصل از مدل تاکسونومی فازی با نتایج حاصل از مدل‌های پهنه‌بندی به انجام رسیده در منطقه مطالعاتی از جمله، مدل تاکسونومی عددی توسعه‌یافته (Sadeghiravesh, et al, 2009)، مدل آسیب‌پذیری زیست‌محیطی (Sadeghiravesh et al, 2012)، مدل آنتروپی شانون (Sadeghiravesh, 2014)، مدل تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Sadeghiravesh, 2016)، مدل مطلوبیت چند شاخصه (Sadeghiravesh, 2020)، مدل‌های وی پی‌ام و واسپاس (Sadeghiravesh, 2024-a)، مدل‌های مورا و آراس (Sadeghiravesh, 2024-b)، مدل فازی بونیسون (Sadeghiravesh and Khosravi, 2022) و مدل تاپسیس فازی (Sadeghiravesh, et al, 2021) مورد مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد که تا حد زیادی نتایج حاصله باهم همخوانی دارند، به این معنی که در تمامی این مدل‌ها، واحدهای اراضی کشاورزی دشتی (PAG)، اراضی کشاورزی کوهستانی (MAG)، اراضی رسی با پوشش گیاهی (CGPC)، اراضی رسی لخت (BCG)، تپه‌های ماسه‌ای لخت (BSD)، تپه‌ها و پهنه‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی (SDPC)، دشت سرآپانداژ لخت (BEP) و اراضی صنعتی (IA) واجد بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی می‌باشند. از طرفی علیرغم یکسان بودن نوع و تعداد شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی و ارزش‌دهی شاخص‌ها در مقیاس واحد و ارزش‌گذاری یکسان واحدها بر مبنای شاخص‌ها در مطالعات انجام شده در منطقه خضرآباد، ارزش‌های عددی به دست آمده باهم اختلاف دارند، این امر عمدتاً وابسته به ماهیت مدل‌ها و ساختار روش‌هاست که ارزش‌های کمی را در طیف‌های مختلف ارائه می‌کند و همچنین به خاطر طبقه‌بندی متفاوت ارزش‌های کمی یا ضرایب شدت منتج از آن‌ها در هر پژوهش بر مبنای دامنه نوسان ارزش‌های به دست آمده، می‌باشد. لذا لازم است توابعی ارائه شود که بر مبنای منطق و اصول قوی و مبانی نظری مستدل از میان نتایج ارائه شده

در هر منطقه توسط مدل‌های مختلف، پتانسیل شدت بیابان‌زایی به صورت گروهی و نهایی ارائه شود در این رابطه پیشنهاد می‌شود از توابع رأی‌گیری در تصمیم‌گیری گروهی (همانند روش GRV، بردار ویژه، فیشبرن، کوک و سیفورد و غیره) که روش‌هایی مناسب به منظور دسترسی به یک توافق جمعی به منظور برطرف کردن پارادوکس رأی‌گیری و ناسازگاری اولویت‌بندی از یک مجموعه گزینه‌های مفروض می‌باشد، استفاده شود و سپس نقشه پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی با ضریب اطمینان بیشتر ارائه شود. همچنین در مدل تاکسونومی فازی همانند مدل تاپسیس فازی و مدل فازی بونیسون، انتخاب و تعیین اهمیت شاخص‌ها بر مبنای مقیاس چن و هوانگ به صورت دلفی فازی به انجام رسید، با این تفاوت که به منظور ترتیب اثر اولویت شاخص‌های مؤثر در نتایج، برخلاف مدل فازی بونیسون که از شاخص مطلوبیت استفاده می‌شود، در روش تاکسونومی فازی همانند مدل تاپسیس فازی، با محاسبه درجه بزرگی اعداد ترکیبی برای هر سطر ماتریس فازی و برآورد اوزان ناهنجار و بهنجار در قالب ماتریس تصمیم‌گیری، اقدام به برآورد شدت پتانسیل بیابان‌زایی شد. این در حالی است که در سایر مدل‌های فازی اشاره شده در ادبیات تحقیق، شاخص‌ها بر مبنای روش IMDPA و DPSIR انتخاب، ارزیابی و پهنه‌بندی شدت از تلفیق لایه‌ها در مقیاس صفر تا یک و نقشه‌سازی به روش کریجینگ بر روی لایه‌های رستری در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی حاصل می‌شود.

با توجه به تحلیل صورت گرفته و نتایج حاصل شده، می‌توان گفت که رویکرد امتیازی تاکسونومی فازی در ارزیابی شدت بیابان‌زایی و تهیه نقشه پهنه‌بندی با توجه به در نظر گرفتن شاخص‌های کمی و بومی و همچنین به دلیل سادگی و مرحله‌ای بودن آن، در نظر گرفتن روش ژئومورفولوژی در تعیین واحدهای پهنه‌بندی، روش وزن دادن به شاخص‌ها نسبت به هم و در ارتباط با هر واحد کاری با نظرخواهی گروهی در چارچوب جدول امتیازدهی یکسان و استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، روش سریع و نسبتاً دقیقی در ارزیابی شدت بیابان‌زایی است.

به‌طور کلی نتایج حاصل شده می‌تواند در ارزیابی‌های آتی به منظور سرمایه‌گذاری در جهت دستیابی به توسعه پایدار مدنظر قرار گرفته تا علاوه بر تضمین پایدار ارزش افزوده سرمایه‌گذاری‌ها، اکوسیستم‌های حاشیه‌ای این مناطق را به نحو مطلوب‌تری حفاظت کند. از طرف دیگر به مدیران مناطق بیابانی این امکان را می‌دهد که امکانات و سرمایه‌های محدود اختصاص یافته به منظور کنترل روند بیابان‌زایی را در مناطق دارای حساسیت بیشتر به کار بندند تا ضمن دستیابی به نتایج بهتر، از هدر رفتن سرمایه‌های ملی جلوگیری کنند.

به منظور کاربرد این مدل در مناطق دیگر می‌بایستی به فاکتورهای مؤثر در بیابان‌زایی به عنوان شاخص‌های آسیب‌پذیری به صورت بومی توجه و همچنین به نحوه اثرگذاری هر فاکتور بر فرایند بیابان‌زایی تأکید شود.

سپاسگزاری: مقاله حاضر بخشی از تحقیق فردی در زمینه ارزیابی و مدیریت اکوسیستم‌های بیابانی می‌باشد که با حمایت و همراهی کارشناسان مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سازمان جهاد کشاورزی استان یزد و ایستگاه تحقیقات مقابله با بیابان‌زایی شهید صدوقی اشکذر و مدیریت جهاد کشاورزی شهرستان اشکذر انجام شد که بدین‌وسیله از همه این عزیزان تشکر و قدردانی می‌شود.

حامی مالی: بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش: همه نویسندگان، در نگارش و تنظیم مقاله حاضر نقش و سهم برابر دارند.

تضاد منافع: نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

پی‌نوشت

^۱ Synthetic Trapezoidal Fuzzy Number

^۲ Harmonic Fuzzy Decision Matrix (HFDm)

^۳ United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)

^۴ Mediterranean Desertification and Land Use (MEDALUS)

^۵ Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD)

^۶ Assessment of Soil Degradation in South and Southeast Asia (ASSOD)

^۷ Environment Sensitive Area to Desertification (ESA)

^۸ Land Degradation Assessment in Dry lands (LADA)

^۹ Iranian Classification of Desertification (ICD)

^{۱۰} Modified Iranian classification of desertification (MICD)

^{۱۱} Iranian Model of Desertification Potential Assessment (IMDPA)

^{۱۲} Modified Numerical Taxonomy (MNT)

^{۱۳} Shannons Entropy Model

^{۱۴} Decision Making and Selection processes^{۱۵} fuzzy logic^{۱۶} Multicriteria Decision Analysis^{۱۷} Entisols^{۱۸} Orthents^{۱۹} Erg^{۲۰} MCDM: Multi Criteria Decision Making^{۲۱} Compensatory Methods^{۲۲} Concordance Methods^{۲۳} Delphi method^{۲۴} Fuzzy Delphi method^{۲۵} Bonissone^{۲۶} Synthetic Trapezoidal Fuzzy Number^{۲۷} Terrain Mapping Unit (TMU)^{۲۸} Fuzzy Decision Matrix (FDM)^{۲۹} Multi Attribute Decision Making (MADM)^{۳۰} Harmonic Fuzzy Decision Matrix (HFDM)^{۳۱} Optimum^{۳۲} Plain Agricultural Ground^{۳۳} Bare Sandy Dunes^{۳۴} Clay Grounds with Plant Cover^{۳۵} Bare Clay Grounds^{۳۶} Sandy Dunes with Plant Cover^{۳۷} Bare Epandage Pediment^{۳۸} Industrial Areas^{۳۹} Bare Mountain Grounds^{۴۰} Epandage Pediment with Plant Cover

References

- Abrisham, E. (2004). Evaluation and mapping of desertification condition in Fakhrabad--Mehriz region with the FAO-UNEP and MICD models. (M.Sc Thesis), *University of Tehran*, Tehran, Iran (In Persian).
- Ahmadi, H. (2011). Applied Geomorphology, Water Erosion. *University of Tehran*, Tehran, Iran (In Persian).
- Ahmadi, H., Abrisham, E., Ekhtesasi, M. R., Jafari, M. and Gokarian, A. (2005). Evaluation and mapping of desertification condition in FAKHRABAD-MEHRIZ region with the ICD and MICD models. *Biaban*, 10(1-1), 37-50. doi:[10.22059/JDESERT.2005.31880](https://doi.org/10.22059/JDESERT.2005.31880)
- Ahmadi, H., Zehtabian, G. H., Jafari, M. and Azarnivand, H. (2006). Iranian model of potential desertification assessment. Faculty of Natural Resources, *University of Tehran*, Tehran, Iran (In Persian).
- Asgharizadeh, E. and Mohammadi Balani, A. (2021). Multi-attribute decision making techniques. *Publication of Tehran University*, Tehran, Iran (In Persian).
- Asgharpour, M. J. (2017). Multi-Criteria Decision Making. *Publication of Tehran University*, Tehran, Iran (In Persian).
- Aslinezhad, N., Pahlavanravi, A., Basirani, N., Ebrahimi, M. and Kharazmi, R. (2014). Assessment of land degradation and desertification with use of IMDPA model (Case Study; Chah-hashm Plain, Iran). *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(10), 2644-2650. https://www.ijabbr.com/article_9989_9119dafb96515aadcf5625ca5389.pdf
- Azar, A. and Faraji, H. (2016). Science of fuzzy management. *Mehraban press*, Tehran, Iran (In Persian).
- Azar, A. and Rajabzadeh, A. (2017). Applied Decision Making with an Approach of Multi-Attribute Decision Making (MADM). *Publication of Negah Danesh*, Tehran, Iran (In Persian).
- Bakhshandehmehr, L. (2008). Quantitative assessment of desertification present status in east of Isfahan and a regional model development with emphasis on MEDALUS method. M.sc. Dissertation, *University of Isfahan* (In Persian).
- Bidgoli, R. D., Koohbanani, H., Yazdani, M. and Dashti Amirabad, J. (2019). Risk assessment of land destruction and desertification severity using fuzzy method (Case Study: Miyandehi, Khorasan Razavi Province). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(4), 877-887. <https://doi.org/10.22092/ijdr.2019.118620> (In Persian).
- Briassoulis, H. (2019). Combating land degradation and desertification: The Land-Use Planning Quandary. *Land*, 8(2), 1-26. doi: <https://doi.org/10.3390/land8020027>
- Chen, S. J., Hwang, C. L., Beckmann, M. J. and Krelle, W. (1992). Fuzzy multiple attribute decision making: methods and applications. *Springer-Verlag Press*, Secaucus, New Jersey, United States.
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S. and Von Maltitz, G. (2018). World Atlas of Desertification: Rethinking Land Degradation and Sustainable Land Management. Luxembourg: *Publication Office of the European Union*. ISBN 978-92-79-75349-7, doi:[10.2760/06292_JRC111155](https://doi.org/10.2760/06292_JRC111155)
- Ekhtesasi, M. R. and Mohajeri, S. (1995). Classification of the Type and Severity of Desertification in Iran. *Proceeded In 2th National Conference on Desert Areas Issues*, Kerman, Iran (In Persian).
- European Commission (EC). 1999. Mediteranean Desertification and Land Use (MEDALUS). London, England, MEDALUS office. https://catalogue.unccd.int/629_Medalus_ESA_%20Manual.pdf
- FAO/UNEP. 1984. Provisional Methodology for Assessment and Mapping of Desertification. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations, *United Nations Environmental Program*. <https://library.unccd.int/Details/books/237>
- Gharachelo, S., Ekhtesasi, M. R., Zareian Jahromi, M. and Samadi, M. B. (2021). Evaluation of current condition of desertification using I.C.D Model, case study: Khezarabad, Yazd. *Iranian Journal of Range and Desert*

- Research*, 17(3), 402-420. https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_102934_6cfa67e0e102171340470f1e0beff691.pdf (In Persian).
- Jafari, M., Hayati, J., Zargham, N. A., Azarniوند, H. and Sofi, M. (2004). Review and assessment of desertification projects in Lamard plain. *Geographical Research*, ۵۰(۳۶), ۱۹۹-۲۱۴. https://jrg.ut.ac.ir/article_10065.html (In Persian).
- Kardavani, P. (2010). Arid areas, climatic features, drought causes, water issues, Volume I. *Publication of Tehran University*, Tehran, Iran (In Persian).
- Kirkby, M. J., Abrahart, R., McMahon, M. D., Shao, J. and Thornes, J. B. (۱۹۹۸). MEDALUS soil erosion models for global change. *Journal of Geomorphology*, 24, ۳۵-۴۹. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00099-8)
- Koohbanani, H., Dashti Amirabad, J., Nikoo, S. and Taya, A. (2017). Desertification-intensity zoning through Fuzzy-Logic approach: a case study of Deyhook-Tabas, Iran. *Quarterly journal of Environmental Erosion Research*, 7(1), 35-49. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-322-fa.html> (In Persian).
- Koohafkan, A. P., Lantieri, D. and Nachtergaele, F. (2003). Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) guidelines for a methodological approach. *Food and Agriculture Organization (FAO)*, Rome, Italy. www.fao.org/ag/agl/agll/lada/bckgrdocs.stm
- Lamchin, M., Lee, J. Y., Lee, W. K., Lee, E. J., Kim, M., Lim, C. H., Choi, H. A. and Kim, S. R. (2015). Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*, 57, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.006>
- Li, W., Yu, G., Shouyu, C. and Huicheng, Z. (2006). Use of variable fuzzy sets methods for desertification evaluation. Computational intelligence, theory and applications. *Polish Academy of Sciences*, 38, 721-731. https://doi.org/10.1007/3-540-34783-6_70
- Malchefska, Y. (2016). geographic information system and multi-criteria decision analysis, translated by Parhizgar, A and Ghafari Gilandeh, A., fourth edition, *Samt press*, Tehran, Iran. (In Persian).
- Meixner, O. (2009). Fuzzy AHP group decision analysis and its application for the evaluation of energy sources. In *10th International Symposium on the Analytic Hierarchy/Network Process*, 2009: Pittsburgh, USA (Vol 29). [10.13033/ISAHP.Y2009.051](https://doi.org/10.13033/ISAHP.Y2009.051)
- Nachtergaele, F.O.F. and Licona-Manzur, C. (۲۰۰۹). The Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) Project: Reflections on Indicators for Land Degradation Assessment, the Future of Drylands, January 01: 327-348, <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/93a768b9-6ef1-44bc-aa37-3e6711569748/content>
- Nadaban, S., Dzitac, S. and Dzitac, I. (2016). Fuzzy TOPSIS: A General View. *Procedia Computer Science*, 91, ۸۲۳ – ۸۳۱. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.04.088>
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R. T. A. and Sombroek, W. G. (۱۹۹۱). World Map of the Status of Human Induced Soil Degradation. *ISRIC/UNEP*, Wageningen, Netherlands. https://www.isric.org/sites/default/files/isric_report_1990_07.pdf
- Pahlavanravi, A., Moghadamnia, A., Hashemi, Z., Javadi, M. R. and Miri, A. (2013). Evaluation of desertification intensity with wind erosion criterion using MICD and FAO-UNEP models in Zahak region of Sistan. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*. 19(4), 624-639. DOI: <http://dx.doi.org/10.22092/ijrdr.2013.3040> (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. (2014). Zoning the potential of desertification hazard using the MADM approach and Shannon entropy model in the Khezrabad region, Yazd province. *Iranian Journal of Soil Research*, 28(3), 572-588. [10.22092/ijrdr.2014.100024](https://doi.org/10.22092/ijrdr.2014.100024) (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. (2016). Zoning the potential of desertification hazard using the principal component analysis model in the Khezrabad region. *Journal of geographical space*, 16(56), 241-261. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-729-fa.pdf> (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. (2020). Desertification hazard zoning using Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) model. *Environmental Recerches*, 10(20), 177-194. <https://20.1001.1.20089597.1398.10.20.15.5> (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. (2022). Application of Interpretive Structural Modelling (ISM) in analyzing obstacles to combat desertification with pathological approach in Yazd province. *Journal of Watershed Management Research*, 13(۲۵), ۱۱۹-۱۳۲. doi: [10.52547/jwmr.13.25.119](https://doi.org/10.52547/jwmr.13.25.119) (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. (2023). Sensitivity analysis of combat desertification strategies in Fuzzy environment in Yazd-Khezrabad sub-catchment (Saduq County). *Journal of Watershed Management Research*, 13(26), 203-214. doi: <http://dx.doi.org/10.52547/jwmr.13.26.203> (In Persian).

- Sadeghiravesh, M. H. (2024- a). Monitoring of the actual state of desertification using VPM and WASPAS scoring models. *Geography and Environmental Sustainability*, ۱۴(۲), ۱۰۱-120. [10.22126/GES.2024.10526.2748](https://doi.org/10.22126/GES.2024.10526.2748) (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. (2024- b). Zoning potential of desertification intensity using Moora and Aras scoring models in Yazd-Khezrabad sub-catchment. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 11(3), 55-72. [10.61186/JSAEH.11.3.4](https://doi.org/10.61186/JSAEH.11.3.4) (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. and Ahmadi, H. (2014). Zoning desertification Potential risk in Abozydabad region by using modified numerical taxonomy model. *Geographical Space*, 14(47), 83-99. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1274-fa.html> (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H. and Ahmadi, H., Zehtabian, G. R. and Rehayi Khoram, M. (2009). Development of the Numerical Taxonomy (MNT) model to assess desertification: an example of modeling intensity in central Iran. *Philippine Agricultural Scientist*, 92(2), 213- 227. <https://pas.uplb.edu.ph/issues/vol-92-no-2-jun-2009/>
- Sadeghiravesh, M. H. and Khosravi, H. (2012). Zoning wind erosion potential risk in central Iran using modified numerical taxonomy model. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 12(1), 91-99. [https://www.idosi.org/aejaes/jaes12\(1\)12/13.pdf](https://www.idosi.org/aejaes/jaes12(1)12/13.pdf)
- Sadeghiravesh, M. H. and Khosravi, H. (۲۰۲۲). Assessment the hazard of desertification using fuzzy TOPSIS logic in GIS environment, *Journal of Environmental Sciences and Technolgy*, 24(3), 221-229. <https://doi.org/10.22126/ges.2024.10526.2748> (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H., Khosravi, H., Abolhasani, A., Ghodsi, M. and Mosavi, A. (2021). Fuzzy logic model to assess desertification intensity based on vulnerability indices. *Acta Polytechnica Hungarica*, 18(3), 7-24. <https://doi.org/10.12700/APH.18.3.2021.3.1>
- Sadeghiravesh, M. H., Zehtabian, G. H. and Tahmores, T. (2012). A vulnerability assessment of environmental issue to desertification risk (case study: Khezrabad region, Yazd). *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 96(1), 75-87 (In Persian).
- Sarkar, S., Parihar, S. M., Dutta, A. (۲۰۱۶). Fuzzy risk assessment modelling of East Kolkata Wetland Area: a remote sensing and GIS based approach. *Environmental Modelling & Software*, 75(C), ۱۰۵ – ۱۱۸. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.003>
- Silakhori, E., Ownegh, M. and Soleimani sardo, M. (2019). Assessment of risk and hazard desertification using Topsis-GIS method (Case Study: Bashtin, Sabzevar, Razavi province). *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 10(35), 44-59. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161488_152285621e55eed7a247a775f0a16702.pdf?lang=en (In Persian).
- Sharifi, M. and Farahbakhsh, Z. (2016). Investigation about temperature and humidity anomalies between pleistocene and present times: reconstruction of climate condition using geomorphic evidence (case study: Khezrabad-Yazd). *Physical Geography Researches*, 47(4), 583-605. Doi: [10.22059/jphgr.2015.56051](https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.56051) (In Persian).
- UN (United Nations), 1994. United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/ or Desertification, Particularly in Africa. UNEP/IPA, Nairobi, Kenya. https://catalogue.unccd.int/936_UNCCD_Convention_ENG.pdf
- Van Lynden, G. W. J. and Oldeman, L. R. (1997). The Assessment of the Status of Human-induced Soil Degradation in South and South East Asia. *ISRIC*, Wageningen, Netherlands. <https://edepot.wur.nl/287427>
- Wang, X. D., Zhong, X. H., Liu, S. Z., Wang, Z. Y. and Li, M. H. (2008). Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan plateau: development & application of a new method. *Journal of Arid Environment*. 72(10), 1929-1939. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.06.005>
- Wang, Y., Zhang, J., Guo, E. and Sun, Z. (2015). Fuzzy comprehensive evaluation- based disaster risk assessment of desertification in Horqin Sand land, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(۲), ۱۷۰۳ – ۱۷۲۵. <https://doi.org/10.3390/ijerph120201703>
- Zehtabian, G. R., Ahmadi, H., Ekhtesasi, M. R. and Jafari, R. (2002). Intensity Determination of Wind Erosion in Kashan Area by the Desertification Model. *Iranian Journal of Natural Resources*, 55(2):145-157. https://ijnr.ut.ac.ir/article_17300.html (In Persian).