



Monitoring of the Actual State of Desertification using VPM and WASPAS Scoring Models

Mohammad Hassan Sadeghiravesh ¹

1. Department of Environment, Faculty of Agriculture, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran. E-mail: mh.sadeghiravesh@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 29 Apr 2024

Received in revised form:
19 Jun 2024

Accepted: 22 Jun 2024

Available online: 21 Jun 2024

Keywords:

Desertification,
Hierarchical structure,
Decision-making models,
Weighted aggregate sum
product assessment,
Weighted product
method.

ABSTRACT

Considering the spread of desertification and the emergence of its extensive and long-term effects on the environment and human activities, appropriate management methods can reduce the intensity and spread of this phenomenon. Therefore, executive actions in this field should be based on knowledge of the current state of land desertification and its future development. Therefore, this research was conducted to evaluate the risk of desertification using VPM and WASPAS scoring models and a geographic information system as a case study in the Yazd-Khizrabad Plain from 2021 to 2022. In the framework of these models, effective indicators are identified based on field and library studies. The working units were then determined by the geomorphology method and the importance of the indicators in each unit was obtained in the form of pairwise comparisons based on the Delphi method. Next, the importance of the indices was estimated using the Shannon entropy method, and a decision matrix was formed. After balancing, zoning of the desertification intensity potential was performed by calculating the desirability coefficient using the VPM and WASPAS scoring methods in the ArcGIS software environment. results obtained showed that the land units of the Mountain Agriculture Ground (MAG) and Plain Agriculture Ground (PAG) have the highest desertification potential, which covers 7335.86 ha (35.9%) of the entire study area. Most of the land in the region is under the influence of desertification with a relatively moderate intensity (III). The quantitative value of the desertification potential for the whole region based on all the indicators was placed in the middle class (IV). The results of this study indicate the efficiency and ease of application of the VPM and WASPAS point approach techniques in evaluating the intensity of desertification.

Cite this article: Sadeghiravesh, M. H. (2024). Monitoring of the Actual State of Desertification using VPM and WASPAS Scoring Models. *Geography and Environmental Sustainability*, 14 (2), 101-120. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10526.2748>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10526.2748>

Publisher: Razi University

پایش وضعیت بالفعل بیابان‌زایی با استفاده از مدل‌های امتیازی وی پی ام و واسپاس

محمد حسن صادقی‌روش^۱

۱. گروه محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران. رایانامه: mh.sadeghiravesh@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲</p> <p>دسترسی آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>بیابان‌زایی، ساختار سلسله‌مراتبی، مدل‌های تصمیم‌گیری، روش ضریب وزنی، ارزیابی ضریب مجموع مقادیر وزنی.</p>	<p>باتوجه به گسترش پدیده بیابان‌زایی و ظهور اثرات گسترده و بلندمدت آن بر محیط‌زیست و فعالیت‌های انسانی، ارائه روش‌های مدیریتی مناسب، قادر است شدت و گسترش این پدیده را کاهش دهد؛ لذا اقدامات اجرایی در این زمینه باید متکی به شناخت وضعیت فعلی بیابانی شدن اراضی و روند توسعه آتی آن باشد. از این‌رو، این پژوهش باهدف ارزیابی خطر بیابان‌زایی با استفاده از مدل‌های امتیازی وی پی ام و واسپاس و استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌صورت موردی در دشت یزد - خضراباد طی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱ به انجام رسید. در چارچوب این مدل‌ها در ابتدا بر مبنای مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای شاخص‌های موثر شناسایی شد. سپس واحدهای کاری به روش ژئومورفولوژی تعیین و اهمیت شاخص‌ها در هر واحد به‌صورت زوجی و بر مبنای روش دلفی به دست آمد. در ادامه اهمیت شاخص‌ها نسبت به هم از روش آنترپوی شانون برآورد شد و ماتریس تصمیم شکل گرفت و بعد از موزون‌سازی، پهنه‌بندی پتانسیل شدت بیابان‌زایی با محاسبه ضریب مطلوبیت از روش امتیازی وی پی ام و واسپاس در محیط نرم‌افزار ArcGIS به انجام رسید. نتایج حاصله نشان داد که واحد اراضی کشاورزی کوهستانی (MAG) و کشاورزی دشتی (PAG)، واجد بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی هستند که ۷۳۳۵/۸۶ هکتار (۰/۹۳۵٪) از کل منطقه مطالعاتی را دربرگرفته‌اند. بیشترین اراضی منطقه، تحت‌تأثیر بیابان‌زایی با شدت نسبتاً متوسط (III) قرار دارد. درعین‌حال، ارزش کمی پتانسیل بیابان‌زایی برای کل منطقه از مجموع شاخص‌ها در کلاس متوسط (IV) به دست آمد. مطالعه صورت‌گرفته نشان از کارایی و سهولت کاربرد تکنیک‌های دارای رویکرد امتیازی وی پی ام و واسپاس در ارزیابی شدت بیابان‌زایی دارد.</p>

استناد: صادقی‌روش، محمد حسن (۱۴۰۳). پایش وضعیت بالفعل بیابان‌زایی با استفاده از مدل‌های امتیازی وی پی ام و واسپاس. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۴ (۲)، ۱۰۱-۱۲۰. <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10526.2748>

ناشر: دانشگاه رازی
 نویسنده‌گان: ©
 DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2024.10526.2748>



مقدمه

بیابان‌زایی، تخریب زمین در مناطق خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب است و یکی از مشکلات عمده زیست‌محیطی و اقتصادی اجتماعی در مقیاس جهانی می‌باشد (IPCC, 2019) که به دلیل سوءمدیریت زمین، به‌آرامی توسعه می‌یابد (UNCCD, 2016). پرداختن به مسئله بیابان‌زایی به‌خاطر ماهیت چند معیاری، توسعه روزافزون، گسترده و بلندمدت بودن و تحت‌تأثیر قراردادن توأمان منابع سرزمینی و جمعیت‌های انسانی، به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار ضروری است (Sadeghiravesh, 2022). علی‌رغم تلاش‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی برای مبارزه با بیابان‌زایی، بیابان‌زایی همچنان به‌عنوان یکی از مشکلات عمده زیست‌محیطی باقی‌مانده است (Cherlet et al., 2018). از این‌رو در کنوانسیون سازمان ملل در رابطه با مقابله با بیابان‌زایی^۱ 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 به‌شمار رفته است (Wang et al., 2008; Pahlavanravi et al., 2013). در این راستا در رابطه با پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی، پژوهش‌های مختلفی به انجام رسیده است، از جمله، روش پژوهشی مقدماتی برای تحلیل نقشه‌بندی بیابان‌زایی در سال ۱۹۸۴ (FAO/UNEP, 1984)، مدل تهیه نقشه اراضی حساس به بیابان‌زایی در منطقه مدیترانه یا مدالوس توسط کمیسیون اروپا در سال ۱۹۸۷ (Kirkby et al., 1998)، روش ارزیابی فرسایش و تخریب خاک در سطح جهان یا گلاسود 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 توسط برنامه محیط‌زیست سازمان ملل در سال ۱۹۹۴ (van Lynden and Oldeman, 1997)، مدل حساسیت زیست‌محیطی نواحی^۲ یا مدل ESAs توسط کمیسیون اروپا در سال ۱۹۹۹ (European commission, 1999)، ارزیابی تخریب زمین در اراضی خشک^۳ یا مدل LADA توسط سازمان ملل در سال ۲۰۰۲ (Koochafkan et al., 2003; Nachtergaele & Licon-Manzur, 2009)، پروژه ارزیابی بیابان‌زایی Desert links توسط کمیسیون اروپا در طی سال‌های ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۵ و پروژه مطالعه بیابان‌زایی Survey توسط کمیسیون اروپا در طی سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۰ (Bakhshandehmehr, 2008).

در ایران نیز اختصاصی و مهاجری در سال ۱۳۷۴، مدل طبقه‌بندی نوع و شدت بیابان‌زایی در ایران (ICD^۴) را به‌منظور رتبه‌بندی شدت بیابان‌زایی، ارائه کردند. در این روش هشت معیار مؤثر در بیابان‌زایی شامل چهار عامل محیطی و چهار عامل انسانی بررسی شدند و نهایتاً شدت فرسایش، تخریب خاک و توان بازگشت‌پذیری و بازسازی اکوسیستم به روش امتیازدهی وزنی ارزیابی شدند، معیارهای ارائه شده جهت ارزیابی این عوامل عمدتاً توصیفی و کیفی هستند (Ekhtesasi & Mohajeri, 1995).

در سال ۱۳۸۲ مدل بسط یافته طبقه‌بندی نوع و شدت بیابان‌زایی در ایران MICD^۵ توسط ابریشم و همکاران به‌منظور کمی‌سازی و اصلاح مدل ICD، ارائه شد، در این راستا اقدام به باز تعریف و طبقه‌بندی کمی عوامل اصلی و فرعی همچون طول دوره خشکی، شیب، مقاومت سنگ‌ها در مقابل فرسایش، تخریب پوشش گیاهی و خاک و اقدامات و عملیات بیابان‌زدایی کردند در عین حال به جای دامنه امتیازدهی مابین ۰ تا ۱۰، به منظور کاهش اختلاف نظر متخصصان از دامنه امتیازدهی ۰ تا ۴ استفاده شد و سعی شد به منظور دقت بیشتر از ضرب عوامل محیطی در عدد ۲، در مناطق بدون پوشش گیاهی که عوامل انسانی نقشی ندارند، خودداری شود، چرا که این عمل با واقعیت تطابق ندارد و با این کار عملاً سهم عوامل محیطی را در بیابان‌زایی دو برابر می‌شود و این امر شدت بیابان‌زایی طبیعی را بالا می‌برد؛ بنابراین در این مناطق امتیاز صفر عوامل انسانی با امتیاز عوامل طبیعی جمع شد و بر مبنای آن شدت بیابان‌زایی تعیین شد (Zehtabian et al., 2002; Abrisham, E, 2004; Ahmadi et al., 2005).

1. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)
2. Environment Sensitive Area to Desertification (ESA)
3. Land Degradation Assessment in Dry lands (LADA)
4. Iranian Classification of Desertification (ICD)
5. Modified Iranian classification of desertification (MICD)

در سال ۱۳۸۳ در چارچوب مدل مدالوس، مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی^۱ (IMDPA) با هدف شناخت و معرفی معیارها و شاخص‌های بیابان‌زایی و ارائه متدولوژی ارزیابی کمی و کیفی تخریب اراضی در زیست‌بوم‌های طبیعی کشور با همکاری معاونت امور مراتع و خاک سازمان جنگلها، مراتع و آبخیزداری کشور و دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران ارائه شد (Zehtabian et al., 2002). در این روش شاخص‌ها و معیارها متناسب با شرایط بوم شناختی و محیطی ایران انتخاب و رتبه بندی شدند. بر این اساس، نه معیار زمین‌شناسی، خاک، پوشش گیاهی، اقلیم، کشاورزی، آب و آبیاری، فرسایش (بادی و آبی)، صنعت و شهرسازی و مسائل اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شد و سی و پنج شاخص به منظور پهنه‌بندی بیابان‌زایی توسط تیم کارشناسی در نظر گرفته شد. در این روش به منظور کاهش خطا و سهولت در امتیازدهی، نمره‌دهی شاخص‌ها به صورت رتبه‌ای بیان شد (Ahmadi et al., 2006).

صادقی‌روش در سال ۱۳۸۸ مدل تاکسونومی رقمی توسعه‌یافته^۲ (MNT) را ارائه کرد. چارچوب این روش بر مبنای ساختار سلسله‌مراتبی و مقایسه‌های زوجی بنا نهاده شد. در عین حال به‌منظور تقلیل خطای ارزش‌گذاری شاخص‌ها، علاوه بر نظرخواهی گروهی در قالب مدل دلفی، از شاخص ناسازگاری به‌منظور خودکنترلی رأی‌ها و نظرات استفاده شد (Sadeghiravesh et al., 2009; Sadeghiravesh & Khosravi, 2012; Sadeghiravesh & Ahmadi, 2014).

با مطالعه این مدل‌ها مشخص شد که آنها نیز به نوبه خود دارای کاستی‌هایی بودند که در این رابطه می‌توان به کوچک مقیاس بودن، کیفی و غیربومی بودن شاخص‌ها، عدم امکان تفکیک عوامل انسانی و طبیعی، خطای کارشناسی و غیره اشاره کرد. هر چند این نواقص در مدل تاکسونومی عددی تا حد زیادی برطرف شد ولی همچنان مشاهده می‌شد که در ارزش‌گذاری شاخص‌ها به ارجحیت شاخص نسبت به هم نمی‌پردازند و تنها اقدام به ارزش‌گذاری شاخص‌ها در هر واحدکاری می‌کنند که بر این مبنای نتایج حاصله دور از واقعیت به دست می‌آید. از این رو صادقی‌روش در سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۸ چهار مدل آسیب‌پذیری زیست‌محیطی^۳ (Sadehghiravesh et al., 2012) (EVI)، مدل آنتروپی شانون^۴ (Sadeghiravesh, 2014)، مدل تحلیل مولفه‌های اصلی^۵ (Sadeghiravesh, 2016) و مطلوبیت چند شاخصه^۶ (Sadeghiravesh, 2020) 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 واحدکاری برآورد می‌کردند. در عین حال روش‌های مذکور، واجد محدودیت نادیده انگاشتن قضاوت‌های فازی تصمیم‌گیران بودند. از آن‌جا که پدیده‌های واقعی همواره فازی، نادقیق و مبهم هستند و زمانی که نیاز به پیروی از رفتار انسانی (فرایند انتخاب و تصمیم‌گیری)^۷ وجود دارد منطق فازی به صورت واقعی‌تر و نزدیک‌تر به رفتار انسانی می‌باشد (Meixner, 2009; Wang et al. & Faraji, 2016) (Wang et al., 2015; Bidgoli et al., 2019)؛ لذا به منظور دستیابی به هدف پهنه‌بندی، کوه‌نباتی (Koohbanani et al., 2017)، بیدگلی و همکاران (Sadeghiravesh et al., 2019)، سیلاخوری و همکاران (Silakhoori et al., 2019) و صادقی‌روش و همکاران (Wang et al., 2015) در سال ۲۰۱۵ به روش فازی اقدام به ارزیابی خطر بیابان‌زایی کردند.

باتوجه به اهمیت کاربردی این ارزیابی‌ها، علی‌رغم توسعه فنون و روش‌های کمی در پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی در طی سال‌های اخیر، همچنان سعی در ارائه روش‌های کمی با خطای کمتر و ضریب اطمینان بیشتر و سرعت و سهولت در دستیابی به نتایج بالاتر است. از این رو هدف اصلی پژوهش حاضر، ارائه مدلی مناسب جهت پهنه‌بندی توزیع فضایی خطر بیابان‌زایی به صورت جامع، بومی، کمی و انعطاف‌پذیر و با ساختار سلسله‌مراتبی می‌باشد. به این منظور با مطالعه تکنیک‌های

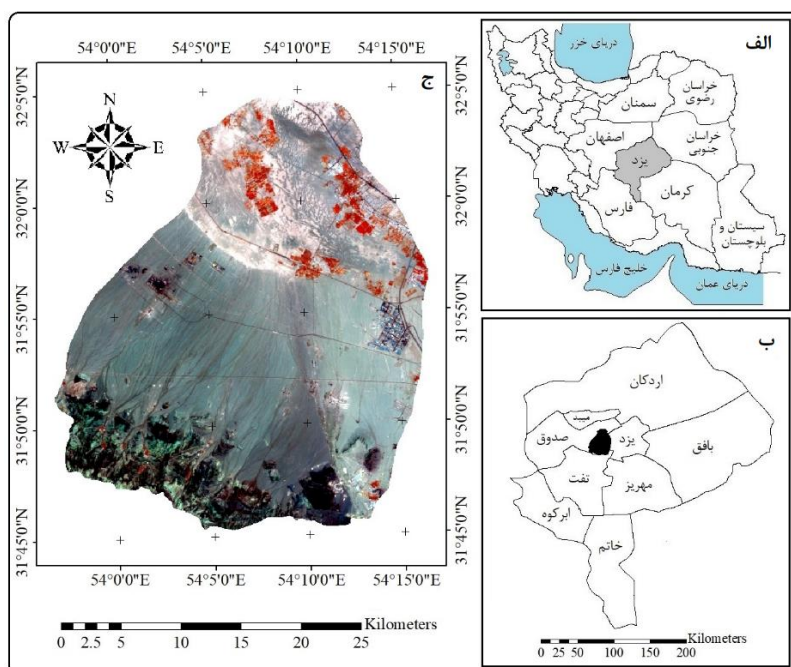
1. Iranian Model of Desertification Potential Assessment (IMDPA)
2. Modified Numerical Taxonomy (MNT)
3. Environmental vulnerability index (EVI)
4. Shanons Entropy Model
5. Principal Component Analysis (PCA)
6. Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)
7. Decision Making and Selection process

ارزیابی بیابان‌زایی به انجام رسیده و سایر تکنیک‌های پهنه‌بندی خطر، ارزیابی پهنه‌بندی پتانسیل شدت بیابان‌زایی با استفاده از تکنیک‌های WPM و WASPAS و استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی در زیرحوضه یزد- خضرآباد مد نظر قرار گرفت، این تکنیک‌ها دارای رویکرد امتیازی^۱ می‌باشند، به این معنی که با توجه به داده‌های ورودی، امتیازی مبنی بر یک تابع مطلوبیت به هر گزینه نسبت می‌دهد که برآوردی از مجموع ارزش آن گزینه با در نظر گرفتن تمامی شاخص‌ها می‌باشد، این تکنیک از قابل‌فهم‌ترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که محاسبات آن سهل است؛ بنابراین در عمل در حوزه‌های مختلف علوم از آن بسیار استفاده شده است (Asgharizadeh & Mohammadi Balani, 2021).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه یزد - خزرآباد بخشی از حوضه آبخیز بزرگ یزد - اردکان می‌باشد که در غرب شهر یزد واقع شده است (شکل ۱). مساحت تقریبی منطقه ۷۸۲ کیلومترمربع می‌باشد که در موقعیت جغرافیایی ۵۵°، ۵۳° تا ۵۴°، ۲۰°، ۴۵° طول شرقی و ۳۱°، ۱۵° تا ۳۲° عرض شمالی قرار دارد. قسمت اعظم منطقه را اراضی پست متشکل از سازند قدیمی کهر تا رسوبات جوان کواترن با شیب متوسط ۹/۴۱ درصد تشکیل می‌دهد (Sharifi & Farahbakhsh, 2016). منابع خاک منطقه عمدتاً در رده خاک‌های نارس بیابانی یا آنتی‌سول^۲ و زیر رده اورنتز^۳ می‌باشد که دارای رژیم رطوبتی آریدیک و رژیم حرارتی ترمیک و شدیداً متأثر از فرایند فرسایش بادی و آبی می‌باشد (Gharachelo et al., 2021). از نظر اقلیمی بر مبنای روش دمارتن اصلاح شده، اقلیم منطقه در شرایط سرد و خشک بیابانی طبقه‌بندی می‌شود. حدود ۱۳۰ کیلومترمربع از اراضی منطقه را عرصه‌های ماسه‌ای شکل داده است. ارگ^۴ اشکذر با وسعتی معادل ۸۹ کیلومترمربع در شمال منطقه مورد مطالعه با انواع رخساره‌های تخریبی و فرسایشی به چشم می‌خورد که نشان‌دهنده وضعیت منحصر به فرد از نظر رخداد بیابان‌زایی و بیانگر ضرورت بررسی شدت بیابان‌زایی در منطقه است (Sadeghiravesh, 2023) (شکل ۲).



شکل ۱. الف: موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران؛ ب: استان یزد؛ ج: تصویر ماهواره ای منطقه مورد مطالعه - ترکیب رنگی RGB_{5,6,7} که رنگ قرمز در ترکیب رنگی ارائه شده نشان دهنده پوشش گیاهی است

1. Scoring Approach
2. Entisols
3. Orthents
4. Erg



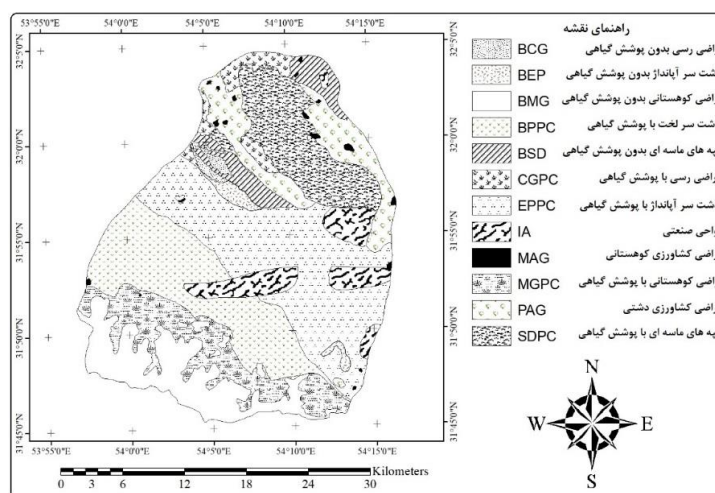
شکل ۲. الف: نمائی از تاغ‌زارهای احداث شده در جهت باد غالب، اطراف راه آهن یزد- تهران در شمال منطقه مطالعاتی؛ ب: عکس منازل روستایی تحت خطر تپه‌های ماسه‌ای، روستای حجت آباد علیا (رستاق)

روش تحقیق

در این پژوهش از تکنیک پهنه‌بندی وی پی ام و واسپاس استفاده شد. این تکنیک‌ها دارای رویکرد امتیازی هستند. رویکرد امتیازی^۱ به دنبال این است که باتوجه به داده‌های ورودی، امتیازی مبتنی بر یک تابع مطلوبیت به هر گزینه نسبت دهد که برآوردی از مجموعه عملکرد آن گزینه در تمام شاخص‌ها باشد و در انتها بتوان گزینه‌ها را بر اساس امتیازشان رتبه‌بندی کرد. در واقع این تکنیک‌ها با سنجش مطلوبیت گزینه‌ها به دنبال به‌دست آوردن بیشترین مطلوبیت‌اند که متعلق به بهترین گزینه است. رویکرد امتیازی با حداکثرسازی مطلوبیت DM به بهینه‌سازی تابع مطلوبیت می‌پردازد. در این رویکرد با تعیین ارزش گزینه‌ها بر حسب شاخص‌ها و ضرب اهمیت شاخص‌ها، امتیاز گزینه‌ها برآورد می‌شود که طی مراحل ذیل به انجام می‌رسد.

- تعیین واحدهای کاری

به‌منظور ایجاد قابلیت پهنه‌بندی به مدل‌های با رویکرد امتیازی لازم است قبل از همه چارچوب مناسبی به‌منظور 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, 2012). به این منظور ابتدا تپه‌ها 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 منطقه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS، واحدهای کاری بر مبنای لایه‌های اطلاعاتی مذکور شکل گرفت. در نقشه واحدهای کاری، دوازده واحدکاری برحسب اهداف مطالعاتی تفکیک شد (شکل ۳).



شکل ۳. واحدهای کاری منطقه خضراباد

– تعیین شاخص‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق نسبت به بیابان‌زایی

با مطالعه طیف وسیعی از شاخص‌های مطرح شده در مدل‌های اولیه پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی همانند مدل FAO-UNEP، MEDALUS، JCD، MICD و IMDPA (Zehtabian et al, 2014) شاخص‌ها به صورت ابتدایی مشخص شد. سپس با در نظر گرفتن سه محور اصلی ارتباط با پدیده بیابان‌زایی، سهولت دسترسی و سهولت به‌روزرسانی در چارچوب دو فاکتور هزینه و زمان اقدام به‌راستی آزمایی شاخص‌های اولیه در قالب مطالعات میدانی شد و در نهایت ۳۰ شاخص مؤثر در رخداد بیابان‌زایی منطقه مطالعاتی انتخاب شد. (Sadeghiravesh et al., 2021; Sadeghiravesh, 2020). به منظور کمی کردن، بی‌مقیاس کردن و هم جهت کردن ارزش‌ها، برای هر شاخص ارزش‌های کمی از صفر تا ۱ تعریف شد. ارزش صفر برای نواحی نمایشگر کمترین و ارزش ۱ بیشترین میزان پتانسیل بیابان‌زایی می‌باشد و ارزش‌های مابین آنها بیانگر بیابان‌زایی نسبی هستند (جدول ۱) (Sadeghiravesh, 2020).

جدول ۱. شاخص‌های مؤثر در رخداد بیابان‌زایی در منطقه مطالعاتی و ارزش دهی آنها در مقیاس واحد

شماره	شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی	۰-۰/۲۵	۰/۲۶-۰/۵۰	۰/۵۱-۰/۷۵	۰/۷۶-۱
۱	میانگین بارش سالانه (mm)	> ۳۰۰	۳۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۶۰	< ۶۰
۲	میانگین سرعت باد (m/s)	< ۳	۵-۳/۵	۵/۷-۵/۵	> ۷/۵
۳	شاخص خشکی (P/ET _p)	> ۰/۵	۰/۱-۲/۵	۰/۱-۰/۵/۲	< ۰/۱۰۵
۴	بافت خاک	L,S,CL,SL,LS,CL	SC,SiL,SiCL	Si,C,SiC	S
۵	شوری خاک EC- (mmhos/cm)	< ۴	۱۰-۴	۳۰-۱۰	> ۳۰
۶	زهکشی خاک (in/h)	> ۳	۱/۳-۵	۰/۱-۵/۵	< ۰/۵
۷	عمق خاک (cm)	> ۸۰	۸۰-۵۰	۵۰-۲۰	< ۲۰
۸	شیب (/)	< ۶	۱۸-۶	۳۵-۱۸	> ۳۵
۹	فرسایش (آب و باد)	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
۱۰	شوری آب-EC (μmhos/cm)	< ۵۰۰	۱۰۰۰-۵۰۰	۲۵۰۰-۱۰۰۰	> ۲۵۰۰
۱۱	عمق سطح آب زیرزمینی (cm)	> ۳۰۰	۳۰۰-۱۳۰	۱۳۰-۷۵	< ۷۵
۱۲	تراکم پوشش گیاهی (/)	> ۵۰	۵۰-۲۵	۲۵-۱۰	< ۱۰
۱۳	بوته‌کنی و قطع اشجار (/)	< ۱۰	۲۵-۱۰	۵۰-۲۵	> ۵۰
۱۴	ظرفیت برد مراتع (AU/100 day)	> ۱/۵	۰/۱-۷۵/۵	۰/۱-۲۵/۷۵	< ۰/۲۵
۱۵	فشار دام (ظرفیت مراتع/دام موجود)	< ۱/۵	۱/۵-۲	۳-۲	> ۳
۱۶	شخم و آیش	شخم و آیش مناسب	شخم و آیش نسبتاً مناسب	شخم نامناسب با آیش کمتر از ۶ ماه	شخم کاملاً نامناسب و بدون آیش
۱۷	روش آبیاری	کاملاً مناسب	مناسب ولی نیاز به اصلاحات دارد	نسبتاً مناسب ولی نیاز به کنترل و اصلاح دارد	نامناسب و نیاز به کنترل و اصلاح دارد
۱۸	کارایی آبیاری (/)	< ۳۰	۳۰-۵۰	۵۰-۸۰	> ۸۰

ادامه جدول ۱.

شماره	شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی	۰-۲۵	۰/۲۶-۰/۵۰	۰/۵۱-۰/۷۵	۰/۷۶-۱
۱۹	سیستم آبیاری	سیستم تحت فشار مدرن	سیستم تحت فشار کلاسیک	سیستم سنتی مدرنیزه شده	شیوه آبیاری سنتی بدون طراحی بهینه
۲۰	کاهش سطح آب زیرزمینی	<۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۳۰	> ۳۰
۲۱	رطوبت خاک	خاک همیشه مرطوب است	رطوبت خاک بیشتر از نقطه پژمردگی است	رطوبت خاک کمتر از نقطه پژمردگی است	سطح خاک خشک و رطوبت کمتر از نقطه پژمردگی
۲۲	استفاده از ماشین‌آلات، مواد شیمیایی و کود آلی	مناسب	نسبتاً مناسب	نامناسب	کاملاً نامناسب
۲۳	الگوی کشت و مدیریت تولید	باغات و گونه‌های دائمی بدون آیش، الگوی کشت منطبق با شرایط محیط	بیشتر از ۲۰٪ منطقه تحت کشت، الگوی کشت نسبتاً منطبق با شرایط محیط.	بیشتر از ۵۰٪ منطقه تحت کشت، الگوی کشت غیر منطبق با شرایط محیط.	بیشتر از ۸۰٪ منطقه تحت کشت، الگوی زراعی نامناسب.
۲۴	مشارکت مردمی	مشارکت کارشناسان و مردم منطقه مناسب بوده	عدم توجه یا کم‌توجهی مردم نسبت به کارهای کارشناسی	انجام کارهای کارشناسی بدون توجه به مردم	تضاد رابطه بین مردم و کارشناسان
۲۵	سواد (%)	>۷۵	۷۵-۵۰	۵۰-۲۵	<۲۵
۲۶	اشتغال (%)	>۶۰	۶۰-۳۰	۳۰-۱۰	<۱۰
۲۷	تراکم بیولوژیک جمعیت (N/km ²)	<۱۰۰	۳۵۰-۱۰۰	۶۰۰-۳۵۰	>۶۰۰
۲۸	تغییر کاربری اراضی	تغییر کاربری کم و با مدیریت صحیح اداره می‌شود	تغییر کاربری متوسط و با مدیریت نسبتاً صحیح اداره می‌شود	تغییر کاربری زیاد، و با مدیریت نامناسب اداره می‌شود	تغییر کاربری بی‌رویه، و بدون مدیریت می‌باشد.
۲۹	آگاهی از نتایج تخریب	کاملاً آگاه	نسبتاً آگاه	ناآگاه	کاملاً ناآگاه
۳۰	تقسیم اراضی به قطعات کوچک	تقسیم اراضی کم با توسعه زیاد تعاونی‌های زراعی	تقسیم اراضی متوسط با فعالیت متوسط تعاونی‌های زراعی	تقسیم اراضی زیاد با فعالیت کم تعاونی‌های زراعی	تقسیم اراضی بی‌رویه و عدم فعالیت تعاونی‌های زراعی

شاخص‌های اقلیمی بر مبنای قابلیت تحت‌تأثیر قراردادن آب قابل‌دسترس گیاهان در نظر گرفته شدند از جمله این شاخص‌ها می‌توان به بارش متوسط سالانه، سرعت باد، خشکی و غیره اشاره کرد. باتوجه‌به این موضوع که بارش معادل ۳۰۰ میلی‌متر به عنوان حد آستانه بحرانی در فرایند فرسایش خاک و رشد گیاهان به حساب می‌آید (Sepehr et al., 2007)، بر این مبنا شاخص میانگین بارش سالانه ارزیابی شد.

برآورد مؤثرترین پارامتر یعنی آب موجود در خاک در دسترس گیاه^۱ (که عبارت است از بارش منهای تبخیر و تعرق و رواناب) نیازمند اطلاعات نسبتاً زیادی از وضعیت خاک در حفظ رطوبت و رشد پوشش گیاهی است؛ بنابراین در این پژوهش از شاخص خشکی FAO استفاده شد. شاخص خشکی عبارت است از نسبت بارش سالانه به تبخیر و تعرق

پتانسیل سالانه (P/ET_p) (Sepehr et al., 2007; Greco et al., 2005).

بررسی وضعیت فرسایش بادی با استفاده از روش I.R.I.F.R¹ (Ahmadi, 2005; Ekhtesasi & Ahmadi, 1997;) صورت پذیرفت. در این روش ۹ پارامتر مؤثر در فرایند فرسایش بادی همچون سنگ‌شناسی، شکل اراضی و پستی‌وبلندی، سرعت و وضعیت باد، وضعیت خاک و پوشش سطح آن، نوع و درصد تاج‌پوشش گیاهی، رطوبت خاک، اشکال فرسایش سطح خاک، مدیریت اراضی و کاربری اراضی موردتوجه قرار گرفت. برای ارزیابی فرسایش آبی روش P.S.I.A.C² (Ahmadi, 2011) مورد استفاده قرار گرفت که در این روش چندین پارامتر از جمله سنگ‌شناسی، خاک، اقلیم، رواناب، مورفولوژی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی موردتوجه قرار گرفت. نتیجه آشکار چرای بیش از حد، افزایش فرسایش خاک است، به‌منظور برآورد این شاخص از واحد دامی (AU) استفاده شد. در این پژوهش واحد دامی بر مبنای نواحی اشغال شده به‌وسیله دام‌ها محاسبه شد (Moghadam, 2012).

– تعیین اهمیت هر شاخص در هر واحد کاری (بی بعد سازی اهمیت شاخص‌ها)

در ادامه با نظرخواهی گروهی و از روش دلفی، در چارچوب ماتریس داده‌ها (جدول ۲)، اهمیت بیابان‌زایی شاخص‌ها در واحدهای کاری، باتوجه‌به جدول امتیازدهی شاخص‌ها (جدول ۱) در مقیاس صفر الی یک، مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲. ارزش‌گذاری واحدهای کاری به تفکیک شاخص‌ها (Fi)

TMU _i	Indicator				
	I ₁	I ₂	I ₃	...	I _N
TMU ₁	r ₁₁	r ₁₂	r ₁₃	...	r _{1N}
TMU ₂	r ₂₁	r ₂₂	r ₂₃	...	r _{2N}
:	:	:	:	:	:
TMU _M	r _{M1}	r _{M2}	r _{M3}	...	r _{MN}

تعیین اهمیت شاخص‌ها نسبت به هم با استفاده از روش آنتروپی شانون

اولین بار مدل آنتروپی شانون توسط کلود ال وود شانون ارائه شد که برگرفته شده از تئوری اطلاعات^۳ می‌باشد (Shannon, 1948). آنتروپی یک سیستم، بیانگر بی‌نظمی سیستمی است (Bednarik et al., 2010) و در تئوری اطلاعات، بیانگر عدم اطمینان ارائه شده توسط یک توزیع احتمال گسسته (P_i) می‌باشد. در صورتی که توزیع فراوانی پخش باشد^۴، این عدم اطمینان بیشتر است نسبت به زمانی که توزیع احتمال تیزتر^۵ باشد (Soleimani & Zarepisheh, 2009; Asgharpour, 2017). مدل آنتروپی شانون عمدتاً به‌منظور رتبه‌بندی توسعه‌یافتگی در حوزه‌های مختلف علوم مورد استفاده قرار گرفته در این روش پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه در چارچوب مدل (جدول ۲)، ماتریس آنتروپی شکل گرفته و در چارچوب آن آنتروپی واحدهای کاری نسبت به شاخص‌ها از رابطه ۱ محاسبه شده و وارد ماتریس شد (جدول ۳).

$$E_{ij} = I_{ij} \times \ln r_{ij} \quad ; \quad \forall j \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه: E_{ij} = آنتروپی هر واحدکاری نسبت به هر شاخص، I_{ij} = مقدار وزنی نرمال هر واحدکاری نسبت به هر شاخص و $\ln r_{ij}$ = لگاریتم نپرین مقدار وزنی نرمال هر واحدکاری نسبت به هر شاخص می‌باشد.

1. Iran Research Institute of Forest and Rangelands
2. Pacific South-West Inter-Agency Committee
3. Information theory
4. Broad
5. Shannon

جدول ۳. ماتریس آنتروپی واحدهای کاری نسبت به شاخص‌ها

TMU _i	Indicator				
	I ₁	I ₂	I ₃	...	I _N
TMU ₁	E ₁₁	E ₁₂	E ₁₃	...	E _{1N}
TMU ₂	E ₂₁	E ₂₂	E ₂₃	...	E _{2N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TMU _M	E _{M1}	E _{M2}	E _{M3}	...	E _{MN}

در این جدول: TMU: واحد کاری، I: شاخص و E: آنتروپی هر شاخص در هر واحد کاری می باشد.

در ادامه آنتروپی معیارها (E_j) از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m \left(r_{ij} \times \ln r_{ij} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه: E_j = آنتروپی هر معیار، K = ضریب ثابت و K به عنوان مقدار ثابت از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$K = \frac{1}{\ln M} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه: K = ضریب ثابت، $\ln M$ = لگاریتم نپرین تعداد واحدهای کاری

در ادامه، درجه انحراف^۱ (d_j) از رابطه ۴ برآورد شد. این درجه بیانگر این است هر شاخص (j) چه میزان نقش در فرایند بیابان‌زایی دارد. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی شاخصی کمتر باشد، نشان دهنده‌ی آن است که واحدهای کاری رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. لذا نقش آن شاخص در فرایند بیابان‌زایی باید به همان اندازه کاهش یابد و بالعکس.

$$d_j = 1 - E_j \quad ; \forall j \quad \text{رابطه (۴)}$$

سپس مقدار اوزان شاخص‌ها از رابطه ۵ محاسبه گردید.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} ; \quad \forall j \quad \text{رابطه (۵)}$$

لازم به ذکر است که مجموع اوزان به دست آمده برای شاخص‌های مورد نظر تصمیم‌گیرنده باید برابر با یک باشد (رابطه ۶).

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \rightarrow (\forall j = 1, 2, \dots, n) \quad \text{رابطه (۶)}$$

به عبارت ساده‌تر بر مبنای این روش، شاخصی که بیشترین وزن را دارد بیشترین نقش در فرایند بیابان‌زایی را نیز دارد (Azar & Rajabzadeh, 2017; Shannon, 1948; Azar, 1999).

– تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه (NDM²)

در این مرحله مقادیر وزنی اولویت واحدهای کاری (Γ_{ij}) بر مبنای هر معیار و اهمیت معیارها نسبت به هم (W_j)، در قالب ماتریس کلی تصمیم‌گیری شکل گرفت (جدول ۴).

جدول ۴. ماتریس تصمیم‌گیری نرمالیزه (NDM)

TMU _i	Indicator				
	I ₁	I ₂	I ₃	...	I _N
	W ₁	W ₂	W ₃	...	W _N
TMU ₁	Γ ₁₁	Γ ₁₂	Γ ₁₃	...	Γ _{1N}
TMU ₂	Γ ₂₁	Γ ₂₂	Γ ₂₃	...	Γ _{2N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
TMU _M	Γ _{M1}	Γ _{M2}	Γ _{M3}	...	Γ _{MN}

در این ماتریس M = تعداد واحدهای کاری، N = تعداد شاخص‌ها I = عنوان شاخص و Γ_{ij} = مقدار وزنی نرمال که هر واحد کاری باتوجه به شاخص مربوطه کسب می‌کند، می‌باشد.

1. Degree of Diversification
2. Normalized Decision Matrix

– پهنه‌بندی با استفاده از مدل وی پی ام^۱ (WPM)

مدل ضرب موزون یا WPM، توسط بریگمن (۱۹۲۲) و میلر (۱۹۶۹) معرفی شده است. این روش معادل روش SAW است با این تفاوت که برای تشکیل ماتریس تصمیم بی بعد موزون، به جای ضرب کردن مطلوبیت گزینه‌ها در وزن هر شاخص، ارزش واحدهای کاری به‌ازای شاخص‌ها به توان وزن شاخص می‌رسند.

– تشکیل ماتریس تصمیم بی بعد موزون توانی (t_{ij})

در اینجا به‌منظور وزن دادن به مؤلفه‌های ماتریس تصمیم، ستون متناظر با هر شاخص در ماتریس تصمیم را به توان وزن آن شاخص می‌رسد (رابطه ۷).

$$t_{ij} = r_{ij}^{w_j} \quad \text{رابطه (۷)}$$

– برآورد امتیاز بیابان‌زایی گزینه‌ها (واحدهای کاری) (U_i)

مقادیر مطلوبیت توانی از حاصل ضرب سطری مؤلفه‌های ماتریس موزون توانی طی رابطه ۸ برآورد می‌گردد.

$$U_i = \prod_{j=1}^n t_{ij} \quad \text{رابطه (۸)}$$

پهنه‌بندی با استفاده از تکنیک واسپاس^۲ (WASPAS)

مدل واسپاس توسط زاواداسکاس و همکاران در سال ۲۰۱۲ ارائه شد این مدل ترکیبی از تکنیک‌های SAW و WPM است. بنابراین برای انتخاب گزینه بهینه از مدل ضرب وزن دار و جمع وزن دار استفاده می‌شود.

برآورد ماتریس موزون ضربی ($t_{ij}^{(1)}$)

از این‌رو مؤلفه‌های ماتریس تصمیم در وزن شاخص‌ها ضرب و ماتریس موزون ضربی، به دست می‌آید (رابطه ۹).

$$t_{ij}^{(1)} = r_{ij} \times W_j \quad \text{رابطه (۹)}$$

برآورد مقادیر مطلوبیت ضربی (U_i^1)

سپس مقادیر مطلوبیت ضربی از مجموع سطری مؤلفه‌های ماتریس موزون ضربی طی رابطه ۱۰ برآورد شد.

$$U_i^1 = \sum_{j=1}^n t_{ij}^{(1)} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

برآورد ماتریس موزون توانی ($t_{ij}^{(2)}$)

در ادامه مؤلفه‌های ماتریس موزون توانی ($t_{ij}^{(2)}$) را از به توان وزن شاخص‌ها رساندن مؤلفه‌های ماتریس تصمیم به دست آمد (رابطه ۱۱).

$$t_{ij}^{(2)} = r_{ij}^{w_j} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

برآورد مقادیر مطلوبیت توانی (U_i^2)

پس از برآورد ماتریس موزون توانی، مقادیر مطلوبیت توانی از حاصل ضرب سطری مؤلفه‌های ماتریس موزون توانی طی رابطه

1. Weighted Product Method(WPM)

2. Weighted Aggregate Sum Product ASsessment (WASPAS)

۱۲ برآورد شد.

$$U_i^2 = \prod_{j=1}^n t_{ij}^2 \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

برآورد مطلوبیت نهایی (پتانسیل بیابان‌زایی) واحدهای کاری (U_i)

در نهایت، مطلوبیت نهایی گزینه‌ها (U_i) یا به عبارتی پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری طی رابطه ۱۳، از میانگین مقادیر مطلوبیت ضربی و توانی حاصل شد.

$$U_i = \frac{1}{2} [U_i^1 + U_i^2] \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

تهیه نقشه پهنه‌بندی شدت

در انتها به منظور سهولت و دقت در تجزیه و تحلیل داده‌ها و دستیابی به نتایج، بر مبنای درجه مطلوبیت یا پتانسیل فرسایش واحدهای کاری حاصل از هر دو مدل امتیازی وی بی ام و واسپاس و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS9.3 اقدام به نقشه‌سازی میزان پتانسیل فرسایش شد.

نتایج

مطابق ادبیات تحقیق پس از تعیین شاخص‌های مؤثر در فرایند بیابان‌زایی و ارزش‌گذاری آنها در مقیاس واحد (جدول ۱) اقدام به ارزیابی واحدهای کاری به تفکیک شاخص‌ها با نظرخواهی از جامعه آماری ۲۸ نفری از کارشناسان آشنا به منطقه مطالعاتی در قالب مدل دلفی شد (جدول ۵).

جدول ۵. تعیین ارزش هر واحد کاری به تفکیک هر شاخص

شاخص (Ii) ◀ واحد کاری (TMU) ▼	بارش متوسط سالانه (mm)	میانگین سرعت باد	شاخص خشکی	تقسیم اراضی به قطعات کوچک
(BMG)	۰/۵	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۰۱
(MGPC)	۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۶۹	۰/۰۱
(BPPC)	۰/۶۹	۰/۴۸	۰/۷۵	۰/۰۱
.
(MAG)	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۶۸

سپس اوزان هر یک از شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون برآورد شد. زمانی که داده‌های یک ماتریس تصمیم‌گیری به طور کامل مشخص شده باشند، روش آنتروپی شانون برای ارزیابی اوزان مناسب‌تر است (Asgarpour, 2017) با این روش اهمیت نسبی شاخص‌های بیابان‌زایی با کمک داده‌های حاضر مطابق جدول ۶ به دست آمد.

جدول ۶. وزن نسبی یا اهمیت شاخص‌های مؤثر در رخداد بیابان‌زایی منطقه خضرآباد

شماره	شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی	E_j	d_j	W_j
۱	میانگین بارش سالانه (mm)	۱/۱۳۰۰۴۹	-۰/۱۳۰۰۴۹	-۰/۰۲۱۲۵
۲	میانگین سرعت باد (m/s)	۱/۷۰۱۳۳۳۸	-۰/۷۰۱۳۳۳۸	-۰/۱۱۴۶۱
۳	شاخص خشکی (P/ETp)	۰/۵۴۹۳۳۳	۰/۴۵۰۶۶۷	۰/۰۷۳۶۴۶
۴	بافت خاک	۱/۴۴۴۷۳۷	-۰/۴۴۴۷۳۷	-۰/۰۷۲۶۸
۵	شوری خاک (EC-mmhos/cm)	۱/۴۰۴۸۲۷	-۰/۴۰۴۸۳	-۰/۰۶۶۱۶
۶	زهکشی خاک (in/h)	۱/۶۳۵۶۸۹	-۰/۶۳۵۶۹	-۰/۱۰۳۸۸
۷	عمق خاک (cm)	۰/۳۶۵۰۴۹	۰/۶۳۴۹۵۱	۰/۱۰۳۷۶۱
۸	شیب (/)	۱/۱۸۵۷۹۴	-۰/۱۸۵۷۹	-۰/۰۳۰۳۶
۹	فرسایش (آب و باد)	۱/۰۱۲۹۵۸	-۰/۰۱۲۹۶	-۰/۰۰۲۱۲

ادامه جدول ۶.

شماره	شاخص‌های مؤثر در بیابان‌زایی	E_j	d_j	W_j
۱۰	شوری آب (EC- $\mu\text{mohs/cm}$)	۱/۱۹۴۳۹۹	-۰/۱۹۴۴	-۰/۰۳۱۷۷
۱۱	عمق سطح آب زیرزمینی (cm)	۰/۲۲۲۳۹۱	۰/۷۷۷۶۰۹	۰/۱۲۷۰۷۴
۱۲	تراکم پوشش گیاهی (/)	۰/۸۲۵۸۶۷	۰/۱۷۴۱۳۳	۰/۰۲۸۴۵۶
۱۳	بوته‌کنی و قطع اشجار (/)	۱/۱۳۷۵۸۲	-۰/۱۳۷۵۸	-۰/۰۲۲۴۸
۱۴	ظرفیت برد مراتع (AU/100 day)	۰/۴۶۶۲۸	-۰/۵۳۳۷۲	۰/۰۸۷۲۱۹
۱۵	فشار دام (ظرفیت مراتع/دام موجود)	۰/۵۱۶۱۰۵	۰/۴۸۳۸۹۵	۰/۰۷۹۰۷۶
۱۶	شخم و آیش	۰/۴۲۶۹۵۲	۰/۵۷۳۰۴۸	۰/۰۹۳۶۴۵
۱۷	روش آبیاری	۰/۳۵۸۰۵۸	۰/۶۴۱۹۴۲	۰/۱۰۴۹۰۴
۱۸	کارایی آبیاری (/)	۰/۴۰۱۰۹۶	۰/۵۹۸۹۰۴	۰/۰۹۷۸۷۱
۱۹	سیستم آبیاری	۰/۳۳۴۵۵۹	۰/۶۶۵۴۴۱	۰/۱۰۸۷۴۴
۲۰	کاهش سطح آب زیرزمینی	۱/۴۰۵۳۰۱	-۰/۴۰۵۳	-۰/۰۶۶۲۳
۲۱	رطوبت خاک	۱/۳۲۸۳۸۵	-۰/۳۲۸۳۸	-۰/۰۵۳۶۶
۲۲	استفاده از ماشین‌آلات، مواد شیمیایی و کود آلی	۰/۴۱۷۲۸۳	۰/۵۸۲۷۱۷	۰/۰۹۵۲۲۶
۲۳	الگوی کشت و مدیریت تولید	۰/۴۴۹۸۹۹	۰/۵۵۰۱۰۱	۰/۰۸۹۸۹۶
۲۴	مشارکت مردمی	۰/۵۲۳۳۱۵	۰/۴۷۶۶۸۵	۰/۰۷۷۸۹۸
۲۵	سواد (/)	۰/۵۹۱۹۷	۰/۴۰۸۰۳	۰/۰۶۶۶۷۹
۲۶	اشتغال (/)	۰/۶۰۱۲۱۹	۰/۳۹۸۷۸۱	۰/۰۶۵۱۶۷
۲۷	تراکم بیولوژیک جمعیت (N/km^2)	۰/۴۵۶۲۷۸	۰/۵۴۳۷۲۲	۰/۰۸۸۸۵۳
۲۸	تغییر کاربری اراضی	۰/۷۶۳۱۹۶	۰/۲۳۶۸۰۴	۰/۰۳۸۶۹۸
۲۹	آگاهی از نتایج تخریب	۰/۶۰۰۴۱۷	۰/۳۹۹۵۸۳	۰/۰۶۵۲۹۸
۳۰	تقسیم اراضی به قطعات کوچک	۰/۴۳۰۳۳۵	۰/۵۶۹۶۶۵	۰/۰۹۳۰۹۳

در این مرحله با استفاده از داده‌های ماتریس ارزش‌گذاری شاخص‌ها در واحدهای کاری (جدول ۵) و اوزان شاخص‌ها (جدول ۶) ماتریس تصمیم شکل گرفت (جدول ۷).

جدول ۷. ماتریس تصمیم‌گیری پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری

شاخص (I _i)	بارندگی متوسط سالانه (mm)	میانگین سرعت باد	شاخص خشکی	تقسیم اراضی به قطعات کوچک
◀ (I ₁)	-۰/۰۲۱۲۵	-۰/۱۱۴۶۱	۰/۰۷۳۶۴۶	۰/۰۹۳۰۹۳
▼ (TMU)				
(BMG)	۰/۵	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۰۱
(MGPC)	۰/۶۶	۰/۴۸	۰/۶۹	۰/۰۱
(BPPC)	۰/۶۹	۰/۴۸	۰/۷۵	۰/۰۱
.
(MAG)	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۶۲	۰/۶۸

پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری (جدول ۷)، به منظور تشکیل ماتریس تصمیم بی بعد موزون توانی (T_{ij}) از رابطه ۷ ارزش هر شاخص در هر واحد کاری از لحاظ بیابان‌زایی (F_{ij}) (جدول ۲) را به توان ضرب اهمیت نسبی آن شاخص (W_j) (جدول ۶) رساندیم و ماتریس تصمیم‌گیری موزون توانی شکل گرفت (جدول ۸).

جدول ۸. ماتریس تصمیم‌گیری موزون توانی پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری

شاخص (I _i)	بارندگی متوسط سالانه (mm)	میانگین سرعت باد	شاخص خشکی	تقسیم اراضی به قطعات کوچک
◀ (I ₁)	۱/۰۱۴۸۴	۱/۰۸۷۷۶	۰/۹۶۵۴۱	۰/۶۵۱۳۵
▼ (TMU)				
(BMG)	۱/۰۸۸۷	۱/۰۸۷۷۶	۰/۹۷۳۰۴	۰/۶۵۱۳۵
(MGPC)	۱/۰۰۷۹۲	۱/۰۸۷۷۶	۰/۹۷۹۰۳	۰/۶۵۱۳۵
(BPPC)
(MAG)	۱/۰۱۲۴۰	۱/۰۸۷۷۶	۰/۹۶۵۴۱	۰/۹۶۴۷۳

در ادامه بر طبق مدل WPS، مطلوبیت نهایی توانی (U_i^2) یا به عبارتی شدت بیابان‌زایی، از حاصل ضرب سطرهای مؤلفه‌های ارزش‌های موزون حاصل شده (جدول ۸) و بر مبنای رابطه ۸ به تفکیک هر واحد کاری محاسبه شد. به‌منظور محاسبه پتانسیل شدت بیابان‌زایی بر طبق مدل WASPAS، مطابق ادبیات تحقیق در ابتدا پس از برآورد مطلوبیت نهایی توانی (U_i^2) حاصل از ماتریس تصمیم‌گیری موزون توانی (جدول ۸)، ماتریس موزون ضربی از حاصل‌ضرب مؤلفه‌های ماتریس تصمیم در وزن شاخص‌ها طی رابطه ۹ برآورد شد (جدول ۹) و مقادیر مطلوبیت ضربی (U_i^1) از مجموع سطرهای مؤلفه‌های ماتریس موزون ضربی طی رابطه ۱۰ به دست آمد.

جدول ۹. ماتریس تصمیم‌گیری موزون ضربی پتانسیل بیابان‌زایی واحدهای کاری

شاخص (Ii) ◀ واحد کاری (TMU) ▼	بارش متوسط سالانه (mm)	میانگین سرعت باد	شاخص خشکی	تقسیم اراضی به قطعات کوچک	U_i^1	U_i^2
(BMG)	-۰/۰۱۰۶۳	-۰/۰۵۵۰۱	۰/۰۴۵۶۶	۰/۰۰۰۹۳	۰/۱۳۰۹۳	۰/۰۶۹۴۶
(MGPC)	-۰/۰۱۴۰۳	-۰/۰۵۵۰۱	۰/۰۵۰۸۲	۰/۰۰۰۹۳	۰/۰۸۲۱۳	۰/۰۴۴۴۳
(BPPC)	-۰/۰۱۴۶۶	-۰/۰۵۵۰۱	۰/۰۵۵۲۴	۰/۰۰۰۹۳	۰/۰۴۳۹۷	۰/۰۲۵۱۲
(MAG)	-۰/۰۱۱۹	-۰/۰۵۵۰۱	۰/۰۴۵۶۶	۰/۰۶۳۳۳	۰/۰۶۳۳۰	۰/۴۶۷۹

در نهایت مطلوبیت نهایی (U_i) یا به عبارتی پتانسیل نهایی شدت بیابان‌زایی مطابق رابطه ۱۳، از میانگین مقادیر مطلوبیت ضربی و توانی حاصل شد (جدول ۹).

در ادامه به‌منظور رتبه‌بندی واحدهای کاری از دیدگاه پتانسیل فرسایش و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش منطقه مطالعاتی، از آنجا که ارزش‌های پتانسیل فرسایش برآورد شده، یک‌سری از ارزش‌های پیوسته هستند که به‌منظور سهولت در خواندن و فهمیدن نتایج برآورد شده و نشان‌دادن تفاوت‌های ناحیه‌ای می‌بایستی در سطوح مناسبی طبقه‌بندی شوند. بر مبنای جداول ۱۰ و ۱۱، استعداد اراضی جهت بیابان‌زایی از دیدگاه دو مدل وی پی ام و واسپاس در منطقه مطالعاتی در هفت سطح، طبقه‌بندی شدند.

جدول ۱۰. طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش اراضی در منطقه خضرآباد به روش وی پی ام

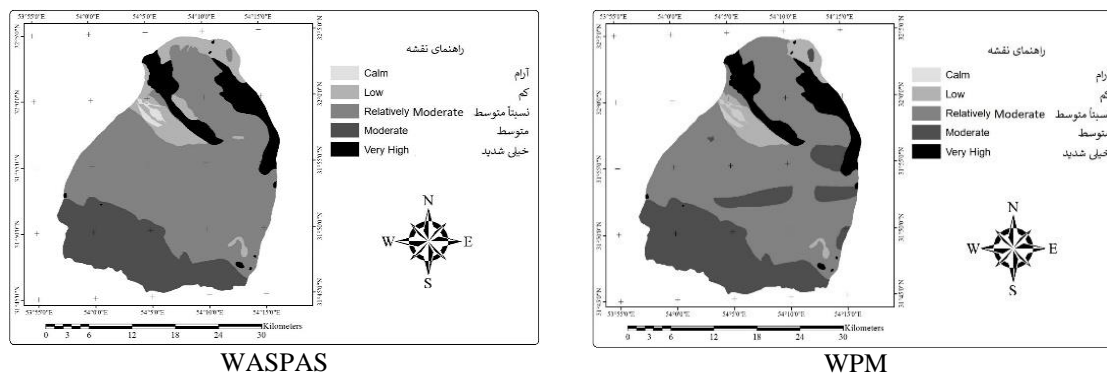
سطح ارزیابی	شاخص WPM	کلاس	مساحت (ha)	درصد (%)
آرام (ناچیز)	$N_i \leq ۰/۰۰۲۵$	I	۶۱۹/۱۳	۰/۷۹
کم	$۰/۰۰۲۵ < N_i \leq ۰/۰۰۴۵$	II	۴۱۵۲/۶۸	۵/۲۹
نسبتاً متوسط	$۰/۰۰۴۵ < N_i \leq ۰/۰۰۶۵$	III	۴۳۹۹۴/۴۵	۵۶/۰۵
متوسط	$۰/۰۰۶۵ < N_i \leq ۰/۰۰۸۵$	IV	۲۲۳۸۶	۲۸/۵۲
نسبتاً شدید	$۰/۰۰۸۵ < N_i \leq ۰/۰۱۰۵$	V	-	-
شدید	$۰/۰۱۰۵ < N_i \leq ۰/۰۱۲۵$	VI	-	-
خیلی شدید	$N_i > ۰/۰۱۲۵$	VII	۷۳۳۵/۸۶	۹/۳۵

جدول ۱۱. طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش اراضی در منطقه خضرآباد به روش واسپاس

سطح ارزیابی	شاخص WASPAS	کلاس	مساحت (ha)	درصد (%)
آرام (ناچیز)	$N_i \leq -۰/۰۷$	I	۶۱۹/۱۳	۰/۷۹
کم	$-۰/۰۷ < N_i \leq -۰/۰۲$	II	۶۳۷۲/۱۷	۸/۱۲
نسبتاً متوسط	$-۰/۰۲ < N_i \leq ۰/۰۳$	III	۴۶۸۹۴/۶۶	۵۹/۷۵
متوسط	$۰/۰۳ < N_i \leq ۰/۰۸$	IV	۱۷۲۶۶/۳۱	۲۲
نسبتاً شدید	$۰/۰۸ < N_i \leq ۰/۱۱$	V	-	-
شدید	$۰/۱۱ < N_i \leq ۰/۱۴$	VI	-	-
خیلی شدید	$N_i > ۰/۱۴$	VII	۷۳۳۵/۸۶	۹/۳۵

مطابق جداول ۱۰ و ۱۱، هر واحدکاری با توجه به پتانسیل فرسایشی برآورد شده در یکی از طبقات هفتگانه گانه 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 اراضی بر مبنای مدل وی پی ام (شکل ۳) و واسپاس (شکل ۴)، به مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ در محیط ArcGIS به دست آمد.



شکل ۳. پتانسیل شدت بیابان‌زایی بر اساس مدل وی پی ام و واسپاس

بحث

در این مطالعه با توجه به جداول طبقه‌بندی (جداول ۱۰ و ۱۱) و نقشه‌های استعداد اراضی حاصل از دو مدل وی پی ام و واسپاس (شکل ۳) ملاحظه می‌شود که در هر دو مدل، واحد اراضی کشاورزی کوهستانی (MAG) و اراضی کشاورزی دشتی (PAG)، با بیشترین ارزش‌های کمی به ترتیب در کلاس خیلی شدید یا VII قرار گرفتند که واجد بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی می‌باشند و ۷۳۳۵/۷۶ هکتار (۹/۳۵٪) از کل منطقه مطالعاتی را در بر گرفته‌اند. همچنین منطقه مطالعاتی عاری از بیابان‌زایی شدید (VI) و نسبتاً شدید (V) می‌باشد. نتایج حاصل از مدل وی پی ام نشان می‌دهد، ۲۲۳۸۶ هکتار (۲۸/۵٪) از اراضی منطقه در کلاس IV یا متوسط، ۴۳۹۹۴/۴۵ هکتار (۵۶/۱٪) در کلاس III یا نسبتاً متوسط، ۴۱۵۲/۶۸ هکتار (۵/۲۹٪) در کلاس II یا کم و ۶۱۹/۱۳ هکتار (۰/۸٪) در کلاس I یا بیابان‌زایی آرام قرار دارد (جدول ۱۰ و شکل ۳). در این رابطه هر چند ضریب همبستگی مابین نتایج حاصل از مدل وی پی ام، با نتایج حاصل از مدل واسپاس در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است، در عین حال طبقات شدت برآورد شده متفاوت است به طوری که در مطالعه تطبیقی نتایج مدل واسپاس، ۱۷۲۶۶/۳۱ هکتار (۲۲٪) در کلاس IV یا متوسط، ۴۶۸۹۴/۶۶ هکتار (۵۹/۷۵٪) در کلاس III یا نسبتاً متوسط، ۶۳۷۲/۱۷ هکتار (۸/۱۲٪) در کلاس II یا کم و ۶۱۹/۱۳ هکتار (۰/۷۹٪) در کلاس I یا بیابان‌زایی آرام طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۱۱ و شکل ۳).

به طور کلی، بر اساس لایه نهایی حاصل شده از هر دو مدل وی پی ام و واسپاس، ۹/۳۴ درصد از مساحت منطقه مطالعاتی در معرض خطر خیلی شدید بیابان‌زایی قرار دارد، بیشترین اراضی منطقه به ترتیب مدل‌ها، معادل ۵۶/۰۵ و ۵۹/۷۵ درصد تحت تاثیر بیابان‌زایی نسبتاً متوسط قرار دارد که شامل اراضی تپه‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی (SDPC)، اراضی رسی با پوشش گیاهی (CGPC)، اراضی صنعتی (IA)، اراضی دشت سر لخت با پوشش گیاهی (BPPC) و اراضی دشت سر آپانداز با پوشش گیاهی (EPPC) می‌باشند و در عین حال، ارزش کمی پتانسیل بیابان‌زایی برای کل منطقه از مجموع شاخص‌ها، کلاس متوسط یا IV به دست آمد.

عوامل طبیعی و انسانی متنوعی در رخداد فرسایش بیابان‌زایی در این واحدها مؤثرند. عوامل مؤثر در رخداد بیابان‌زایی در واحدهای اراضی کشاورزی که مطابق نتایج حاصله دارای بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی هستند عمدتاً عوامل انسانی حاصل از فعالیت کشاورزی هستند. این عوامل باعث خرد شدن خاکدانه‌ها و بدون پوشش ماندن سطح خاک می‌شوند و خاک این مناطق را مستعد فرسایش می‌کنند. از جمله این عوامل می‌توان به روش‌ها و سیستم‌های نامناسب آبیاری، افت سفره، راندمان پایین آبیاری، شخم و آیش نامناسب، الگوی نامناسب کشت و مدیریت غلط تولید، تغییر نامناسب کاربری اراضی، استفاده نامناسب از ماشین‌آلات و مواد شیمیایی اشاره کرد که به منظور کنترل و کاهش بیابان‌زایی، راهکارهایی از جمله

احداث بادشکن، جلوگیری از تغییر نامناسب کاربری اراضی، روش کشت مناسب همانند کشت محصولات کم‌آب خواه بافاصله کم و عمود بر جهت باد، کاهش چرای دام، تناوب زراعی مناسب و غیره توصیه می‌شود.

به دلیل یکسان بودن منطقه مطالعاتی که امکان مقایسه تطبیقی بین نتایج را فراهم می‌نماید، نتایج حاصل از ارزیابی پهنه‌بندی بیابان‌زایی حاصل از مدل‌های ارزیابی وی پی ام و واسپاس با نتایج حاصل از مدل‌های ارزیابی به انجام رسیده در منطقه از جمله، مدل تاکسونومی عددی توسعه‌یافته (Sadeghiravesh et al, 2009) (MNT)، مدل آسیب‌پذیری زیست‌محیطی (Sadeghiravesh et al, 2012)، مدل آنتروپی شانون (Sadeghiravesh, 2014)، مدل تحلیل مولفه‌های اصلی (Sadeghiravesh, 2016)، مدل مطلوبیت چند شاخصه (Sadeghiravesh, 2020)، مدل فازی بونیسون (Sadeghiravesh & Khosravi, 2022) و مدل تاپسیس فازی (Sadeghiravesh et al., 2021)، مورد مقایسه قرار گرفت و مشاهده شد که تا حد زیادی نتایج حاصل با هم همخوانی دارند به این معنی که در هر شش مدل، واحدهای اراضی کشاورزی دشتی (PAG) و اراضی کشاورزی کوهستانی (MAG)، واجد بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی می‌باشند. همچنین ضریب همبستگی نتایج حاصل از این مدل‌ها با مدل آنتروپی شانون^۱، مطلوبیت چند شاخصه و مدل فازی بونیسون در سطح ۹۹٪ و در مقایسه با نتایج مدل آسیب‌پذیری زیست‌محیطی (EVI) در سطح ۹۵٪ معنی‌دار است و همچنین در مقایسه با ضرایب شدت بیابان‌زایی منتج از مدل‌های تاکسونومی عددی توسعه‌یافته (MNT)، مدل تحلیلی مولفه‌های اصلی و مدل تاپسیس فازی همبستگی ضعیفی را نشان می‌دهند.

علی‌رغم یکسان بودن نوع و تعداد شاخص‌های موثر در بیابان‌زایی و ارزش‌دهی شاخص‌ها در مقیاس واحد و ارزش‌گذاری یکسان واحدها بر مبنای شاخص‌ها در مطالعات انجام شده در منطقه خضرآباد، ارزش‌های عددی به‌دست آمده با هم اختلاف دارند، این امر عمدتاً مربوط به ماهیت مدل‌ها و ساختار روش‌هاست که ارزش‌های کمی را در طیف‌های مختلف ارائه می‌کنند 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، می‌باشند. لذا لازم است توابعی ارائه شود که بر مبنای منطق و اصول قوی و مبنای 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 به‌منظور 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.

نتیجه‌گیری

ارزیابی خطر بیابان‌زایی امروزه نقش مهمی را در مدیریت پایدار منابع طبیعی ایفا می‌کند. از این‌رو، به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر بیابان‌زایی در دشت خضرآباد یزد از مدل امتیازی وی پی ام و واسپاس استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت‌گرفته نشان داد که واحدهای اراضی کشاورزی کوهستانی (MAG) و اراضی کشاورزی دشتی (PAG)، واجد بیشترین پتانسیل بیابان‌زایی می‌باشند. بیشترین اراضی منطقه، تحت تاثیر بیابان‌زایی نسبتاً متوسط (III) قرار دارد و در عین حال، ارزش کمی پتانسیل بیابان‌زایی برای کل منطقه از مجموع شاخص‌ها، کلاس متوسط یا IV به دست آمد.

باتوجه به تحلیل صورت‌گرفته و نتایج حاصل شده، می‌توان گفت که رویکرد امتیازی در ارزیابی شدت بیابان‌زایی و تهیه نقشه پهنه‌بندی باتوجه 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 با نظرخواهی گروهی در چارچوب جدول امتیازدهی یکسان، روش وزن‌دهی شاخص‌ها نسبت به هم از روش آنتروپی شانون و استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی، روش سریع و نسبتاً دقیقی در ارزیابی شدت بیابان‌زایی است و می‌تواند در ارزیابی‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد و در صورت لزوم با انتخاب شاخص‌های بومی، انعطاف‌پذیری لازم را داشته باشد. از این‌رو پیشنهاد می‌شود که در

طرح‌های کنترل و کاهش فرسایش و تخریب اراضی، با اهتمام به تحلیل‌های صورت‌گرفته، به‌سرعت این اوضاع نابسامان بهبود یافته و ساختاری پایدار در فرایند مقابله با فرسایش پی‌ریزی شود تا ضمن جلوگیری از هدررفت سرمایه‌های محدود، میزان موفقیت اجرای طرح‌های مدیریت فرسایش بالا رود.

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

منابع

- آذر، عادل (۱۳۸۰). بسط و توسعه روش آنترپوی‌شانون برای پردازش داده‌ها در تحلیل محتوی. *فصلنامه علوم انسانی دانشگاه الزهرا (س)*، ۳۷ و ۳۸، ۱-۱۸. <https://ensani.ir/file/download/article/20120426185640-5200-168.pdf>
- آذر، عادل و فرجی، حجت (۱۳۹۵). *علم مدیریت فازی*. تهران: انتشارات مهربان.
- آذر، عادل و رجب‌زاده، علی (۱۳۹۶). *تصمیم‌گیری کاربردی رویکرد (MADM)*، تهران: نشر نگاه دانش.
- ابریشم، الهام السادات (۱۳۸۲). *ارزیابی و نقشه‌سازی شرایط بیابان‌زایی در فخرآباد مهریز با استفاده از مدل‌های FAO-UNEP و MICD*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد بیابان‌دایی، دانشگاه تهران.
- احمدی، حسن (۱۳۹۰). *ژئومرفولوژی کاربردی، فرسایش آبی*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- احمدی، حسن (۱۳۹۱). *ژئومرفولوژی کاربردی، بیابان- فرسایش بادی*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- احمدی، حسن؛ زهتابیان، غلام‌رضا؛ جعفری، محمد؛ آذرنیوند، حسین؛ فیض‌نیا، سادات (۱۳۸۵). *مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی، گروه احیاء مناطق خشک، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران*.
- اختصاصی، محمدرضا؛ احمدی، حسن (۱۳۷۶). *روش تجربی برآورد رسوب فرسایش بادی. مجله منابع طبیعی ایران*. ۵۱، ۲۵-۱۳. <https://sid.ir/paper/425077/fa>
- اختصاصی، محمدرضا؛ مهاجری، سعید (۱۳۷۴). *طبقه‌بندی نوع و شدت بیابان‌زایی در ایران (ICD)*. در مجموعه مقالات دومین همایش بررسی مسائل مناطق بیابانی، کرمان، ۳۵-۵۲.
- اصغری‌پور، محمدجواد (۱۳۹۶). *تصمیم‌گیری چند معیاره*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- اصغری‌زاده، عزت‌الله و محمدی بالائی، عبدالکریم (۱۴۰۰). *تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- بخشنده مهر، لیلا (۱۳۸۷). *ارزیابی کمی وضعیت فعلی بیابان‌زایی در شرق اصفهان و ارائه یک مدل منطقه‌ای با تکیه بر روش مدالوس*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد بیابان‌دایی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- پهلوان‌نوری، احمد؛ مقدم‌نیا، علیرضا؛ هاشمی، زهره؛ جوادی، محمدرضا؛ میری، عباس (۱۳۹۱). *ارزیابی شدت بیابان‌زایی با معیار فرسایش بادی با استفاده از مدل‌های FAO-UNEP و MICD در منطقه زهک سیستان، تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۹ (۴)، ۶۲۴-۶۳۹. doi: <http://dx.doi.org/10.22092/ijrdr.2013.3040>
- دهقانی بیدگلی، رضا؛ کوهبنانی، حمیدرضا؛ یزدانی، محمدرضا؛ دشتی امیرآباد، جمال (۱۳۹۷). *ارزیابی خطر تخریب سرزمین و شدت بیابان‌زایی با استفاده از روش فازی (مطالعه موردی: منطقه میاندهی استان خراسان رضوی)*. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۵ (۴)، ۸۷۷-۸۸۷. doi: [10.22092/ijrdr.2019.118620](https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.118620)
- زهتابیان، غلامرضا؛ احمدی، حسن؛ اختصاصی، محمدرضا؛ جعفری، رضا (۱۳۸۱). *تعیین شدت فرسایش بادی در منطقه کاشان با استفاده از مدل بیابان‌زایی*. *مجله منابع طبیعی ایران*، ۵۵ (۲)، ۱۴۵-۱۵۷. https://ijnr.ut.ac.ir/article_17300.html
- زهتابیان، غلامرضا؛ خسروی، حسن و مسعودی، ریحانه (۱۳۹۳). *مدل‌های ارزیابی بیابان‌زایی (معیارها و شاخص‌ها)*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- سیلاخوری، اسماعیل؛ اوق، مجید؛ سلیمانی ساردو، مجتبی (۱۳۹۸). *ارزیابی خطر و ریسک بیابان‌زایی با استفاده از روش TOPSIS-GIS (مطالعه موردی: منطقه باشتین سبزوار-خراسان رضوی)*. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۰ (۳۵)، ۴۴-۵۹. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161488.html
- صادقی‌روش، محمدحسن (۱۳۹۳). *پهنه‌بندی پتانسیل خطر بیابان‌زایی با استفاده از رویکرد MADM و مدل آنترپوی‌شانون*. مطالعه موردی: منطقه خضراآباد یزد. *پژوهش‌های خاک*، ۲۸ (۳)، ۵۵۷-۵۷۲. doi: [10.22092/IJSR.2014.100024](https://doi.org/10.22092/IJSR.2014.100024)
- صادقی‌روش، محمدحسن (۱۳۹۵). *پهنه‌بندی پتانسیل خطر بیابان‌زایی با کاربرد مدل تحلیل مولفه‌های اصلی، در منطقه خضراآباد یزد*.

- فضای جغرافیایی، ۱۶ (۵۶)، ۲۴۱-۲۶۱. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-729-fa.pdf>
- صادقی‌روش، محمدحسن (۱۳۹۸). پهنه‌بندی پتانسیل خطر بیابان‌زایی با استفاده از مدل مطلوبیت چند شاخصه. پژوهش‌های محیط زیست، ۱۰ (۲۰)، ۱۹۴-۱۷۷. https://www.iraneiap.ir/article_108559.html
- صادقی‌روش، محمدحسن (الف-۱۴۰۱). کاربرد تکنیک مدلسازی ساختاری تفسیری (ISM) در تحلیل موانع مقابله با بیابان‌زایی (با رویکرد آسیب شناسی در استان یزد). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۳ (۲۵)، ۱۱۹-۱۳۲. doi: 10.52547/jwmr.13.25.119
- صادقی‌روش، محمدحسن (ب-۱۴۰۱). تحلیل حساسیت راهبردهای مقابله با بیابان‌زایی در محیط فازی در زیر حوضه آبخیز یزد- خضرباد (شهرستان صدوق). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۳ (۲۶)، ۲۰۳-۲۱۴. doi: <http://dx.doi.org/10.52547/jwmr.13.26.203>
- صادقی‌روش، محمدحسن؛ احمدی، حسن (۱۳۹۳). پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی با استفاده از مدل تاکسونومی توسعه یافته، مطالعه موردی منطقه ابوزید آباد کاشان. فضای جغرافیایی، ۱۴ (۴۷)، ۸۳-۹۹. <http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-99-83> 1274-fa.html
- صادقی‌روش، محمدحسن؛ خسروی، حسن (۱۴۰۱). ارزیابی خطر بیابان‌زایی با استفاده از منطق تاپسیس فازی در محیط GIS. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۴ (۳)، ۲۲۱-۲۲۹. doi: 10.30495/jest.2022.64138.5554
- صادقی‌روش، محمدحسن؛ زهتابیان، غلامرضا؛ طهمورث، محمد (۱۳۹۱). ارزیابی آسیب‌پذیری زیست محیطی نسبت به خطر بیابان‌زایی مطالعه موردی منطقه خضرباد یزد. پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۹۶ (۱)، ۷۵-۸۷. magiran.com/p1075685
- قره‌چلو، سعید؛ اختصاصی، محمدرضا؛ زارعیان جهرمی، مجتبی؛ صمدی، محمد باقر (۱۳۸۹). ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی با استفاده از مدل I. C. D (مطالعه موردی: منطقه خضرباد- همت‌آباد یزد). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۷ (۳)، ۴۰۲-۴۲۰. https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_102934_6cfa67e0e102171340470f1e0beff691.pdf
- کوهبنانی، حمیدرضا؛ دشتی امیرآباد، جمال؛ نیکو، شیماء؛ علی، تایا (۱۳۹۶). پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی با استفاده از رویکرد منطق فازی (مطالعه موردی: دیهوک طبس). پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۷ (۱)، ۳۵-۴۹. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-322-fa.pdf>
- مقدم، محمدرضا (۱۳۹۱). مرتع و مرتعداری، تهران: دانشگاه تهران.

References

- Abrisham, E. (2004). *Evaluation and mapping of desertification conditions in the Fakhrrabad-Mehriz region using with the FAO-UNEP and MICD models*. (M.S.Thesis), University of Tehran. Tehran, Iran (In Persian).
- Ahmadi, H. (2011). *Applied Geomorphology, Water Erosion*, Tehran, Iran: University of Tehran (In Persian).
- Ahmadi, H. (2012). *Applied Geomorphology, Desert-Wind Erosion*, Tehran, Iran: University of Tehran (In Persian).
- Ahmadi, H., Abrisham, E., Ekhtesasi, M. R., Jafari, M., & Gokarian, A. (2005). Evaluation and mapping of desertification condition in FAKHRABAD-MEHRIZ region with the ICD and MICD models, *DESERT*, 10(1-1), 37-50. doi:10.22059/JDESERT.2005.31880
- Ahmadi, H., Zehtabian, G. H., Jafari, M., & Azarnivand, H. (2006). *Iranian model of potential desertification assessment*. Tehran, Iran: University of Tehran (In Persian).
- Asgharizadeh, E., & Mohammadi Balani, A. (2021). *Multi-attribute decision making techniques*. Tehran, Iran: University of Tehran. (In Persian)
- Asgharpour, M. J. (2017). *Multi-Criteria Decision Making*. Tehran, Iran: University of Tehran (In Persian).
- Azar, A. (1999). Development of Shannon Entropy method for data processing in content analysis. *Alzahra University Journal of Science*, 37-38, 1-18, <https://ensani.ir/file/download/article/20120426185640-5200-168.pdf> (In Persian).
- Azar, A., & Faraji, H. (2016). *Science of fuzzy management*. Tehran, Iran: Mehraban press (In Persian).
- Azar, A., & Rajabzadeh, A. (2017). *Applied Decision Making with an Approach of Multi-Attribute*

- Decision Making (MADM)*. Tehran, Iran: Publication of Negah Danesh (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 Thesis), University of Isfahan.
- Bednarik, M., Magulova, B., Matys, M., & Marschalko, M. (2010). Landslide susceptibility assessment of the Kralupy-Liptovský Mikuláš railway Case Study. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(3-5), 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.002>
- Bidgoli, R. D., Koohbanani, H., Yazdani, M., & 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. doi: 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>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S. & Von Maltitz, G., (2018). *World Atlas of Desertification: Rethinking Land Degradation and Sustainable Land Management*. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- Ekhtesasi, M. R. & Ahmadi, H. (1997). The Experimental Method to Estimate the Wind Erosion Sediment, *Iranian Journal of Natural Resources*. 51: 13-25 (In Persian).
- Ekhtesasi, M. R., & 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). *Mediterranean Desertification and Land Use (MEDALUS)*. London: MEDALUS office.
- FAO/UNEP. (1984). *Provisional Methodology for Assessment and Mapping of Desertification, Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Rome: United Nations Environmental Program.
- Gharachelo, S., Ekhtesasi, M. R., Zareian Jahromi, M., & Samadi, M. B. (2021). Evaluation of current condition of desertification using I.C.D Model, case study: Khezrabad, Yazd. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 17(3), 402-420. https://ijdr.areeo.ac.ir/article_102934_6cfa67e0e102171340470f1e0beff691.pdf (In Persian).
- Greco, M., Mirauda, D., Squicciarino, G., & Telesca, V. (2005). Desertification risk assessment in southern mediterranean area. *Journal of Advances in Geosciences*, 2, 243-247. doi: <https://doi.org/10.5194/adgeo-2-243-2005>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Special report: Special report on climate change and land*. Retrieved from: <https://www.ipcc.ch/srcl/chapter/chapter/>
- Kirkby, M. J., Abrahart, R., McMahon, M. D., Shao, J., & Thornes, J. B. (1998), MEDALUS soil erosion models for global change. *Journal of Geomorphology*, 24(1), 35-49. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(97\)00099-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(97)00099-8)
- Koohafkan, A. P., Lantieri, D., & Nachtergaele, F. (2003). *Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) guidelines for a methodological approach*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization (FAO). www.fao.org/ag/agl/agll/lada/bckgrdocs.stm
- Koohbanani, H., Dashti Amirabad, J., Nikoo, S., & 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. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-322-fa.pdf> (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).
- Moghadam, M. (2012). *Rangelands & Range Management*. Tehran, Iran: Tehran University Press (In Persian).
- Nachtergaele, F.O.F., & Licona-Manzur, C. (2009). *The Land Degradation Assessment in Drylands (LADA) Project: Reflections on Indicators for Land Degradation Assessment*, The Future of Drylands, January 01, Pp. 327-348.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A., & Sombroek, W.G., (1991). *World Map of the Status of Human*

- Induced Soil Degradation*. Wageningen, Netherlands: ISRIC/UNEP
- Pahlavanravi, A., Moghadamnia, A., Hashemi, Z., Javadi, M. R. & 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 (In Persian). DOI: <http://dx.doi.org/10.22092/ijrdr.2013.3040>
- 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, Doi: 10.22092/IJSR.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 geographic 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 Researches*, 10 (20), 177-194 https://www.iraneiap.ir/article_108559.html (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 (25), 119-132. doi: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>
- Sadeghiravesh, M. H., & 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., Ahmadi, H., Zehtabian, G. R., & 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://www.pas-uplba.edu.ph>.
- Sadeghiravesh, M. H., & Khosravi, H. (2012). Zoning wind erosion potential risk in central Iran using modified numerical taxonomy model. *American-Eurasian Journal of Agricultural & 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., & Khosravi, H. (2022). Assessment the hazard of desertification using fuzzy TOPSIS logic in GIS environment, *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 24(3), 221-229. doi:10.30495/jest.2022.64138.5554 (In Persian).
- Sadeghiravesh, M. H., Khosravi, H., Abolhasani, A., Ghodsi, M., & Mosavi, A. (2021). Fuzzy logic model to assess desertification intensity based on vulnerability indices. *Acta Polytechnica Hungarica*, 18(3), 7-24. doi: 10.12700/APH.18.3.2021.3.1
- Sadeghiravesh, M. H., Zehtabian, G. H., & Tahmores, T. (2012). A vulnerability assessment of environmental issue to desertification risk (case study: Khezrabad region, Yazd). *Journal of Watershed Management Research*, 96 (1), 75-87, magiran.com/p1075685 (In Persian).
- Sepehr, A., Hassanli, A. M., Ekhtesasi, M. R., & Jamali, J. B. (2007). Quantitative Assessment of Desertification in South of Iran Using MEDALUS Method. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 134, 243-254. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9613-6>
- Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27 (3), 379-423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- Sharifi, M., & 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
- Silakhori, E., Ownegh, M., & Soleimani Sardo, M. (2019). Assessment of risk and hazard desertification using Topsis-GIS method (case study: Bashtin, Sabzevar, Razavi province), *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 9 (35), 44-59 https://jargs.hsu.ac.ir/article_

- 161488.html (In Persian).
- Soleimani-damaneh, M. & Zarepisheh, M. (2009). Shannons entropy combining the efficiency results of different DEA models: method & application, *Journal of Expert System with Applications*. 36(3), 5146-5150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.06.031>
- UNCCD. (2016). *Desertification – coping with today’s global challenges in the context of the strategy of the United Nations convention to combat desertification* (Report on the High-Level Policy Dialogue). Bonn, Germany: Unites Nations Convention to Combat Desertification.
- Van Lynden, G. W. J., & Oldeman, L. R. (1997). *The Assessment of the Status of Human-induced Soil Degradation in South and South East Asia*. Wageningen, Netherlands: ISRIC. <https://edepot.wur.nl/287427>
- Wang, X. D., Zhong, X. H., Liu, S. Z., Wang, Z. Y., & 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., & 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 (2), 1703 –1725. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph120201703>
- Zehtabian, G. R., Ahmadi, H., Ekhtesasi M.R., & 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).
- Zehtabian, Gh., Khosravi, H., & Masoudi, R. (2014). *Desertification assessment models (criteria and indices)*. Tehran, Iran: Tehran University Press (In Persian).