

Original Article



Evaluation Desertification Intensity Potential Under the Influence of Groundwater Resources and Land Subsidence in Sefid-Rud Basin

Received: 2024.08.06

Accepted: 2024.11.02

Ebrahim Yousefi Mobarhan,^{1*} Maryam Naeimi,² Ali Khaleghi³

¹ Institute of Soil Conservation and Watershed Management Research, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Semnan, Iran

² Institute of National Forests and Rangelands Research, Tehran, Iran

³ Desert Management and Control, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Desertification is the reduction of the ecological and biological power of the earth, which occurs in two natural and artificial ways. This phenomenon is one of the important problems of the countries in the framework of the sustainable development management plan, which is the result of a set of different environmental, human and climatic factors. The purpose of this study is to investigate the impact of the level drop and the change in the quality of groundwater and land subsidence in the occurrence of desertification and land degradation in Sefid-Rud basin using the IMDPA model.

Material and Methods: In this research, it has been tried to use quantitative and qualitative indicators of underground water such as electrical conductivity (EC), water level drop, sodium absorption ratio (SAR) as well as land subsidence map and their classification according to desertification intensity. Then, the final map of desertification intensity was obtained by combining maps of the intensity of qualitative degradation and the drop of the underground water level, as well as the land subsidence map as a soil criterion using the geometric mean. Finally, the zoning map of desertification intensity was prepared using the final risk classes of desertification according to the geometric mean of the values of the risk classes of quantitative and qualitative indicators.

Results and Discussion: The obtained results showed that the electrical conductivity (EC) map showed that 64.8% of the catchment area is in the medium class, 0.5% in the extreme and very extreme class. Also, the sodium absorption ratio (SAR) zoning map showed that 100% of the catchment area has a value of less than 18 and is in the low or insignificant category. The zoning of the water level drop also showed that only 6% of the studied catchment area is in the moderate class, 29% is in the extreme and very extreme class. The map of different levels of land subsidence showed that only 2% of the area of the watershed was involved in subsidence. The maps of the classes of desertification intensity of the Sefid-Rud basin, respectively, with subsidence and without subsidence respectively, show that 47% and 0.4% of the studied area have high desertification intensity, also in the state of intense desertification. Desertification with subsidence (51.5 percent) and without subsidence (90 percent) is the predominance with the intensity of desertification class.

Conclusion: The results of the integration of the three parameters of the underground water model (IMDPA) in Sefid-Rud basin showed that about 90% of the basin has an average state of desertification, which can be caused by the influence of the average state of the electrical conductivity index in a significant part of the basin. However, the effect of the drop in the groundwater level in the areas that had severe desertification from the point of view of the electrical conductivity index caused these areas to have a very severe desertification condition according to the groundwater standard, which is well within the study areas of Gol -Tepe-Zarin-Abad can be recognized.

Keywords: Decreasing Groundwater Table, Zoning, Sefid-Rud Basin, GIS, IMDPA model

How to cite this article: Yousefi Mobarhan, E., Naeimi, M. and Khaleghi, A., 2025. Evaluation of Desertification Intensity Potential Under the Influence of Groundwater Resources and Land Subsidence in Sefid-Rud Basin. Adv. Environ. Sci. 23(3): 599-616.

* Corresponding Author Email Address: e.yousefi@areeo.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1428



ارزیابی پتانسیل شدت بیابان‌زایی تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی و فرونشست زمین در حوضه سفیدرود

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

ابراهیم یوسفی مبرهن^{۱*}، مریم نعیمی^۲، علی خالقی^۳

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: بیابان‌زایی کاهش توان اکولوژیکی و زیستی زمین است که به دو صورت طبیعی و مصنوعی رخ می‌دهد. این پدیده از معضلات مهم کشورها در چارچوب برنامه مدیریتی توسعه پایدار است که خود نتیجه برآیند مجموعه‌ای از عوامل مختلف محیطی، انسانی و اقلیمی است. هدف از انجام این مطالعه بررسی میزان تأثیر افت سطح و تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در وقوع پدیده بیابان‌زایی و تخریب اراضی در حوضه سفیدرود با استفاده از مدل IMDPA است.

مواد و روش‌ها: به‌منظور ارزیابی شدت بیابان‌زایی توسط این مدل، از شاخص‌های افت سطح آب زیرزمینی، نسبت جذب سدیم (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) تحت معیار آب زیرزمینی و از شاخص میزان فرونشست به‌عنوان معیار فرونشست زمین استفاده شد. شاخص‌های مورد نظر پس از امتیازدهی و طبقه‌بندی، پهنه‌بندی شدند. معیار فرونشست، با استفاده از نقشه فرونشست تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس نقشه نهایی وضعیت بیابان‌زایی از هم‌پوشانی نقشه‌های معیار آب زیرزمینی (سه شاخص افت سفره آب زیرزمینی، نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی) همچنین نقشه‌های معیار آب زیرزمینی و معیار خاک (چهار شاخص افت سفره آب زیرزمینی، نسبت جذب سدیم، هدایت الکتریکی و فرونشست زمین) بر اساس میانگین هندسی معیارها به‌دست آمد.

نتایج و بحث: نقشه هدایت الکتریکی (EC) نشان داد که ۶۴/۸ درصد از حوضه در کلاس متوسط، ۰/۵ درصد در کلاس شدید و بسیار شدید قرار دارند. همچنین نقشه پهنه‌بندی نسبت جذب سدیم (SAR) نشان داد که ۱۰۰ درصد مساحت حوضه دارای ارزش کم‌تر از ۱۸ است و در طبقه کم یا ناچیز قرار می‌گیرد. پهنه‌بندی افت سطح آب نیز نشان داد که تنها ۶ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در کلاس متوسط، ۲۹ درصد در کلاس شدید و بسیار شدید قرار دارد. نقشه سطوح مختلف فرونشست زمین نشان داد که فقط ۲ درصد مساحت حوزه درگیر فرونشست بوده است. نقشه‌های طبقات شدت بیابان‌زایی حوضه سفیدرود به ترتیب حالت‌های با فرونشست و بدون فرونشست به ترتیب نشان می‌دهد که ۴۷ درصد و ۰/۴ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای شدت بیابان‌زایی شدید است همچنین در حالت شدت بیابان‌زایی با فرونشست (۵۱/۵ درصد) و بدون فرونشست (۹۰ درصد) غالبیت با شدت کلاس بیابان‌زایی متوسط می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از تلفیق سه پارامتر معیار آب زیرزمینی مدل IMDPA در حوضه سفیدرود نشان داد حدود ۹۰ درصد از حوضه دارای وضعیت متوسط بیابان‌زایی می‌باشند که می‌تواند ناشی از تأثیر وضعیت متوسط شاخص هدایت الکتریکی در بخش قابل توجهی از حوضه باشد. با این وجود تأثیر افت سطح آب زیرزمینی در مناطقی که دارای وضعیت شدید بیابان‌زایی از منظر شاخص هدایت الکتریکی بودند سبب شده این مناطق بر طبق معیار آب زیرزمینی دارای وضعیت خیلی‌شدید بیابان‌زایی باشند که این شرایط به خوبی در محدوده‌های مطالعاتی گل‌تپه-زین‌آباد قابل تشخیص است.

واژگان کلیدی: افت سطح آب زیرزمینی، پهنه‌بندی، حوضه سفیدرود، GIS، مدل IMDPA

^۱ بخش حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سمنان، ایران

^۲ بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

^۳ دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استناد به این مقاله: یوسفی

مبرهن، ا.، م. نعیمی و ع. خالقی.

۱۴۰۴. ارزیابی پتانسیل شدت

بیابان‌زایی تحت تأثیر منابع آب

زیرزمینی و فرونشست زمین در

حوضه سفیدرود. فصلنامه علوم

محیطی نوین. ۲۳(۳): ۵۹۹-۶۱۶.

* Corresponding Author Email Address: e.yusefi@areeo.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1428



مقدمه

مدیریت مدل مدالوس^۱ تعیین کردند. بر طبق نتایج به دست آمده از این مطالعه، ۲/۹ درصد از منطقه مورد مطالعه در طبقه بحرانی تخریب قرار می‌گیرد، ۴۸/۸ درصد در طبقه شکننده، ۱۵/۵ درصد به طور بالقوه در معرض خطر تخریب بوده و ۳۰/۵ درصد نیز بدون خطر می‌باشد. Huang *et al.*, (2023)، در شهر شیآن چین در ترکیب با شبیه‌سازی عددی، ویژگی‌های تغییر شکل و تنش و تونل ناشی از فرونشست زمین مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مطابق نتایج، در هنگام فرونشست زمین، فشار خاک اطراف در بالا و پایین تونل در ناحیه نفوذ فرونشست زمین کاهش و در خارج افزایش می‌یابد. در مطالعات داخل کشور نیز، و Alesheikh *et al.*, (2022) فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در آبخوان مرودشت با استفاده از روش زمین آمار و تداخل‌سنجی راداری تعیین کردند. نتایج به دست آمده نشان داد سطح آب زیرزمینی به طور متوسط ۴۵ سانتیمتر در سال افت داشته و بیشترین میزان فرونشست زمین برابر با ۲/۵ سانتی‌متر بوده است. Abuzeid and Abdullatif (2022) با استفاده از مدل مدالوس اصلاح شده، بیابان‌زایی را با تجزیه و تحلیل پنج شاخص اقلیم، خاک، پوشش گیاهی، مدیریت و فرسایش در منطقه شمال دلتای نیل ارزیابی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده، ۷۲٪ از منطقه به عنوان حساس به بیابان‌زایی مشخص شد. Hamed and (2024) Surucu با مدل مدالوس خطر بیابان‌زایی در منطقه هریر واقع در شمال عراق را برآورد کردند. نتایج نشان داد، ۶۸/۲ کیلومترمربع از منطقه مورد مطالعه در معرض تخریب زمین و بیابان‌زایی قرار دارد. پژوهش‌های مختلفی در خصوص شدت بیابان‌زایی و ارزیابی آن انجام شده است. از جمله روش‌های ارزیابی بیابان‌زایی می‌توان به مدل‌های FAO-UNEP^۲، MEDALUS^۳، ESAs^۴ و IMDPA^۵ اشاره کرد.

با استفاده از مدل IMDPA، بیابان‌زایی دشت مهران استان

اضافه برداشت آب زیرزمینی موجب بروز پدیده فرونشست، شوری خاک‌ها، کاهش دبی پایه رودخانه‌ها در اثر خشک شدن چشمه‌ها، شوری آب‌های زیرزمینی و در یک نگاه کلی تخریب اراضی و ایجاد و گسترش پهنه‌های بیابانی می‌شود (Behnia *et al.*, 2021). بیابان‌زایی یکی از عوامل تهدیدکننده حیات بشری است که موجب تخریب منابع طبیعی می‌شود (Shakerian *et al.*, 2011). افت شدید آب زیرزمینی، یکی از عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر فرونشست می‌باشد. تمرکز چاه‌های پمپاژ در یک منطقه باعث ایجاد فشردگی دائم بر رسوبات ریزدانه و در نتیجه فرونشست زمین در آن می‌شود که این مسئله در بسیاری از دشت‌های ایران از جمله دشت کاشمر در استان خراسان رضوی (Laskaripour *et al.*, 2006)، دشت مشهد (Laskaripour *et al.*, 2007)، دشت مهیار اصفهان (Ajelloyan and Bahadoran, 1998)، دشت نجف‌آباد اصفهان (Research Institute of Forests and Pastures, 2022) و بسیاری از آبخوان‌های دیگر مشاهده می‌شود. این پدیده ناهنجاری‌های بسیاری در محیط‌زیست ایجاد می‌نماید که از آن جمله می‌توان به تغییر در توپوگرافی، خصوصیات هیدرولوژیکی یک منطقه، افزایش درجه سیل‌خیزی و تغییر در جهت و سرعت آب‌های زیرزمینی اشاره کرد (Yousefi Mobarhan *et al.*, 2022, Yousefi Mobarhan., 2025). پژوهش‌های مختلفی در زمینه بیابان‌زایی و ارزیابی آن انجام شده است. برای نمونه، Ekhtesasi and Mohajeri (1996) روشی را برای طبقه‌بندی بیابان‌زایی در ایران ارائه کردند. در این روش هشت معیار مؤثر در تخریب اراضی یا بیابان‌زایی شامل چهار عامل محیطی و چهار عامل انسانی بررسی شد و نهایتاً شدت فرسایش، تخریب خاک و توان بازگشت‌پذیری و بازسازی اکوسیستم را به روش امتیازدهی ارزیابی کردند. Meza Mori *et al.*, (2022) الگوی مکانی تخریب ارزیابی در اتیوپی با تأکید بر معیارهای خاک، پوشش گیاهی، اقلیم و

برنامه‌ریزی‌های لازم جهت جلوگیری از پیشرفت شدت بیابان‌زایی استفاده گردد.

داده‌ها و روش‌ها

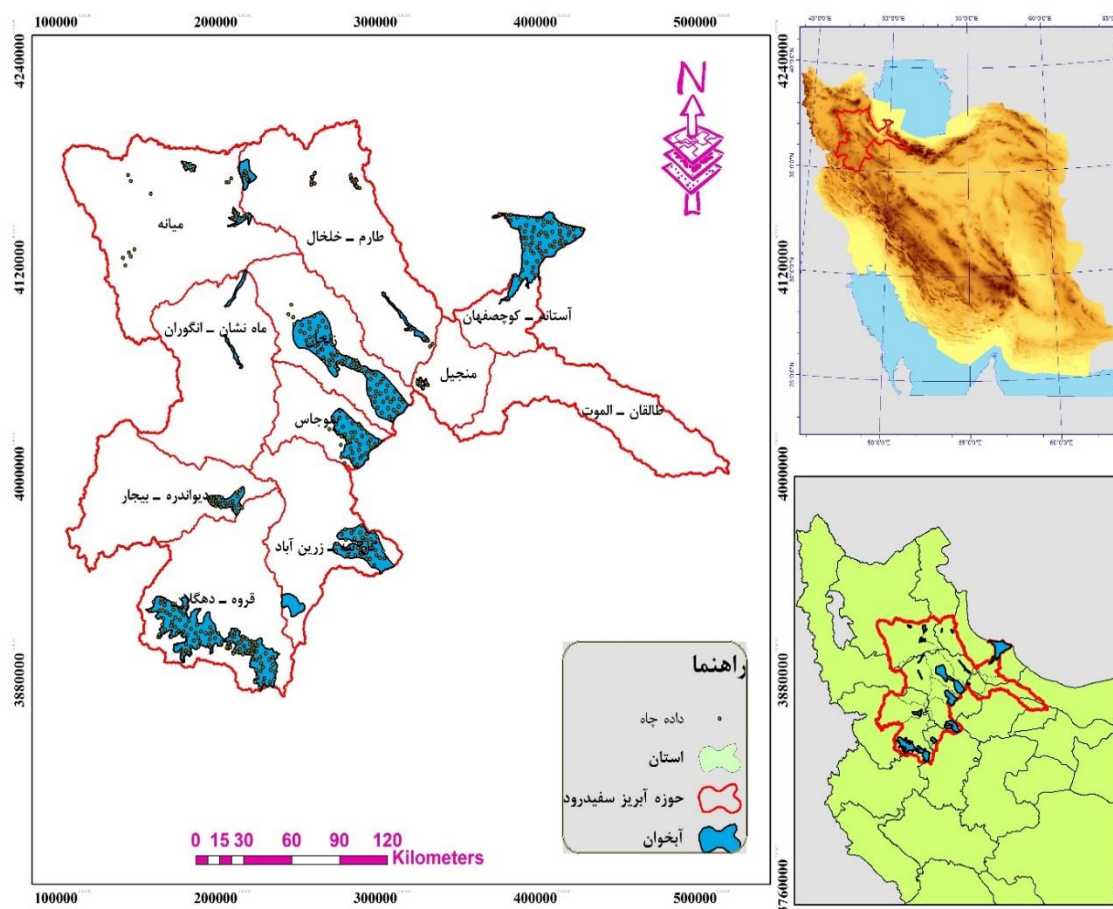
منطقه مورد مطالعه

حوضه سفیدرود در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، بخشی از حوضه آبریز دریای خزر محسوب شده و در محدوده تلاقی رشته کوه‌های البرز، زاگرس و مرکزی قرار دارد. این حوضه آبریز در طول شرقی ۲۷°، ۴۶° تا ۱۱°، ۵۱° شرقی و عرض شمالی ۵۳°، ۳۴° تا ۵۶°، ۳۷° شمالی قرار گرفته است.

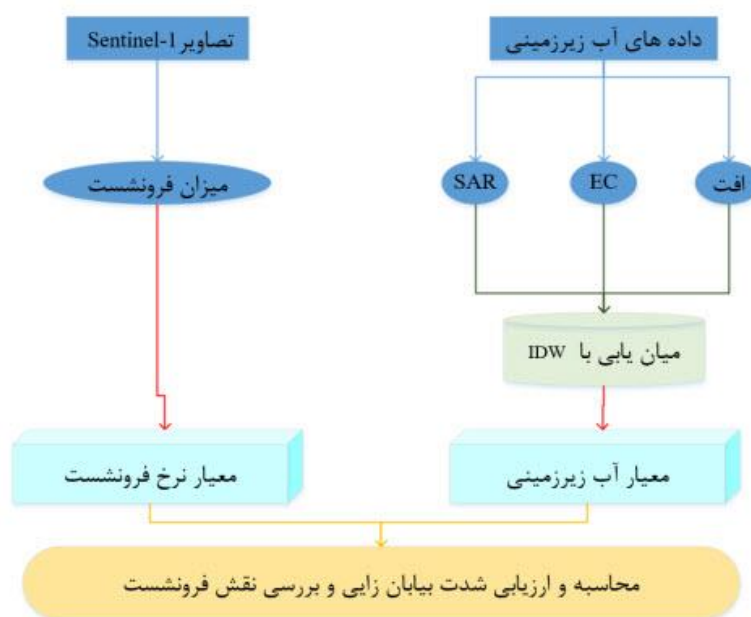
مساحت حوضه آبریز آن برابر ۵۹۵۲۹ کیلومتر مربع بوده و بر اساس تقسیمات کوه و دشت تماب (تحقیقات منابع آب ایران) ۴۳۳۷۳ کیلومتر مربع آن معادل ۷۲/۹ درصد در مناطق کوهستانی و حدود ۲۷/۱ درصد آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل داده است. حدود ۴۲۰۰۰ کیلومترمربع از اراضی این حوزه (بیش از ۷۷ درصد سطح حوضه) در ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۲۳۰۰ متر واقع شده است. بیش از ۲۵۰۰۰ کیلومترمربع از اراضی این حوزه (۴۲/۶ درصد اراضی) در شیب‌های کمتر از ۸ درصد واقع شده است (Yousefi, 2024). (Mobarhan et al., 2024). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه سفیدرود و آبخوان‌های موجود در آن را نشان می‌دهد.

همان‌طور که ذکر شد، در این پژوهش ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل شدت بیابان‌زایی در قالب مدل IMDPA انجام شده است. در این مدل هر یک از این شاخص‌های مورد مطالعه که در این پژوهش شامل شاخص‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی (EC، SAR و افت سطح آب زیرزمینی) است، در چهار کلاس خطر کم، خطر متوسط، خطر شدید و بسیار شدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. شکل ۲، شماتیک کلی روش تحقیق این پژوهش شامل معیارها و شاخص‌های انتخابی موثر در بیابان‌زایی حوضه سفیدرود را نشان می‌دهد.

ایلام را با شاخص‌های کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی مورد ارزیابی قرار دادند (Shahini et al., 2021). نتایج به‌دست آمده نشان داد شاخص‌های افت آب زیرزمینی و سیستم آبیاری بیشترین تأثیر را در روند بیابان‌زایی منطقه دارند. در پژوهش دیگری قابلیت مدل IMDPA در تعیین فرسایش بادی و آبی تأیید شد (Masoudi and Shirgir, 2021). همچنین وضعیت بیابان‌زایی شهرستان شادگان از بین نه معیار مدل (IMDPA)، دو معیار پوشش گیاهی و اقلیم مورد استفاده قرار دادند و ارزش کمی بیابان‌زایی منطقه مورد مطالعه را ۲/۰۲ به‌دست آوردند که وضعیت فعلی بیابان‌زایی منطقه را متوسط تعیین نمودند (Borna et al., 2021). Keramat Zadeh et al. (2022) نیز پژوهش مشابهی در منطقه جنوب شرق اهواز انجام دادند و ارزش کمی بیابان‌زایی منطقه مورد مطالعه را ۱/۹۹ (کلاس متوسط) تعیین کردند. نتایج پژوهش (Entezarizarch et al., 2023) عملکرد دو مدل IMDPA و گلاسود در تخمین شدت تخریب اراضی در دشت بزرگ یزد-اردکان مقایسه و نتایج نشان داد که نقشه IMDPA به میزان ۸۲ درصد با واقعیت زمینی تطابق داشت در حالی که این میزان برای مدل گلاسود ۶۹ درصد بود. همچنین (Saleh et al., 2023) در ارزیابی شدت بیابان‌زایی در حوضه مهارلو-بختگان دریافتند که ۸۳ درصد از سطح حوضه دارای شدت بیابان‌زایی کم و متوسط و ۱۷ درصد از آن دارای شدت بیابان‌زایی شدید و خیلی شدید می‌باشد. همچنین (Hosseini et al., 2023) با استفاده از مدل IMDPA شدت بیابان‌زایی در شمال غرب یزد را ارزیابی کردند. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که معیار خاک، بیش‌ترین تأثیر را در پدیده بیابان‌زایی منطقه ایفا می‌کند. با توجه به موضوعیت و فراگیری افت کمی و کیفی آب در آبخوان‌های کشورمان، این موضوع در گسترش مرزهای بیابان حتی در حوضه‌ای مانند سفیدرود نیز دیده شده و بررسی آن ضروری است لذا این پژوهش سعی دارد با استفاده از پایه مدل IMDPA، شدت بیابان‌زایی در حوضه موردنظر را بررسی نماید که نتایج حاصله می‌توانند به منظور



شکل ۱- موقعیت حوضه سفیدرود و آبخوان‌های آن
Fig. 1- The location of Sefid-Rud basin and its aquifers



شکل ۲- شماتیک کلی روش تحقیق پژوهش حاضر
Fig. 2- General schematic of the research method of the present study

ارزیابی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی

یکی از قابلیت‌های مدل IMDPA توانایی ارزیابی منطقه با تعداد شاخص محدود است. در این مدل می‌توان با توجه به شرایط، شاخص‌هایی را انتخاب و شدت بیابان‌زایی را ارزیابی کرد. به منظور ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی، داده‌های مربوط به مقادیر میانگین سطح آب‌های زیرزمینی مربوط به سال‌های آبی ۹۴-۹۵ و ۹۵-۹۶ در آبخوان‌های موجود در منطقه از شرکت آب منطقه‌ای تهیه شد. سپس با روش وزن‌دهی معکوس فاصله در محیط نرم‌افزار (GIS) (Saleh *et al.*, 2023)، میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه ایجاد و در ادامه با استفاده از روش تیسن و طبقه‌بندی ارایه شده در جدول ۱، نقشه پهنه‌بندی خطر افت سطح آب زیرزمینی تهیه گردید. مدل IDW یکی از معمول‌ترین روش‌های میان‌یابی نقاط پراکنده در فضا است که اساس آن بر مبنای این فرضیه است که در یک سطح میان‌یابی، اثر یک پارامتر بر نقاط اطرافش یکسان نیست و هر چه فاصله از مبدأ افزایش یابد، اثر کم‌تر خواهد شد (Ansari and Davari, 2007; Maghami *et al.*, 2011). همچنین این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های درون-یابی است (Taha *et al.*, 2017, Yousefi Mobarhan and Karimi Sangchini, 2021). به همین ترتیب، داده‌های شاخص‌های تخریب کیفی منابع آب شامل هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سطحی سدیم (SAR) طبقه‌بندی و پهنه‌بندی هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم صورت گرفت.

شاخص هدایت الکتریکی نمایان‌گر میزان املاح کاتیونی و آنیونی محلول موجود در آب است. هر چه میزان هدایت الکتریکی یک نمونه آب بیش‌تر باشد، کیفیت آب نامطلوب‌تر است. شاخص هدایت الکتریکی برحسب میکروزیمنس بر متر در ۲۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه می‌شود (Dolatshahi, 2007; Yousefi Mobarhan *et al.*, 2024). نسبت جذب سدیم نیز عبارت است از میزان سدیم به جذر مجموع مقادیر کلسیم و منیزیم موجود در آب برحسب میلی‌اکی‌والان در لیتر که از رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Yousefi Mobarhan and Zandifar, 2023).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Ca + Mg)/2}} \quad (1)$$

ارزیابی شدت بیابان‌زایی

پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی اشاره شده، کلاس‌های خطر بیابان‌زایی هر شاخص مطابق جدول‌های ۱ و ۲ تعیین شد. در نهایت از میانگین‌گیری هندسی نقشه‌های شدت تخریب کیفی و شدت تخریب کمی منابع آب زیرزمینی و نیز نقشه فرونشست زمین به‌عنوان معیار خاک، نقشه نهایی شدت بیابان‌زایی به‌دست آمد و سپس نقشه پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی با استفاده از کلاس‌های خطر نهایی بیابان‌زایی با توجه به میانگین هندسی مقادیر کلاس‌های خطر با معیار آب زیرزمینی (هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، افت) و دو معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست طبق طبقه‌بندی جدول ۳ تهیه شد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص‌های کیفی و کمی معیار آب زیرزمینی (احمدی، ۱۳۸۴)

Table 1. Classification of qualitative and quantitative indicators of groundwater standard (Ahmadi, 2014)

وضعیت بالفعل بیابان‌زایی				شاخص index	معیار آب زیرزمینی Groundwater standard
The actual situation of desertification					
1 (کم)	2 (متوسط)	3 (شدید)	4 (خیلی شدید)		
1 (low)	2 (moderate)	3 (severe)	4 (very intense)		
>750	2250-750	5000-2250	<5000	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر) Electrical conductivity (microms/cm)	کیفیت آب زیرزمینی Groundwater quality
>18	18-26	26-32	<32	(SAR)	
>20	20-30	30-50	<50	افت آب زیرزمینی (سانتی‌متر در سال) Groundwater loss (centimeters per year)	کمیت آب زیرزمینی Groundwater quantity

جدول ۲- معیار فرونشست زمین (RIFR, 2022)
Table 2. Ground subsidence criteria (RIFR, 2022)

وضعیت بالفعل بیابان‌زایی The actual situation of desertification				شاخص index
4 (خیلی شدید) (very intense)	3 (شدید) (severe)	2 (متوسط) (moderate)	1 (کم) (low)	
-12<	-10- -11/99	-7- -9/99	-6/99>	فرونشست (سانتی‌متر در سال) Subsidence (centimeters per year)

جدول ۳- جدول نهایی ارزیابی بیابان‌زایی بر اساس مدل IMDPA (احمدی، ۱۳۸۴)
Table 3. The final table of desertification assessment based on the model IMDPA (Ahmadi, 2014)

طبقه Floor	وضعیت بالفعل Actual situation	دامنه ارزش عددی Numeric value range
1	کم Low	0 - 1/5
2	متوسط moderate	1/6 - 2/5
3	شدید intense	2/6 - 3/5
4	خیلی شدید very intense	3/6 - 4

نتایج و بحث

معیار کیفی آب زیرزمینی

شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب وضعیت شاخص‌های هدایت الکتریکی، SAR و افت سطح آب زیرزمینی در سطح حوضه سفیدرود را نشان می‌دهد. نقشه طبقات شدت بیابان‌زایی از منظر شاخص هدایت الکتریکی نشان می‌دهد که با توجه به این نقشه، در کل یازده محدوده منطقه مورد مطالعه مقدار شوری از حداکثر مقدار ارائه شده توسط ویلکاکس (۲۲۵۰) کمتر بوده و می‌توان گفت که حوضه سفیدرود وضعیت مناسبی از نظر شوری دارد و از منظر شدت بیابان‌زایی در کلاس‌های کم و متوسط قرار دارد به جزء سطح بسیار کوچکی از محدوده گل‌تپه-زرین‌آباد که در کلاس شدید بیابان‌زایی قرار می‌گیرد (شکل ۳) لذا این محدوده جزء بدترین محدوده نسبت به سایر محدوده‌های حوضه سفیدرود می‌باشد.

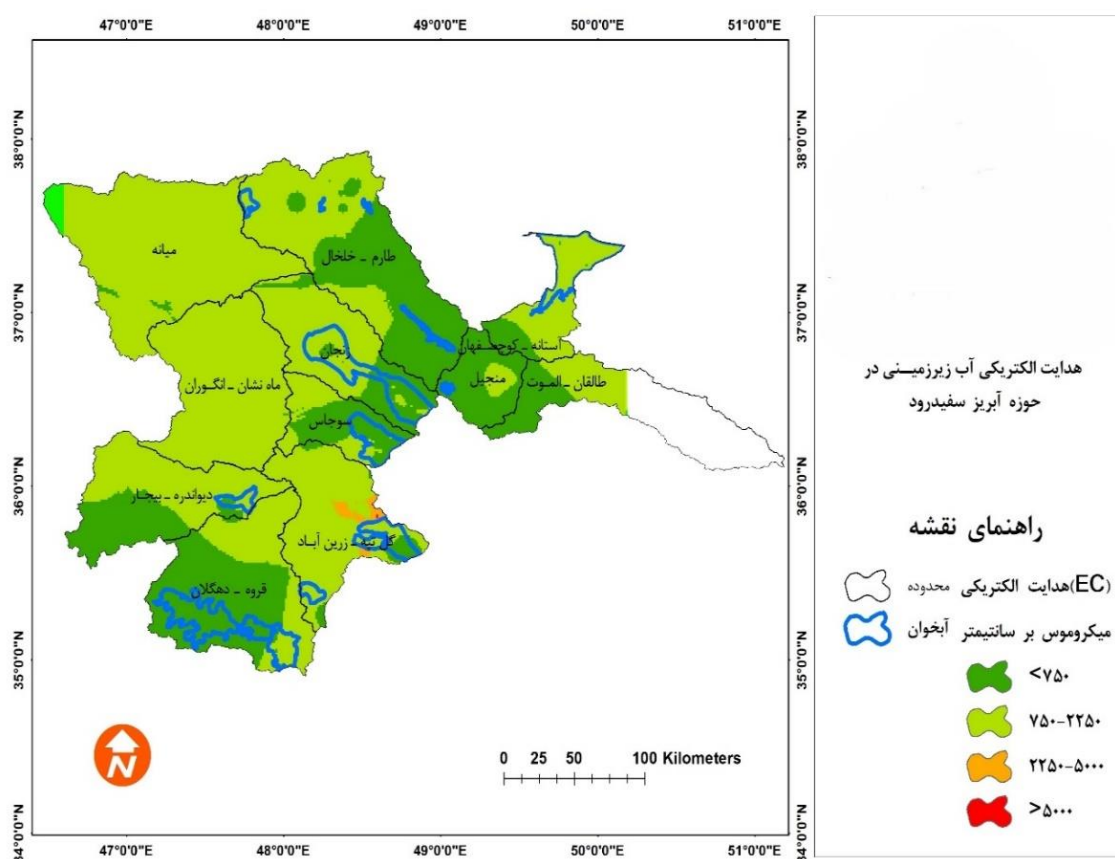
درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی از منظر هدایت الکتریکی در کل حوضه آبریز در جدول ۴ موبد این

مطلب است که کمتر از یک درصد از حوضه سفیدرود (معادل ۲۳۹۹۱ هکتار) در کلاس شدید و خیلی شدید بیابان‌زایی براساس شاخص هدایت الکتریکی آب زیرزمینی قرار می‌گیرد همچنین حدود ۳۵ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس با شدت بیابان‌زایی کم بر اساس شاخص مذکور قرار دارند. در این زمینه، (Saleh, 2012; Shokoohi et al., 2012; Abdi, 2007; et al., 2022) به ترتیب با بررسی وضعیت بیابان‌زایی مناطق ابوزیدآباد استان اصفهان، خضرآباد-اله آباد استان یزد و حوضه مهاربو-بختگان بر اساس مدل IMDPA تأکید بر معیارهای آب و خاک به نتایج متفاوتی دست یافتند و شاخص هدایت الکتریکی را دارای تأثیر قابل توجهی در تخریب منابع آب زیرزمینی و بیابان‌زایی دانسته‌اند. پهنه‌بندی شاخص SAR نشان از وضعیت مناسب حوضه دارد (شکل ۴)، به‌طوری که ۱۰۰ درصد سطح حوضه

دارای نسبت جذب سدیم کم‌تر از ۱۸ است (جدول ۵) و در طبقه ناچیز یا کم قرار می‌گیرد. بنابراین، این شاخص

سفیدرود از وضعیت بسیار مناسبی بر اساس شاخص موردنظر برخوردار است. به همین دلیل این شاخص در تهیه نقشه نهایی در نظر گرفته نشد که با نتایج (Maaroufpour, 2018; Saleh *et al.*, 2023) هم‌خوانی دارد.

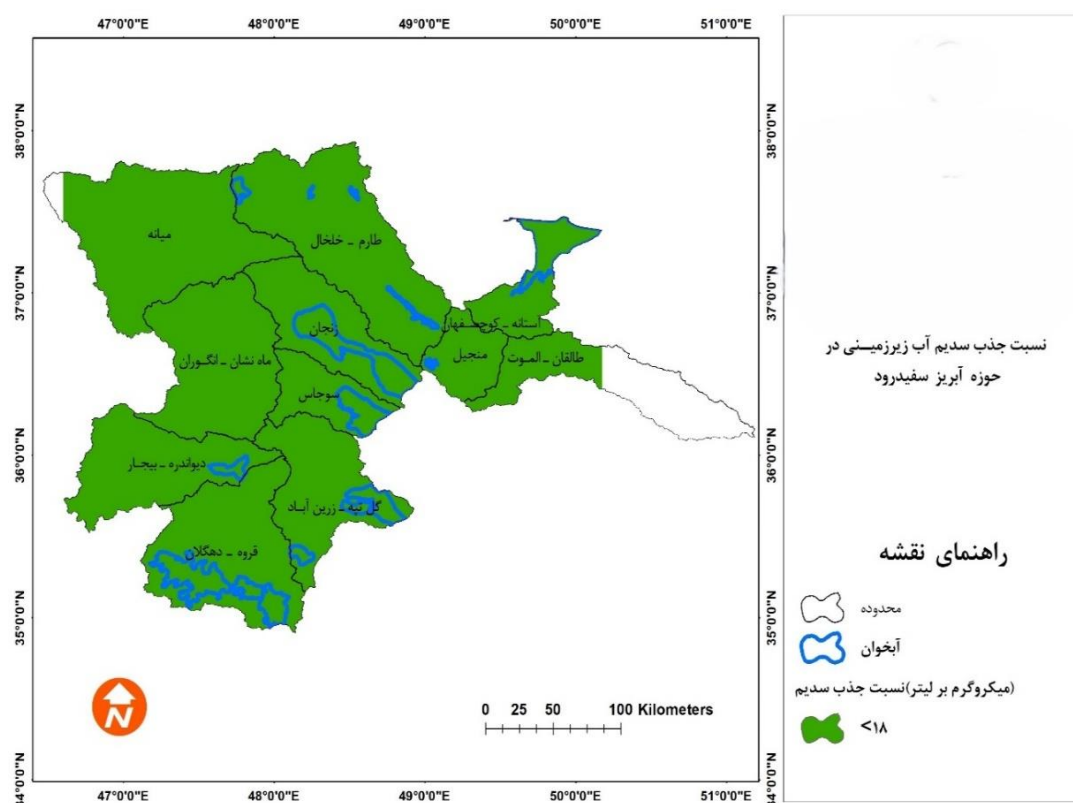
نمی‌تواند نقش مؤثری در تعیین شدت بیابان‌زایی در حوضه مطالعه داشته باشد و سبب کم‌تر نشان دادن شدت بیابان‌زایی می‌شود. همچنین مقدار نسبت جذب سدیم (SAR) در محدوده گل‌تپه-زرین‌آباد نسبت به سایر محدوده‌ها بیشتر است بنابراین کل محدوده حوضه



شکل ۳- پهنه‌بندی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در حوضه سفیدرود
Fig. 3- Zoning of electrical conductivity of underground water in Sefid-Rud basin

جدول ۴- درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی براساس شاخص هدایت الکتریکی
Table 4. Area percentage of desertification intensity classes based on electrical conductivity index

درصد مساحت Area percentage	مساحت (هکتار) area (hectares)	شدت بیابان‌زایی Intensity of desertification	شاخص هدایت الکتریکی Electrical conductivity index
34/7	2065656	کم (1) (1) low	<750
64/8	3857479	متوسط (2) (2) moderate	2250 – 750
0/4	23812	شدید (3) (3) intense	5000 – 2250
0/003	179	خیلی شدید (4) (4) very severe	>5000



شکل ۴- پهنه‌بندی نسبت جذب سدیم (SAR) آب زیرزمینی در حوزه سفیدرود
Fig. 4- Zoning of sodium absorption ratio (SAR) of groundwater in the Sefid-Rud basin

جدول ۵- درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی براساس شاخص هدایت الکتریکی
Table 5. Area percentage of desertification intensity classes based on electrical conductivity index

درصد مساحت Area percentage	مساحت (هکتار) area (hectares)	شدت بیابان‌زایی Intensity of desertification	شاخص نسبت جذب سدیم Sodium absorption ratio index
100	5952900	کم (1) (1) low	<18
0	0	متوسط (2) (2) moderate	26 – 18
0	0	شدید (3) (3) intense	32 – 26
0	0	خیلی شدید (4) (4) very severe	>32

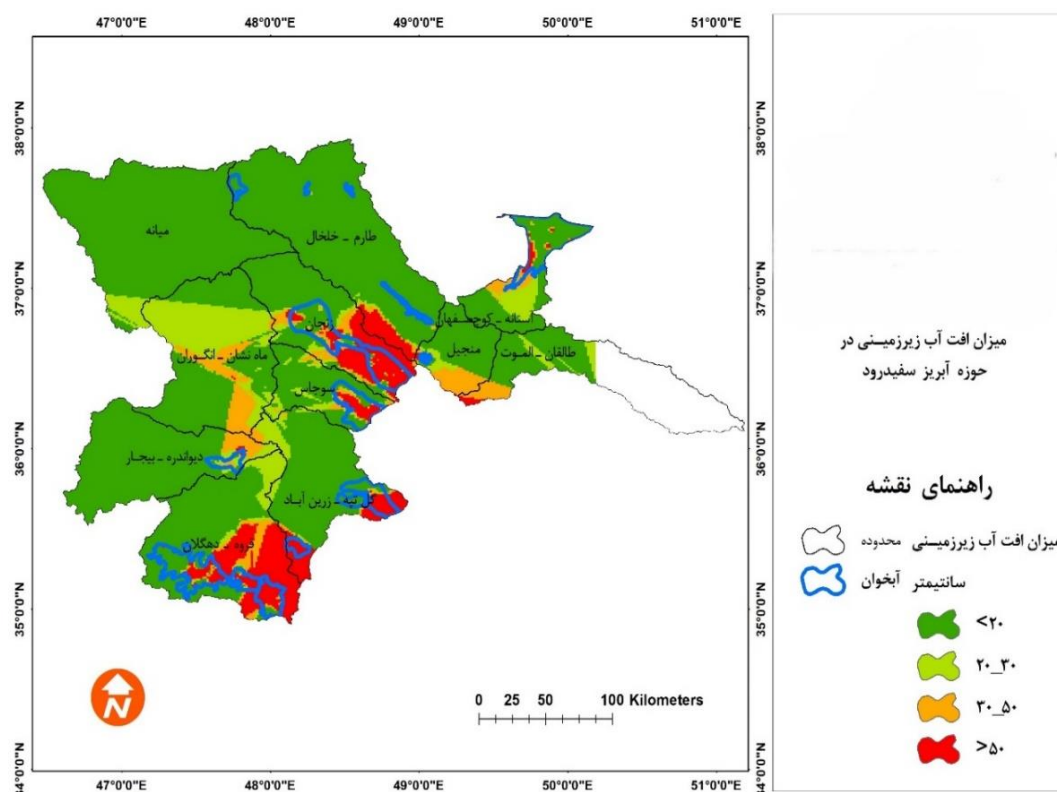
کلاس‌های شدت کم و خیلی زیاد بیشتر می‌باشد (شکل ۵). لازم به ذکر است که سطح زیادی از دشت‌های قروه-دهگلان و زنجان در کلاس شدت بیابان‌زایی شدید واقع شده است که جزء بدترین محدوده نسبت به سایر محدوده‌های حوزه سفیدرود می‌باشد. درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی براساس شاخص افت سطح تراز آب زیرزمینی در

معیار کمی آب زیرزمینی

پهنه‌بندی میزان افت سطح آب زیرزمینی نیز نشان می‌دهد که با حرکت به سمت جنوب حوزه این شاخص افزایش یافته؛ به‌طوری که بخش عمده‌ای از جنوب و جنوب شرق حوزه در کلاس ۴ یا خیلی شدید قرار گرفته است. اما در نواحی شمالی و غربی شرایط کاملاً متفاوت است و مساحت

ایجاد محدودیت توسط افت سطح آب زیرزمینی در بیابان‌زایی به‌دست آوردند. علی‌رغم این‌که مهم‌ترین عامل شوری آب‌های زیرزمینی، افت سطح ایستایی است (Saleh *et al.*, 2023)، فلذا شکل‌های ۲ و ۴ نشان‌دهنده هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم پایین آب زیرزمینی در اغلب نواحی را تایید می‌کند.

جدول ۶ مؤید این مطلب است که ۲۹ درصد از حوضه سفیدرود (معادل ۱۷۲۶۰ کیلومترمربع) در کلاس شدید و خیلی شدید به لحاظ وضعیت بالفعل بیابان‌زایی قرار می‌گیرد همچنین ۶۵ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس با شدت بیابان‌زایی کم قرار دارند. (Fatahi (2017) و Haghgou *et al.* (2017) نیز نتایج مشابهی در خصوص



شکل ۵- پهنه‌بندی افت سطح آب زیرزمینی در حوضه سفیدرود
Fig. 5- Zoning of groundwater level drop in the Sefid-Rud basin

جدول ۶- درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی براساس شاخص افت سطح تراز آب زیرزمینی
Table 6. Area percentage of desertification intensity classes based on the index of groundwater level drop

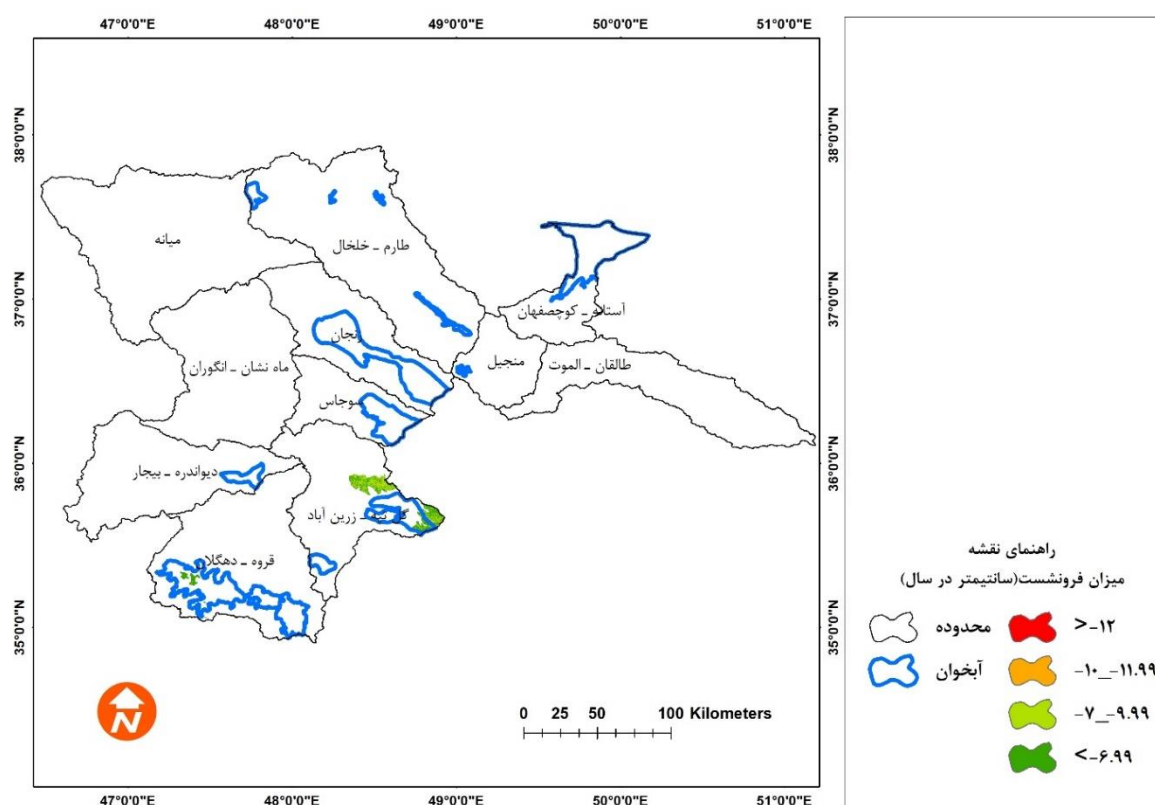
درصد مساحت Area percentage	مساحت (هکتار) area (hectares)	شدت بیابان‌زایی Intensity of desertification	شاخص افت سطح تراز آب زیرزمینی Groundwater level drop index
65	3869385	کم (1) (1) low	<20
6	357174	متوسط (2) (2) moderate	30 – 20
7	416703	شدید (3) (3) intense	50 – 30
22	1309638	خیلی شدید (4) (4) very severe	>50

معیار فرونشست زمین

بررسی نقشه فرونشست در حوضه سفیدرود نشان داد که تنها در محدوده‌های مطالعاتی گل‌تپه-زرین‌آباد و قروه-دهگلان دچار فرونشست شده‌اند (شکل ۶) میزان فرونشست تا ۱۲/۳ سانتی‌متر در دشت گل‌تپه-زرین‌آباد برآورد شده است.

لازم به ذکر است که تنها ۲ محدوده از ۱۱ محدوده‌های

مطالعاتی درگیر فرونشست بوده و امکان ارزیابی معیار نرخ فرونشست در آنها وجود دارد. درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی براساس شاخص فرونشست در جدول ۷ موید این مطلب است که ۲ درصد از حوضه سفیدرود (معادل ۹۱۶/۳ هکتار) در کلاس شدید و خیلی‌شدید بیابان‌زایی بر اساس شاخص فرونشست قرار می‌گیرد همچنین فقط محدوده گل‌تپه-زرین‌آباد در کلاس خیلی شدید واقع شده است.



شکل ۶- پهنه‌بندی فرونشست زمین در حوزه سفیدرود

Fig. 6- Zoning of land subsidence in Sefid-Rud basin

جدول ۷- درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی براساس شاخص فرونشست

Table 7. Area percentage of desertification intensity classes based on subsidence index

درصد مساحت Area percentage	مساحت (هکتار) area (hectares)	شدت بیابان‌زایی Intensity of desertification	شاخص فرونشست Subsidence index
0/2	34/5	خیلی‌شدید (4) (4) very intense	>12
1/8	881/8	شدید (3) (3) intense	12 – 10
42/4	20138/7	متوسط (2) (2) moderate	10 – 7
55/6	26399/8	کم (1) (1) low	<7

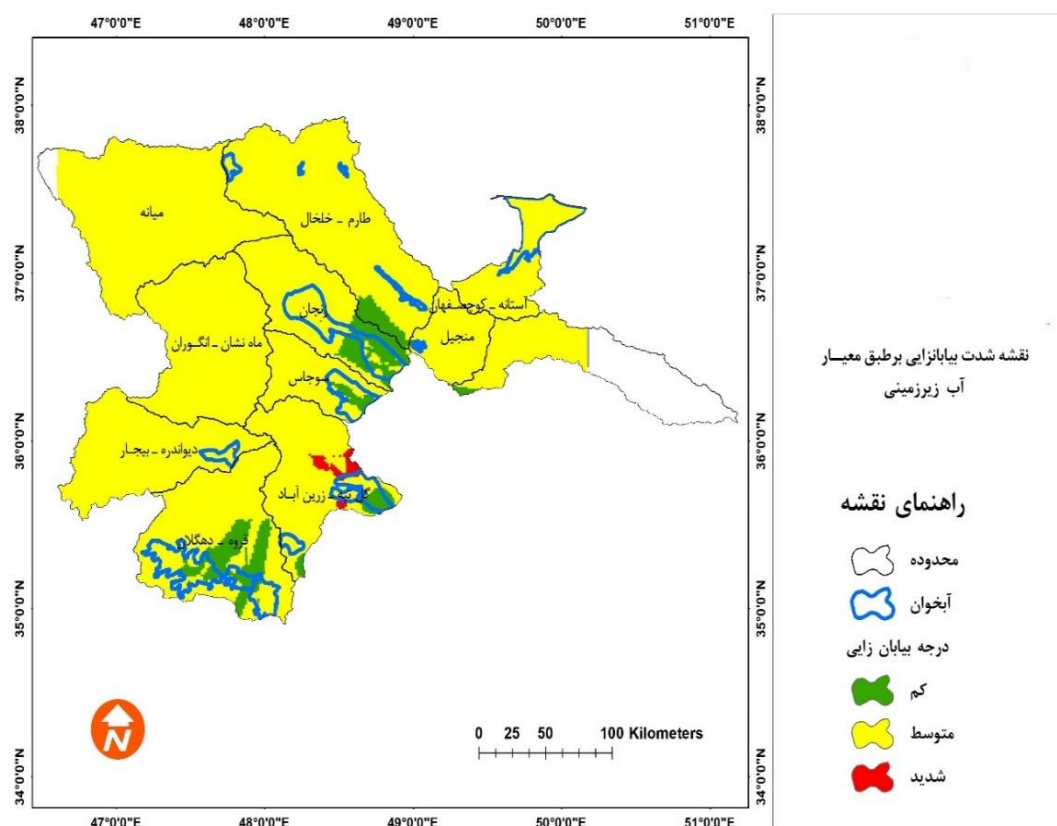
پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی از منظر معیار آب

زیرزمینی

شکل ۷ پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی حوضه آبریز سفیدرود از منظر معیار آب زیرزمینی که میانگین هندسی شاخص‌های افت، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم است، نشان می‌دهد. با توجه به این نقشه، در اکثر نواحی شمالی و غربی حوضه از منظر معیار آب زیرزمینی شدت بیابان‌زایی در کلاس‌های متوسط قرار دارد. و در اکثر نواحی جنوبی و شرقی حوضه که در استان کردستان و زنجان قرار دارند احتمال شدت بیابان‌زایی شدید می‌باشد (شکل ۷). همچنین نقشه شدت بیابان‌زایی نشان داد که محدوده گل-تپه-زرین‌آباد جزء بدترین محدوده نسبت به سایر محدوده‌های از منظر معیار آب زیرزمینی در حوضه سفیدرود می‌باشد.

مساحت طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی از منظر معیار

آب زیرزمینی به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی در حوضه آبریز سفیدرود در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج جدول نشان داد که احتمال شدت بیابان‌زایی طبقه متوسط با ۵۳۵۷۶۱۰ هکتار (حدود ۹۰ درصد) بیشترین سهم را دارد و حدود ۲۳۸۱۲ هکتار از منطقه گل-تپه-زرین‌آباد نیز در دارای احتمال شدید بیابان‌زایی می‌باشند. لازم به ذکر است که هیچ محدوده مطالعاتی نیز در کلاس شدت بیابان‌زایی بسیار شدید قرار نگرفته اند. مقایسه نقشه‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که شاخص هدایت الکتریکی بیش‌ترین انطباق را در مقایسه با دیگر شاخص‌های مورد مطالعه با شدت بیابان‌زایی دارد. بنابراین، می‌توان گفت که هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین نقش را در تعیین شدت بیابان‌زایی در حوضه سفیدرود دارد که با نتیجه (Saleh et al., 2023) همخوانی دارد.



شکل ۷- پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی طبق معیار آب زیرزمینی در حوضه سفیدرود

Fig. 7- Zoning intensity of desertification according to groundwater criteria in the Sefid-Rud basin

جدول ۸- درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی بر طبق معیار آب زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود

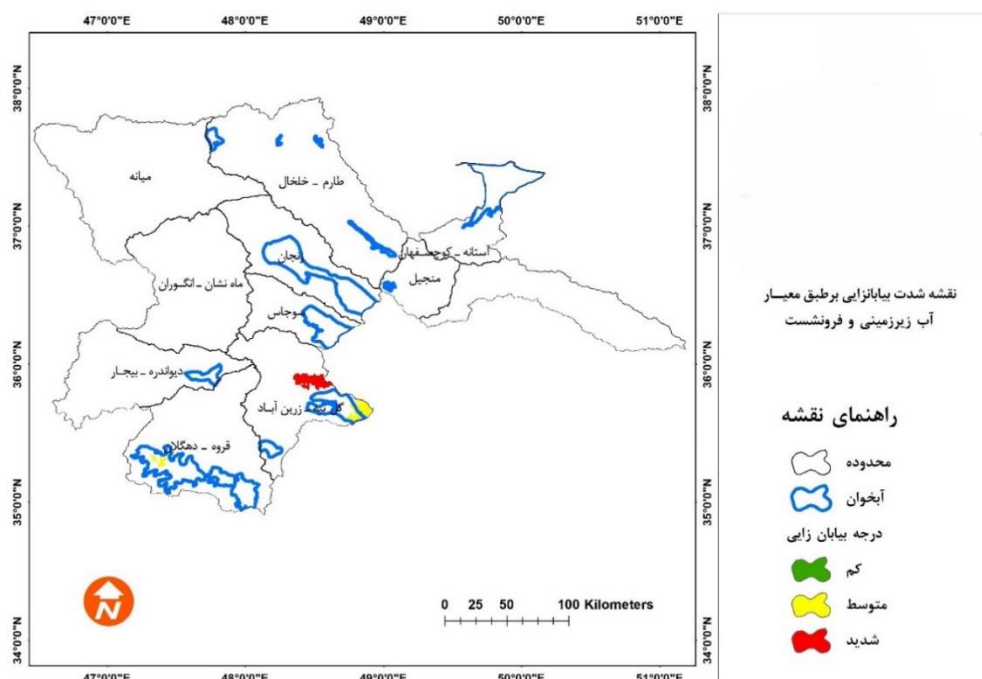
Table 8. The percentage of the area of desertification intensity classes according to the underground water criteria in the Sefid-Rud basin

درصد Percent	مساحت (هکتار) area (hectares)	شدت بیابان‌زایی Intensity of desertification
9/6	571478	کم Low
90	5357610	متوسط moderate
0/4	23812	شدید intense

زیرزمینی و نرخ فرونشست در شکل ۸ نشان داده شده است. نقشه شدت بیابان‌زایی در ناحیه فرونشست نشان داد که محدوده گل‌تپه-زرین‌آباد با کلاس بیابان‌زایی شدید از وضعیت نامطلوب‌تری نسبت به محدوده قروه-دهگلان برخوردار می‌باشد. درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی بر طبق معیار آب زیرزمینی در حوضه سفیدرود در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج جدول موید این مطلب که در حالت فرونشست، احتمال شدت بیابان‌زایی طبقه متوسط با ۲۳۸۵۸ هکتار بیشترین سهم را به خود اختصاص داده و حدود ۴۱۰ هکتار از منطقه گل‌تپه-زرین‌آباد دارای بیابان-زایی با طبقه شدید می‌باشد.

پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی در محدوده‌های مواجه با فرونشست زمین

جهت بررسی معیار آب و امتیازدهی به این معیار در منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل مذکور و داده‌های در دسترس، از چهار شاخص افت سفره آب زیرزمینی، نسبت جذب سدیم، هدایت الکتریکی و فرونشست زمین استفاده شده است. بعد از ارزیابی داده‌های کمی و کیفی، در نرم افزار (GIS Arc) برای چهار شاخص افت، هدایت الکتریکی و نسبت جذبی سدیم پهنه بندی صورت گرفت، شدت بیابان-زایی هر شاخص و سپس معیار آب زیرزمینی محاسبه گردید. شدت بیابان‌زایی میانگین هندسی دو معیار آب



شکل ۸- پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی طبق معیار آب زیرزمینی و فرونشست در حوضه سفیدرود

Fig. 8- Zoning intensity of desertification according to the criterion of underground water and subsidence in Sefid-Rud basin

در حالی که بدون در نظر گرفتن فرونشست اکثر منطقه مذکور در شدت بیابان‌زایی متوسط قرار می‌گیرد. در صورتی که (Zolfaghari and Khosravi 2016) و Soleimanpour *et al.* (2024) در ارزیابی شدت بیابان‌زایی با استفاده از مدل IMDPA در منطقه سراوان

و رفسنجان نشان دادند که به ترتیب عمده منطقه در طبقه بیابان‌زایی متوسط و شدید در استان سیستان و بلوچستان و طبقه کم، متوسط و شدید در استان کرمان قرار گرفته است که با یافته‌های این پژوهش همخوانی دارد.

جدول ۹- درصد مساحت طبقات شدت بیابان‌زایی بر طبق معیار آب زیرزمینی در حوضه سفیدرود
Table 9. Area percentage of classes of desertification intensity according to groundwater criteria in Sefid-Rud basin

درصد Percent	مساحت (هکتار) area (hectares)	شدت بیابان‌زایی Intensity of desertification
9/6	410	کم Low
51/5	23858	متوسط moderate
47/6	22028	شدید intense

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی میزان اثر افت و تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی همچنین فرونشست زمین در بیابان‌زایی و تخریب اراضی حوضه سفیدرود انجام شد. نتایج نشان داد که عامل هدایت الکتریکی آب زیرزمینی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در شدت بیابان‌زایی داشته باشد از طرفی بررسی‌های انجام گرفته بر روی متوسط وزنی شاخص‌ها نشان می‌دهد شاخص نسبت جذب سدیم کم‌ترین تأثیر را در منطقه دارند. نتایج حاصل از تلفیق سه پارامتر معیار آب زیرزمینی با مدل IMDPA در حوضه سفیدرود نشان داد حدود ۹۰ درصد از حوضه دارای وضعیت متوسط بیابان‌زایی می‌باشد که می‌تواند ناشی از تأثیر وضعیت متوسط شاخص هدایت الکتریکی در بخش قابل توجهی از حوضه باشد. با این وجود تأثیر افت سطح آب زیرزمینی در مناطقی که دارای وضعیت شدید بیابان‌زایی از منظر شاخص هدایت الکتریکی بودند سبب شده این مناطق بر طبق معیار آب زیرزمینی دارای وضعیت خیلی‌شدید بیابان‌زایی باشند که این شرایط به خوبی در محدوده‌های مطالعاتی گل‌تپه-زرین‌آباد قابل تشخیص است. بطور کلی بررسی پارامترهای کیفیت و

کمیت آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی حوضه سفیدرود نشان داد پارامتر هدایت الکتریکی آب زیرزمینی بیشترین تأثیر را در ایجاد شرایط بیابان‌زایی و تخریب سرزمین دارند. نرخ فرونشست در محدوده‌های دارای اطلاعات فرونشست نشان داد تنها دو محدوده مطالعاتی شامل گل‌تپه-زرین‌آباد و قروه-دهگلان دچار فرونشست شده‌اند و حداکثر میزان فرونشست در این مناطق ۱۲/۳ سانتیمتر در سال و کمترین میزان فرونشست به کمتر از ۱ سانتیمتر در سال می‌رسد. بطوریکه بیشترین نرخ فرونشست در محدوده گل‌تپه-زرین‌آباد مشاهده می‌شود. ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی براساس دو معیار آب زیرزمینی و فرونشست نشان داد شدت بیابان‌زایی در کل حوضه برطبق این دو معیار در سه طبقه کم، متوسط و شدید قرار می‌گیرد که بیشترین سطح مربوط به شدت متوسط با مساحت ۵۱/۵ درصد و سپس طبقه شدید با مساحت ۴۷/۶ درصد می‌باشد. یافته‌های شدت بیابان‌زایی از منظر معیار آب زیرزمینی (سه شاخص افت سفره آب زیرزمینی، نسبت جذب سدیم و هدایت الکتریکی) نشان داد که در بین محدوده‌های مطالعاتی، بیابان‌زایی محدوده قروه-دهگلان و گل‌تپه-زرین‌آباد نسبت به دیگر محدوده‌ها از

زمینه شاخص‌ها و عوامل دیگر مؤثر بر بیابان‌زایی نظیر سازندهای تبخیری در منطقه، شیب ملایم سطح ایستابی در دشت، وجود لایه‌های نیمه‌تراوا یا ناتراوا، کمبود جریان آب زیرزمینی از بالادست و نفوذ آب شور از رودخانه‌های شور به سفره‌های حاشیه رودخانه در حوضه سفیدرود نیز توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از بخشی از نتایج طرح پژوهشی با کد مصوب ۹۹۰۵۴۳-۹۹۰۲۵-۰۳۰-۰۹-۰۱ در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (تات) است و بدین‌وسیله از مسئولین محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سرکار خانم‌ها دکتر سکینه لطفی‌نسب، سمیرا زندفر و جناب آقای دکتر عادل جلیلی قدردانی به عمل می‌آید.

پی‌نوشت‌ها

¹ MEDALUS

² Food and Agriculture Organization- United Nation Environment Program

³ Mediterranean Desertification and Land Use

⁴ Environmentally Sensitive Areas

⁵ Iranian Model of Desertification Potential Assessment

References

Abdi, J. (2007). Studying and preparing desertification map based on IMDPA model with emphasis on two criteria of water and soil (Abuzidabad). Master's thesis, Faculty of Natural Resources, Tehran University (In Persian).

Abuzaid, A.S. and A.D. Abdelatif. (2022). Assessment of desertification using modified MEDALUS model in the north Nile Delta, Egypt. *Geoderma*. 45: 115400. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115400>.

Ahmadi, H. (2015). The final report of the comprehensive service description and methodology for determining the criteria and indicators for desertification evaluation in Iran. Faculty of Natural Resources, Tehran University, 125 pages (In Persian).

شدت بالاتری برخوردار است که دلیل آن تاثیر هدایت الکتریکی معیار آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین نقشه شدت بیابان‌زایی از منظر معیار آب زیرزمینی و فرونشست نشان داد که محدوده گل‌تپه-زرین‌آباد نسبت به سایر محدوده‌ها وضعیت نامناسب‌تری داشته و از این نظر در طبقه شدت بیابان‌زایی شدید قرار دارد. با این وجود بدلیل اینکه نقشه فرونشست کل محدوده‌های مطالعاتی را پوشش نمی‌دهد نمی‌توان نظر قطعی راجع به این مسئله داد. بطورکلی نتایج حاصل از ارزیابی شدت بیابان‌زایی در حوضه سفیدرود نشان داد مهمترین عامل در تخریب سرزمین تغییر کلاس از متوسط به شدید پس از ورود نرخ فرونشست نیز مشاهده می‌گردد. در این راستا و با توجه به نقش فعالیت‌های انسانی در افت سطح آب زیرزمینی همچنین افت کیفی آب‌های زیرزمینی، اقداماتی نظیر تهیه دستورالعمل فنی استفاده از آب‌های زیرزمینی، اجرای برنامه‌های مدیریتی جهت حفظ پوشش گیاهی جنگل‌ها و مراتع و نیز اصلاح الگوی کشت توصیه می‌شود. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌ها و شدت بیابان‌زایی تهیه شده در این مطالعه نیز قابلیت استفاده توسط کارشناسان جهت آمایش سرزمین و ارائه راهکارهای پیشنهادی و اعمال روش‌های مدیریتی مناسب با هدف جلوگیری از گسترش و پیش‌روی اراضی شور و بیابانی را دارند. انجام پژوهش در

منابع

Ajal Louyan, R; Bahadran, B. (1998). Correlation of underground water fluctuations with landslides, subsidence, and cracks on the surface of the earth (review of objective cases). Proceedings of the second conference of the Iranian Geological Society, 25-37 (In Persian).

Alesheikh, A., Chatrsimab, Z., Vosoghi, B., Modiri, M., & Pakdaman, M. S. (2022). Surveying subsurface abandonment due to groundwater irregular removal using radar interferometry technique, Marvdasht Aquifer. *Watershed Engineering and Management*, 14(1), 114-125. Doi: 10.22092/ijwmse.2018.116621.1400 (In Persian).

Ansari, H, & Davari, K. (2007). Zoning Drought Using Standard Precipitation Index (SPI) In GIS Environment Case Study of Khorasan Province.

Geographical Research Quarterly, 39(60), 97-108. (In Persian).

Behnia, M., Zehtabian, G., Khosravi, H., Ahmadali, K., Nazari Samani, A., & Mesbahzadeh, T. (2021). Investigating the relationship between desertification criteria and land use change and providing operational monitoring methodology Using IMDPA. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(29), 69-86. doi: 10.22111/jneh.2020.33487.1630. (In Persian)

Bezerra, F. G. S., Aguiar, A. P. D., Alvalá, R. C. S., Giarolla, A., Bezerra, K. R. A., Lima, P. V. P. S., & Arai, E. (2020). Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. *Ecological Indicators*, 117, 106579. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106579.

Borna, R. (2021). Analysis of Desertification Use IMDPA Model with Emphasis on Climate and Vegetation Criteria (Case Study: Shadegan Town). *Climate Change Research*, 2(6), 19-30. doi: 10.30488/ccr.2021.277914.1040. (In Persian).

Dolatshahi, R. (2007). Preparation of the desertification intensity map based on the IMDPA model with emphasis on the three criteria of water, soil and vegetation (case study of South Garmsar). Master's thesis, Faculty of Natural Resources, Tehran University (In Persian).

Ekhtessasi, M.R.; Mohajeri, S. (1996). Classification method and desertification intensity of lands in Iran. The second national conference on desertification and various methods of desertification, Kerman, Iran (In Persian).

Emadodin, S., Shadieemajd, N., & Arekhi, S. (2020). Analysis of the impact of land use change on groundwater level drop) Case study: Mahidasht, Kermanshah province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(25), 125-142. doi: 10.22111/jneh.2020.31698.1565. (In Persian).

Fatahi, A., Azad, B. and Ara, H. (2017). Desertification Assessment by Using Water Criterion in Iran's Central Arid Regions, *Applied Environmental and Biological Sciences*, 7 (1): 188-197.

Forestry and Rangeland Research Institute. (2022). Comprehensive studies of soil degradation and subsidence under the influence of groundwater sources in plains of Iran. National Research Plan (In Persian).

Geldizadeh, F., Roshan, G., & Ghanghermeh, A. (2023). Monitoring the temporal-spatial changes of desertification in Gavakhoni Basin based on climatic criteria. *Climate Change Research*, 4(13), 55-68. doi: 10.30488/ccr.2023.396869.1133. (In Persian).

Haghgow, K., Rostami, N., Heshmati, M., & Faramarzi, M. (2017). Investigation of

Desertification Potential Using IMDPA Model (Case Study: The Gandomban Plain, Qasr-e-Shirin). *Geography and Environmental Sustainability*, 7(1), 21-33 (In Persian).

Hosseini KhezhAbad A, Vali A, Halabian A, Mokhtari M. (2023) Assessment of the Desertification Intensity Based on soil, Vegetation, and Wind Erosion Criteria in the Northwest of Yazd. *Jwss*. 27 (4) :169-186. URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4373-en.html>.

Huang, Q., Miao, C., Yuan, Y., Qu, Y., & Gou, Y. (2023). Failure analysis of metro tunnel induced by land subsidence in Xi'an, China. *Engineering Failure Analysis*, 145, doi:10.1016/j.engfailanal.2022.106996.

Hamad, K.O., Surucu, A. (2024). Land degradation sensitivity and desertification risk in Harrir region, northern Iraq. *Journal of Heliyon*, 10(5), 1-14. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27123.

Keramatzadeh, M., Fathi, A., & Moazed, H. (2022). Investigate the situation of desertification in south east Ahvaz region using IMDPA model with emphasis on the criteria climate and vegetation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), 153-166. doi: 10.22055/jise.2021.37216.1968 (In Persian).

Lashkaripour, G, R, Rostami Barani, H, Kohandel, A, & Tarshizi, H. (2006). Lowering of underground water level and land subsidence in Kashmir plain. In the 10th conference of the Iranian Geological Society (In Persian).

Lashkaripour, GR; Ghafouri, M; Bagharpour, A Talebian, L. (2007). The effect of the drop of the underground water level on the subsidence. *Proceedings of the first applied geology congress of Iran, Mashhad, Islamic Azad University Mashhad Branch*, 2, 922-916 (In Persian).

Maghami, Y., Ghazavi, R., Vali, A. A., & Sharafi, S. (2011). Evaluation of spatial interpolation methods for water quality zoning using GIS Case study, Abadeh Township. *Geography and Environmental Planning*, 22(2), 171-182. doi:10.1001.1.20085362.1390.22.2.10.3 (In Persian).

Maroufpoor, S., Fakheri Fard, A., & Shiri, J. (2018). Evaluation and zoning the desertification destructive effects using IMPDA model and clustering (case study: Normashir and Rahmatabad plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(1), 123-134. doi: 10.22059/ije.2017.231963.568. (In Persian).

Masoudi M, Shirghir S. (2021). Efficiency Assessment of Desertification Model of IMDPA for Evaluating of Water and Wind Erosions. *jwmr*. 12(23), 12-25. doi:10.52547/jwmr.12.23.12 (In Persian).

Meza Mori, G., Torres Guzmán, C., Oliva-Cruz, M., Salas López, R., Marlo, G., & Barboza, E. (2022). Spatial analysis of environmentally sensitive areas to

- soil degradation using MEDALUS model and GIS in Amazonas (Peru): An alternative for ecological restoration. *Sustainability*, 14(22), doi: 10.3390/su142214866.
- Saleh, I., Khazaei, M., & Naeimi, M. (2023). Desertification intensity affected by groundwater and land subsidence in Maharloo-Bakhtegan watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 171-184. doi: 10.22098/mmws.2022.11906.1187. (In Persian).
- Shahini, Z., Faramarzi, M., Garaee, P., & Alimoradi, S. (2021). Evaluating Desertification Intensity with Emphasis on Groundwater Criteria Using IMDPA Model (Case Study: Mehran Plain in Ilam Province). *Integrated Watershed Management*, 1(1), 17-28. doi: 10.22034/iwm.2021.247940. (In Persian).
- Soleimanpour S M, Naeimi M, Rahmati O, Moatamednia M. (2024) Investigate Desertification using Underground Water and Subsidence Criteria by IMDPA Model (Case Study: Rafsanjan Watershed). *E.E.R.* 14 (2) :126-140. doi:10.61186/jeer.14.2.8. (In Persian).
- Taha, M. M., Elbarbary, S. M., Naguib, D. M., El-Shamy, I. Z. (2017). Flash flood hazard zonation based on basin morphometry using remote sensing and GIS techniques: A case study of Wadi Qena basin, Eastern Desert, Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8, 157-167. doi: 10.1016/j.rsase.2017.08.007.
- Yousefi Mobarhan, E. (2025). Investigating the relationship between SPI and UNEP aridity indices with trend of the dust storm index in the central region of Iran. *Agriculture, Environment & Society*, 5(1), 69-80. doi: 10.22034/jelsa.2025.489843.1089.
- Yousefi Mobarhan, E., & Zandifar, S. (2023). Investigating and temporal monitoring of GRI Index on the fluctuations of groundwater table (Case study: Zanjan Plain). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 12(4), 87-99.
- Yousefi Mobarhan, E and E. Karimi Sangchini., (2021). Continuous Rainfall-Runoff Modeling Using HMS-SMA with Emphasis on the Different Calibration Scale. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 52 (2): 112-119. [https://doi: 10.29417/JCSWC.202106_52\(2\).0005](https://doi.org/10.29417/JCSWC.202106_52(2).0005).
- Yousefi Mobarhan, E., Karimi Sanghchini, E., & Lotfinasabasl, S. (2024). Temporal and spatial investigation of groundwater quality with emphasis on industrial uses in Sefid-Rud Basin. *Water and Soil Management and Modelling*, 4(1), 119-134. doi: 10.22098/mmws.2023.12220.1211
- Yousefi Mobarhan, E, Soleimani, K, & Vahabzadeh, Q. (2022). Evaluation of rapid method of urban flooding based on land features: depth, surface and volume of flooding. *Scientific Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 12(4), 433-450. doi:10.22125/iwe.2022.150762. (In Persian).
- Yousefi Mobarhan, E., Khaleghi, A., & Zandifar, S. (2024). Examining the evolving patterns of recent droughts and climate categorization's impact on groundwater reserves through the utilization of GRI and SPI indices in the southern plain of the Sefidroud Basin, Iran. *Research Square*, 12(1), 1-23. Doi:10.21203/rs.3.rs-4447426/v1.
- Zolfaghari, F., & Khosravi, H. (2016). Assessment of Desertification Severity Using IMDPA Model in Saravan Region. *Geography and Environmental Planning*, 27(2), 87-102. doi: 10.22108/gep.2016.21817. (In Persian).



*This page is intentionally
left blank.*