



FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10 , Number 4 , Winter (2026)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Evaluating Desertification Severity with a Focus on the Land Subsidence Index Associated with Groundwater Depletion in the Abarkooh–Sirjan Basin

Sima Rahimi Bondarabadi^{1*}

*1. Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)

*Email Address: rahimi_si@yahoo.com

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:

2025/09/02

Revised Date:

2025/11/12

Accepted Date:

2025/12/02

Published Date:

2026/02/01

Keywords:

Desertification,
Land subsidence,
Groundwater resources,
IMDPA model,
Abarkooh–Sirjan

ABSTRACT

Land subsidence, resulting mainly from excessive groundwater withdrawal and aquifer degradation, is one of the most serious and irreversible forms of land degradation, often marking the final stage of desertification. Traditional models of desertification assessment have emphasized climate, soil, and vegetation factors, while the role of subsidence has received less attention. Recent approaches, such as the IMDPA model, incorporate groundwater indicators—including groundwater level decline, electrical conductivity (EC), and sodium adsorption ratio (SAR)—together with subsidence data to provide a more comprehensive evaluation of desertification risk. In this study, the Abarkooh–Sirjan watershed was assessed using groundwater level decline, EC, SAR, and land subsidence as key indicators. Thematic layers were prepared and integrated to produce a desertification severity map. Results showed that about 60% of groundwater resources exhibited high salinity ($EC > 5,000 \mu\text{S}/\text{cm}$). SAR values were generally low, except in playa areas where values ranged from 18 to 26. Average groundwater level decline was 54 cm, with maximum values reaching 237 cm. Land subsidence was most severe in the Abarkooh, Bavanat, and Sarchahan aquifers. The final map indicated that over 90% of the area falls within moderate to very severe desertification classes, highlighting subsidence as a decisive criterion for identifying critical zones and guiding sustainable management.

Cite this article: Sima Rahimi Bondarabadi (2026). Evaluating Desertification Severity with a Focus on the Land Subsidence Index Associated with Groundwater Depletion in the Abarkooh–Sirjan Basin, Journal of Environmental Sciences Studies, 10 (4), Pages 10919-10929.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Land subsidence, as an irreversible result of excessive groundwater withdrawal and aquifer degradation, represents one of the final stages of desertification and threatens ecological and economic land functions. Despite its significance, most desertification models focus mainly on climatic, soil, and vegetation factors, with limited attention to subsidence. Recent approaches, however, integrate groundwater indicators—such as level decline, EC, SAR, and subsidence rate—to improve accuracy in assessing land degradation. Models like IMDPA now allow for reclassification of desertification severity and better identification of critical zones. This study therefore evaluates the impact of groundwater depletion, water quality deterioration, and subsidence on desertification in the Abarkouh–Sirjan watershed using the IMDPA model.

Materials and Methods

To this end, thematic layers of groundwater-related indicators—including groundwater level decline, electrical conductivity, sodium adsorption ratio—and land subsidence maps were prepared and classified in terms of desertification risk. Subsequently, by integrating the qualitative and quantitative groundwater degradation maps with the land subsidence map (considered as a soil criterion) through a regional averaging approach, the final desertification severity map was generated. Ultimately, the spatial distribution of desertification intensity was mapped using final desertification risk classes derived from the averaged values of the individual indicators.

Results and Discussion

For the evaluation of desertification status, groundwater quality indicators (EC and SAR) were first examined. Since land subsidence data for the Abarkouh–Sirjan basin were available for the 2015–2016 hydrological year, groundwater quality indices were assessed for 2015–2016 and 2016–2017, and their spatial averages were calculated. Results indicated that approximately 60% of the groundwater resources in the study area exhibited high salinity levels (EC exceeding 5,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). The spatial distribution of SAR revealed that, except for Sirjan and Ghotrooyeh playas (values between 18 and 26), SAR values across the rest of the study area were generally below 18 (low category). The regional average groundwater level decline was about 54 cm for the entire area and 57 cm for aquifers, with variations ranging from 1 cm to 237 cm across the basin. Moreover, land subsidence was most pronounced in the Abarkouh, Bavanat, and Sarchahan aquifers, classified within moderate to very severe categories. The final map demonstrated that more than 90% of the study area fell within moderate to very severe desertification intensity classes.

Conclusion

Analysis of hydrogeological data revealed considerable spatial variability in groundwater level decline across the Abarkouh–Sirjan basin, leading to water quality changes such as increased EC and SAR in certain locations. The land subsidence zoning map also identified vulnerable areas with varying subsidence rates. By integrating groundwater quantitative and qualitative indices with land subsidence data, the final desertification intensity map was produced, showing that more than 90% of the region lies within moderate to very severe categories, of which approximately 10% is classified as very severe and around 40% as severe. Furthermore, desertification severity was concentrated in zones experiencing substantial groundwater decline and high subsidence rates. These findings highlight the critical importance of land subsidence as a key criterion in desertification assessment and demonstrate that integrating hydrogeological and geomechanical data can play a decisive role in identifying critical areas and formulating effective management policies.



ارزیابی شدت بیابان‌زایی با تاکید بر شاخص فرونشست مرتبط با تغییرات منابع آب

زیرزمینی در حوضه ابریز ابرقو-سیرجان

سیما رحیمی بندرآبادی^{*۱}

*۱- استادیار مرکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی استان یزد، سازمان تات

* ایمیل نویسنده مسئول : rahimi_si@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۱۲</p> <p>کلید واژه ها: بیابان‌زایی، فرونشست زمین، منابع آب زیرزمینی، مدل IMDPA، ابرقو-سیرجان.</p>	<p>فرونشست زمین به‌عنوان یکی از جدی‌ترین جلوه‌های تخریب سرزمین، غالباً پیامد برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تغییرات کمی و کیفی مخازن آبی است. این پدیده که ماهیتی غیرقابل بازگشت دارد، در زمره مراحل نهایی فرایند بیابان‌زایی قرار می‌گیرد و می‌تواند کارکردهای اکولوژیکی و اقتصادی سرزمین را به‌شدت مختل سازد. در بسیاری از مدل‌ها و شاخص‌های ارزیابی شدت بیابان‌زایی، تمرکز بر عوامل اقلیمی، خاکی و پوشش گیاهی بوده و معیار فرونشست زمین به‌عنوان شاخصی مستقل و اثرگذار، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، رویکردهای نوین ارزیابی بیابان‌زایی تلاش کرده‌اند با ترکیب شاخص‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی نظیر افت سطح آب، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم با معیار نرخ و گستره فرونشست زمین، تصویری جامع‌تر از وضعیت تخریب سرزمین ارائه دهند. در این چارچوب، مدل‌های ارزیابی همچون IMDPA و نسخه‌های توسعه‌یافته آن، با لحاظ کردن فرونشست به‌عنوان معیاری کلیدی، امکان بازنگری در طبقه‌بندی شدت بیابان‌زایی و شناسایی دقیق‌تر مناطق بحرانی را فراهم ساخته‌اند. از این رو، ادغام داده‌های هیدروژئولوژیکی با شاخص‌های ژئومکانیکی نظیر فرونشست زمین، گامی ضروری در تحلیل و پایش فرآیندهای تخریب سرزمین محسوب می‌شود. هدف از انجام این مطالعه بررسی میزان تأثیر افت سطح و تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در بیابان‌زایی و تخریب اراضی در حوزه ابرقو-سیرجان با استفاده از مدل IMDPA است. بدین منظور، ابتدا توزیع مکانی شاخص‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی شامل افت سطح تراز آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم و نیز نقشه فرونشست زمین و طبقه‌بندی آنها به لحاظ خطر بیابان‌زایی برآورد گردید. سپس با تلفیق نقشه‌های شدت تخریب کیفی و افت سطح آب زیرزمینی و نیز نقشه فرونشست زمین به‌عنوان معیار خاک با استفاده از میانگین منطقه‌ای، نقشه نهایی شدت بیابان‌زایی به دست آمد. نقشه پهنه بندی شدت بیابان‌زایی با استفاده از کلاس‌های خطر نهایی بیابان‌زایی با توجه به میانگین مقادیر کلاس‌های خطر شاخص‌های کمی و کیفی به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد منابع آب زیرزمینی منطقه دارای شوری شدید (EC بیش از ۵۰۰۰ میکروزیمنس) و میانگین افت سطح آب زیرزمینی برابر با ۵۴ سانتی‌متر در سال است. همچنین فرونشست زمین در آبخوان‌های ابرقو، بوانات و سرچاهان بیشترین شدت را داشته و در محدوده متوسط تا خیلی شدید طبقه‌بندی گردیده است. نقشه نهایی نشان داد که بیش از ۹۰ درصد منطقه در محدوده شدت متوسط تا خیلی شدید بیابان‌زایی قرار دارد. یافته‌ها بر اهمیت شاخص فرونشست زمین به‌عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی شدت بیابان‌زایی تأکید داشته و نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی می‌تواند در شناسایی مناطق بحرانی و تدوین سیاست‌های مدیریتی مؤثر نقش بسزایی ایفا کند.</p>

بیابان‌زایی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهانی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب تخریب شدید سرزمین و کاهش بهره‌وری منابع طبیعی می‌شود. در این میان، برداشت بی‌رویه و ناپایدار از منابع آب زیرزمینی، به عنوان عامل اصلی کاهش کمی و افت کیفیت آب‌های زیرسطحی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تسریع روند بیابان‌زایی ایفا می‌کند. یکی از پیامدهای مهم این فرآیند، فرونشست زمین است که با تخریب ساختار خاک، تغییر در کارکردهای اکوسیستم و کاهش قابلیت‌های تولیدی اراضی، تهدیدی جدی برای پایداری محیط‌زیست و اقتصاد منطقه محسوب می‌شود. با وجود اهمیت فرونشست زمین در تخریب سرزمین، بسیاری از مدل‌ها و شاخص‌های ارزیابی بیابان‌زایی، به طور محدود به این پدیده توجه کرده‌اند یا نقش آن را به عنوان شاخصی مستقل نادیده گرفته‌اند. این خلأ علمی موجب شده است تا ارزیابی‌های جامع‌تر و دقیق‌تر در زمینه شدت بیابان‌زایی با لحاظ تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی و فرونشست زمین به عنوان یک نیاز ضروری مطرح شود. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی شدت بیابان‌زایی با تاکید بر شاخص فرونشست زمین ناشی از تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز ابرقو-سیرجان است. این مطالعه با استفاده از داده‌های هیدروژئولوژیکی و تحلیل‌های زمین‌آماری، درصد است تا نقش فرونشست زمین را در فرآیند بیابان‌زایی شناسایی و مدلسازی نماید، تا بدین وسیله بتوان راهکارهای مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش تخریب سرزمین ارائه داد. نتایج این پژوهش می‌تواند علاوه بر ارتقای دانش علمی در حوزه آب‌بخیزداری و بیابان‌زدایی، در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های استراتژیک مرتبط با حفاظت از منابع طبیعی و توسعه پایدار مناطق خشک کشور نقش موثری ایفا کند. بیابان‌زایی به عنوان یک فرایند پیچیده و چندعاملی، تحت تأثیر عوامل متنوعی از جمله تغییرات اقلیمی، ویژگی‌های خاک، کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی و همچنین تغییرات ساختاری زمین قرار دارد. (Müller et al., 2020) برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از عوامل انسانی کلیدی، نه تنها باعث کاهش سطح و افت کیفی این منابع می‌شود، بلکه به وقوع فرونشست زمین منجر شده مطالعات متعددی به بررسی نقش برداشت غیرمجاز و بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و اثرات آن بر فرونشست زمین پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، مطالعه در دره مرکزی کالیفرنیا نشان داد که افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی به فرونشست قابل توجه زمین منجر شده و این پدیده آسیب‌های گسترده‌ای به زیرساخت‌ها و محیط زیست منطقه وارد کرده است (Voss et al., 2013). در ادامه، پژوهشی در سال ۲۰۱۹ با استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از دور (InSAR) و داده‌های هیدروژئولوژیکی روش‌های موثری را برای پایش فضایی و زمانی فرونشست زمین در مناطق خشک ارائه گردید که کاربردهای ارزشمندی در ارزیابی تخریب سرزمین دارد (Peyret et al., 2019). مطالعه دیگری نشان داده است که برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در شمال چین موجب افزایش شوری خاک شده و در نهایت فرایند بیابان‌زایی را تسریع می‌کند (Gao et al., 2020). همچنین شاخصی نوین معرفی گردید که فرونشست زمین را به عنوان پارامتری کلیدی در ارزیابی ریسک بیابان‌زایی لحاظ می‌کند و امکان طبقه‌بندی دقیق‌تر مناطق آسیب‌دیده را فراهم می‌آورد (Wang et al., 2018). در ادامه، پژوهشی با تلفیق داده‌های هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی، اثربخشی شاخص فرونشست زمین را در مدل‌سازی شدت بیابان‌زایی به طور قابل توجهی نشان داد (Azadi & Rahimi., 2021). تحلیل‌های فضایی و زمانی در دشت شمال چین رابطه مستقیم و معناداری بین افت منابع آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین نشان دادند که مدیریت همزمان این دو عامل را برای حفظ بهره‌وری کشاورزی و کاهش بیابان‌زایی ضروری می‌سازد (Liu et al., 2017). مشابه آن، در سال ۲۰۱۹ تأکید کرده‌اند که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی باعث تضعیف ساختار خاک، افزایش فرسایش و تشدید بیابان‌زایی در مناطق خشک می‌شود (Khan & Saeed, 2019). مطالعات Zhang و همکاران نشان می‌دهد که افت کیفیت آب زیرزمینی به همراه فرونشست زمین به عنوان دو عامل همزمان، تأثیر قوی‌تری در فرآیند بیابان‌زایی دارند و لازم است این دو به صورت همزمان در مدل‌های ارزیابی تخریب سرزمین لحاظ شوند (Zhang et al., 2022). همچنین در تحقیق دیگری بر ضرورت تدوین سیاست‌های مدیریت پایدار آب تاکید شده است که بتواند ضمن تأمین نیازهای آبی، از فرونشست زمین جلوگیری کند و از تخریب منابع طبیعی حفاظت نماید (Morris et al., 2015). در نهایت، پژوهش‌های اخیر Rahimi و همکاران در سال ۲۰۲۳ در ایران با استفاده از مدل‌های تلفیقی و بهره‌گیری از داده‌های فرونشست زمین و منابع آب زیرزمینی، مدل‌هایی دقیق‌تر برای ارزیابی شدت بیابان‌زایی ارائه کرده‌اند که در شناسایی مناطق بحرانی و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مؤثر بوده و اهمیت گنجاندن شاخص فرونشست زمین را به عنوان یک متغیر کلیدی برجسته می‌سازد (Rahimi et al., 2023). مطالعه اخیر Zhang و همکاران (۲۰۲۴) نیز با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، توانست پیش‌بینی دقیقی از شدت بیابان‌زایی و فرونشست زمین ارائه دهد که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی کمک شایانی کند. این پیشرفت‌ها نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های متنوع و کاربرد فناوری‌های نوین در مدل‌سازی، کلید موفقیت در مقابله با

بیابان‌زایی و فرورنشست زمین است (Zhang et al., 2024). شدت خطر بیابان‌زایی در دشت جیرفت با استفاده از "مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی" و با تأکید بر معیار زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دشت جیرفت از لحاظ بیابان‌زایی و از حیث معیار زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی در کلاس متوسط طبقه‌بندی می‌گردد که استفاده ناپایدار از اراضی و مصرف بی‌رویه منابع طبیعی بستر مناسبی را به منظور تبدیل خطر به یک بحران محیطی ممکن پذیر نماید (نژاد افصلی، ۱۴۰۲). این مجموعه تحقیقات، تأکید بر لزوم تلفیق شاخص‌های هیدروژئولوژیکی و ژئومکانیکی مانند فرورنشست زمین در ارزیابی‌های بیابان‌زایی دارد و نشان می‌دهد که رویکردهای چندبعدی، پایه‌ای برای توسعه راهکارهای مدیریت پایدار منابع طبیعی و مقابله مؤثر با تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌کنند.

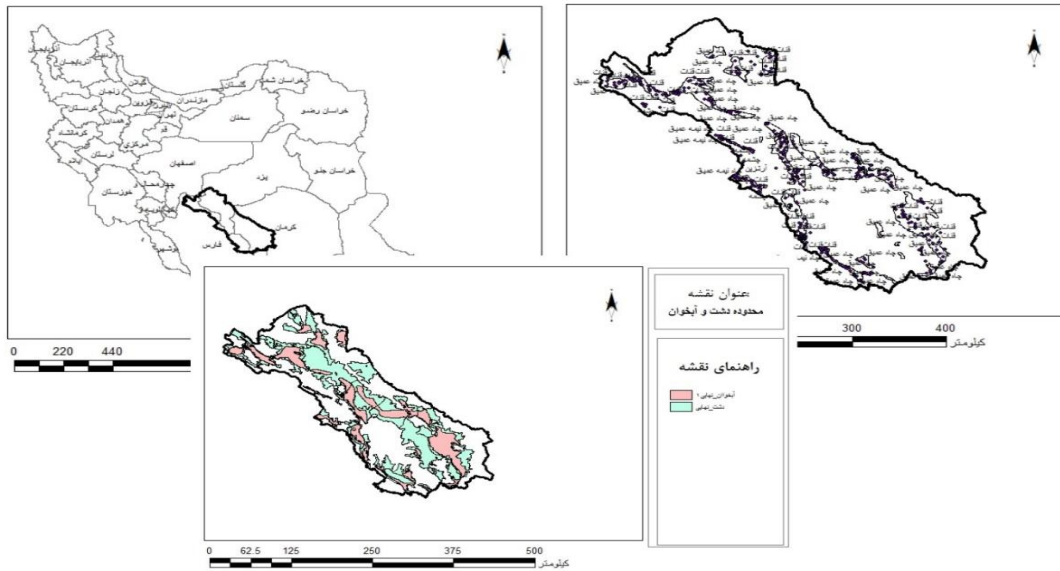
۲- روشها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

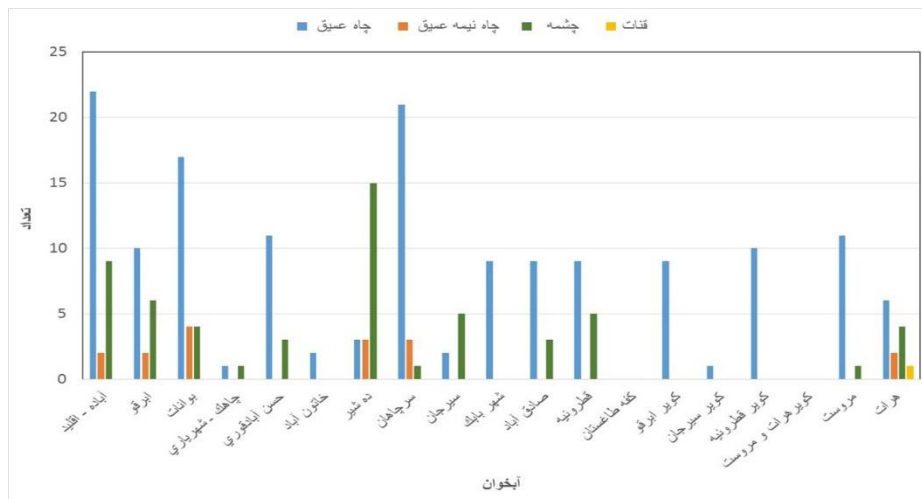
حوضه آبریز کویرهای ابرقو- سیرجان، در بخش مرکزی ایران بین طولهای جغرافیایی ۸' و ۵۲° الی ۲۸' و ۵۶° شرقی و عرضهای ۳۷' و ۲۸° الی ۵۷' و ۳۱° شمالی گسترده است (شکل ۱). بلندترین نقطه در این منطقه قله بیدخان با ارتفاع ۳۳۴۷ متر از سطح دریای آزاد و حداقل ارتفاع حوضه، در کویر سیرجان ۱۰۷۷ متر می‌باشد. میزان بارندگی براساس آمار ایستگاه سینوپتیک سیرجان بین ۳۵/۲ الی ۳۳۲/۲ میلی‌متر در سال در دشت متغیر است و میانگین بلندمدت آن برابر ۱۴۱/۱ میلی‌متر است. این منطقه دارای تابستانهای گرم و خشک و زمستانهای سرد و خشک بوده ولی در بلندبدهای شیرکوه و در ارتفاعات بالاتر از ۱۳۷۷ متر از سطح دریا بارندگی غالباً زیاده‌تر بوده و اقلیم معتدل تری حاکم است. موقعیت اقلیمی و بالنتیجه کمبود بارندگی، موجب کاهش پوشش گیاهی در منطقه می‌باشد و ریگزارهای متعددی در بخشهای مختلف حوضه گسترده اند. حوضه آبریز کویر ابرقو- سیرجان در جنوب مرکزی کشور و در حد فاصل بخش انتهایی ارتفاعات زاگرس و رشته کوههای مرکزی ایران گسترده است. در این حوضه کلیه رودخانه‌ها و مسیل‌ها به سمت کویرهای سیرجان، قطروئیه، مروست و ابرقو جریان می‌یابند. این کویرها و پهنه‌های اطراف آنها پایانه‌های شبکه زهکشی آبهای سطحی و زیرزمینی حوضه‌ها می‌باشند. کویرها و شوره‌زارها پهنه‌های وسیعی هستند که در سال‌های پرباران بخشی از سطح آنها را آبهای ناشی از جریان سیلاب‌ها پر نموده و سپس تبخیر می‌شود. در این منطقه مسیل‌هایی که در حوضه آبریزشان تبادل جریان سطحی و زیرزمینی وجود دارد، دارای جریان دائمی با دبی پایه کم می‌باشند. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات هیدروژئولوژیکی نظیر افت سطح تراز آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR) و نقشه‌های فرورنشست زمین هستند. منابع آب زیرزمینی در این حوزه شامل ۴۲۱۳ عددچاه (عمیق و نیمه عمیق)، ۳۷۱ عدد چشمه و ۱۶۳۶ قنات می‌باشد (شکل ۲). که از این تعداد منابع داده‌های نمونه برداری شده در دسترس پس از ارزیابی‌های کمی و کیفی نمونه‌ها تعداد ۳۸۱ داده برای بررسی کیفیت منابع آب و ۵۳۳ داده برای ارزیابی‌های کمی استفاده شده است. برای پهنه‌بندی شاخص‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی پس از ارزیابی چند روش برآورد توزیع مکانی، از مناسبترین روش درون‌یابی استفاده شد. نقشه فرورنشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌های سنتینل-۱ (تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور) مربوط به سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ استخراج گردید و نرخ و میزان فرورنشست در محدوده مورد مطالعه تعیین شد.

۲-۲- مدل IMDPA

در مرحله بعد، برای طبقه‌بندی شدت بیابان‌زایی و شناسایی مناطق بحرانی، از مدل توسعه‌یافته IMDPA بهره گرفته شد که شاخص فرورنشست زمین را به عنوان یکی از معیارهای اصلی در ارزیابی تخریب سرزمین در نظر می‌گیرد. تجزیه و تحلیل‌های آماری و مکانی شامل همبستگی بین پارامترهای آب زیرزمینی و نرخ فرورنشست، به منظور تعیین روابط علی و بررسی اثرات متقابل انجام گرفت همانطور که اشاره شد در این مطالعه به منظور ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی حوزه آبخیز دریاچه نمک از جدیدترین مدل ایرانی ارزیابی بیابان‌زایی استفاده شد. این مدل بر پایه مدل مدالوس که توسط کمیسیون بین‌المللی ارزیابی ارائه شده است، می‌باشد. از مهمترین مزایای این مدل توانایی ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی با تعداد شاخص‌های محدود است (صالح و همکاران، ۱۴۰۲). همچنین می‌توان پارامترهای مؤثر بر بیابان‌زایی را بررسی کرده و شدت بیابان‌زایی را تعیین نمود (یعقوبی و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و محدوده دشتها و آبخوانها



شکل ۲. منابع آب زیرزمینی واقع در حوضه

از دیگر مزایای این روش استفاده کمتر از نظر کارشناسی در مقایسه با سایر روش‌ها می‌باشد. در مدل **IMDPA** جهت کمی کردن معیارها از شاخص‌های مربوطه کمک گرفته می‌شود. همانطور که اشاره شد، مدل **IMDPA** دارای ۹ معیار بوده که در این پژوهش برای تهیه نقشه شدت بیابان‌زایی از دو معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست به عنوان معیارهای کلیدی استفاده می‌گردد. با توجه به اطلاعات دسترس و اهداف پژوهش، حاضر شاخص‌های معیار آب، پارامترهای هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم و افت سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شد. برای شاخص میزان سطح فرونشست نیز میانگین نرخ فرونشست در سالهای آبی ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶ استفاده شد. در مرحله بعد هر شاخص بر پایه اثر آن در بیابان‌زایی وزنی بین ۱ تا ۴ داده شد. وزن‌دهی بصورت خطی و نسبت برابر بود، بطوریکه ارزش عددی ۱ بهترین و ارزش ۴ بدترین وزن می‌باشد. بعدبندی شاخص‌ها طبق فاکتورهای تعریف شده در معیارهای اقتصادی و اجتماعی و معیارهای خاک صورت گرفت. ارزش عددی که هر شاخص در معیار فرونشست و آب زیرزمینی به خود گرفت، به منظور بررسی تاثیر نرخ فرونشست بر بیابان‌زایی، در دو حالت محاسبه گردید. در حالت اول با در نظر گرفتن معیار فرونشست و معیار آب زیرزمینی، و در حالت دوم بدون لحاظ کردن معیار فرونشست محاسبه گردید. به این منظور از شاخص ترکیبی استفاده شد. در ادامه به اختصار برای نحوه محاسبه معیارهای آب زیرزمینی و فرونشست توضیح داده می‌شود. معیارهای آب زیرزمینی با شاخص‌های هدایت الکتریکی، براساس میانگین سه ساله مقادیر هدایت الکتریکی و افت سطح آب زیرزمینی طبق جدول ۱ استانداردسازی گردید و ارزش عددی این معیار طبق رابطه ۱ تعیین شد. بدین منظور شاخص نرخ فرونشست مدل طبق جدول ۲ امتیاز دهی شد.

(۱) $GWI =$ (افت آب زیرزمینی * هدایت الکتریکی * نسبت جذب سدیم)

پس از محاسبه معیارهای آب زیرزمینی و فرونشست و تهیه نقشه‌های مرحله، شاخص نهایی وضعیت بیابان‌زایی برطبق مدل IMDPA رابطه ۲ براساس میانگین هندسی معیارها محاسبه شد.

$$DM = (GWI \times SRI)^{1/2}$$

$$DM = (GWI \times SRI)^{1/2}$$

(۲)

که در آن:

GWI: معیار آب زیرزمینی،

SRI: معیار نرخ فرونشست

DM: وضعیت فعلی بیابان‌زایی می‌باشد.

بنابراین مدل IMDPA شدت بیابان‌زایی را در چهار کلاس کم (۱)، متوسط (۲)، شدید (۳) و بسیار شدید (۴) طبقه‌بندی می‌کند (جدول ۳). کلاس‌ها و وزن‌های اتخاذ شده برای ارزیابی وضعیت معیارهای مدل IMDPA را نشان می‌دهد.

جدول ۱. امتیازدهی شاخص‌های معیار آب زیرزمینی در مدل IMDPA

شاخص	کم (۱)	متوسط (۲)	شدید (۳)	شدید خیلی (۴)
هدایت الکتریکی (EC)	$75 >$	۲۲۵۰ - ۷۵۰	۵۰۰۰ - ۲۲۵۰	$5000 >$
نسبت جذب سدیم (SAR)	$18 >$	۲۶ - ۱۸	۲۶ - ۳۲	$32 >$
افت آب زیرزمینی (سانتیمتر در سال)	$20 >$	۲۰ - ۳۰	۳۰ - ۵۰	$50 >$

جدول ۲. امتیازدهی شاخص معیار نرخ فرونشست در مدل IMDPA

شاخص	کم (۱)	متوسط (۲)	شدید (۳)	شدید خیلی (۴)
فرونشست (سانتیمتر در سال)	$-1/49 >$	-۲/۹۹ - -۱/۵	-۳ - -۵/۹۹	$-6 <$

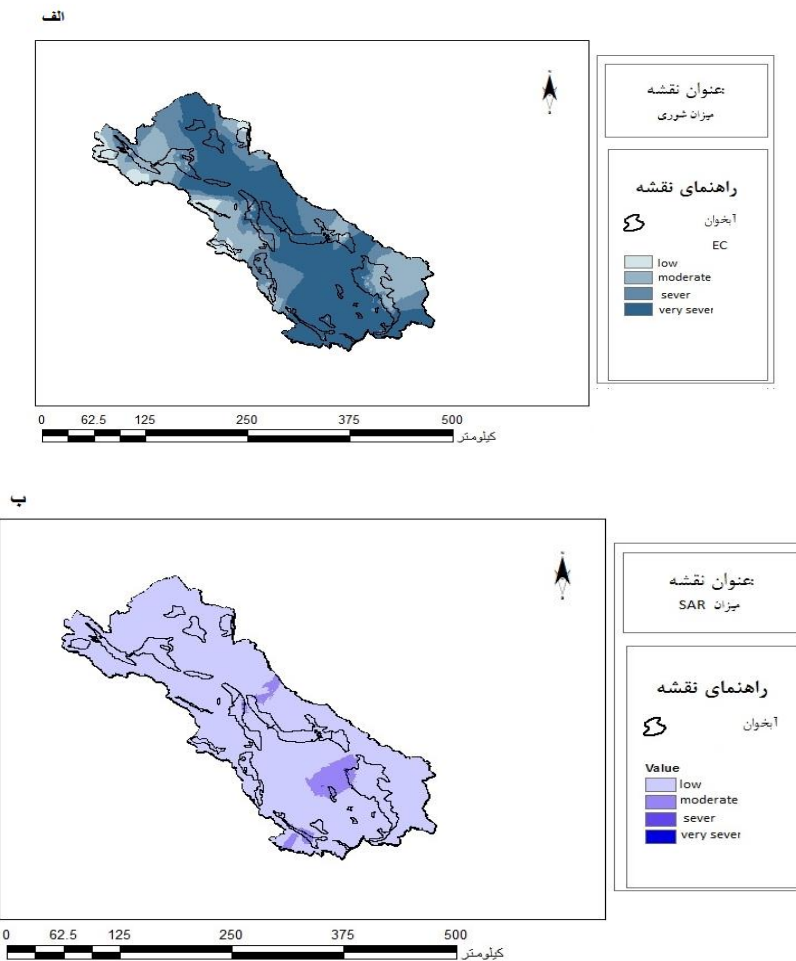
جدول ۳. طبقات کلاس‌های شدت بیابان‌زایی مدل IMDPA

کلاس شدت بیابان‌زایی	امتیاز
کم	۰/۵ - ۱/۵
متوسط	۱/۵ - ۲/۵
شدید	۲/۵ - ۳/۵
بسیار شدید	۳/۵ - ۴

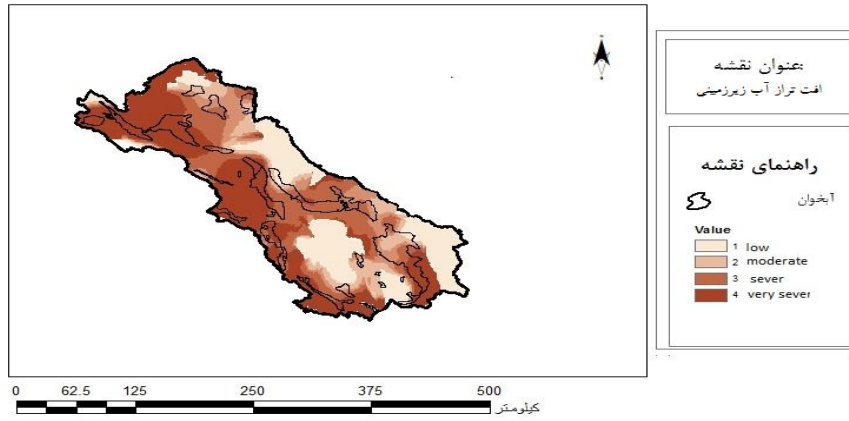
۳- بحث و نتایج

به منظور ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی ابتدا شاخصه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی (هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم) بررسی گردید. از آنجاییکه نقشه فرونشست حوضه ابرقو - سیرجان در سال آبی ۱۳۹۴-۹۵ موجود و در دسترس بود، این شاخصه‌ها نیز برای سال‌های ۱۳۹۴-۹۵ و ۱۳۹۵-۹۶ بررسی و توزیع مکانی میانگین آنها محاسبه گردید. شکل ۳ نقشه توزیع مکانی میانگین دو ساله این دو شاخص را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است میزان EC در بیشتر سطح منطقه بالاتر از ۵۰۰۰ میکروزیمنس یعنی خیلی شور می‌باشد و مناطق محدودی از حوضه عمدتاً در محدوده مرز حوضه که ارتفاع بالاتری دارد مقدار شوری در حد متوسط و کم می‌باشد. آبخوانهای ابرقو، کویر ابرقو، هرات، مروست، شهر بابک، خاتون آباد، سیرجان، کویر سیرجان، قطروئیه و کفه طاقستان بیشترین شوری را دارند. مقایسه نقشه توزیع مکانی EC و مدل رقومی ارتفاع نشان می‌دهد که توزیع شوری با ارتفاع رابطه مستقیمی دارد و مناطق با شوری بسیار بالا عمدتاً در مناطق کویری و کفه‌ای که کمترین ارتفاع را دارند مطابقت دارد. میانگین منطقه‌ای میزان EC منابع آب زیرزمینی برای کل حوضه برابر ۵۶۱۲ میکروزیمنس و این مقدار برای مجموع آبخوانها برابر ۴۹۰۰ میکروزیمنس می‌باشد. بررسی نقشه توزیع مکانی EC همچنین نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد آب زیرزمینی منطقه دارای EC بیش از ۵۰۰۰ میکروزیمنس و به عبارتی شوری شدید دارد. بررسی توزیع مکانی درصد جذب سدیم (SAR) نشان می‌دهد که به جز در کویر سیرجان و کویر قطروئیه (مقدار بین ۱۸ تا ۲۶) در بقیه نقاط منطقه ورد مطالعه کمتر از ۱۸ (کم) می‌باشد. میانگین این شاخص برای کل منطقه برابر ۹/۵ درصد می‌باشد که این مقدار برای منابع آب زیرزمین کلیه آبخوانها به طور متوسط برابر ۸/۳ می‌باشد. در مرحله بعد شاخص‌های کمی منابع زیرزمینی در حوضه ابرقو - سیرجان مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور میزان تغییرات و افت سطح تراز آب‌های زیرزمینی برای ماه مهر سال‌های ۱۳۹۴-۹۵ و

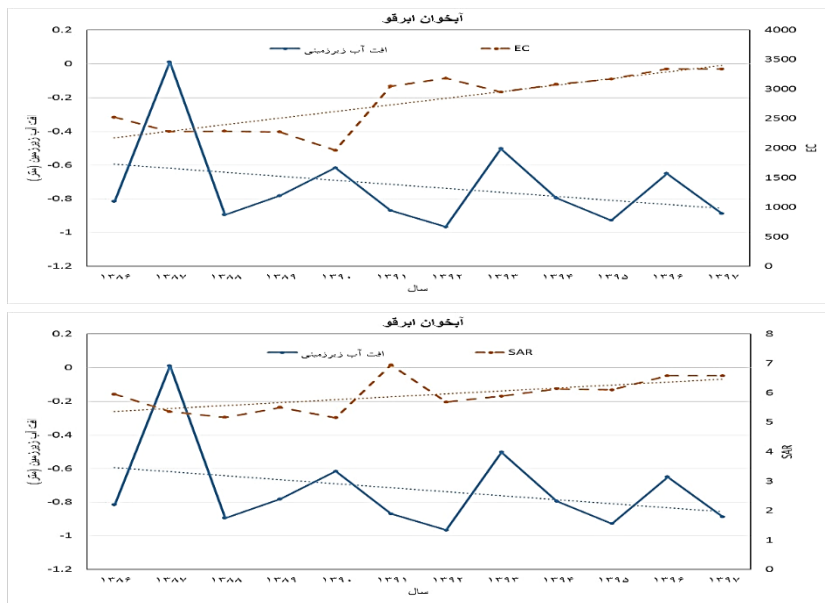
۹۶-۱۳۹۵ به طور میانگین بررسی شد. شکل ۴ تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی را در منطقه برای میانگین دوسال آب ذکر شده نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است قسمت عمده منطقه دارای افت آب زیرزمینی بیشتر از ۵۰ سانتی متر در سال طی دوره دوساله می باشد. لازم به ذکر است که بیشترین افت سطح تراز آب زیرزمینی مربوط به ارتفاعات منطقه به خصوص در مناطق غربی حوضه می باشد. ضمن اینکه تقریباً تمامی آبخوانها دارای افت تراز ۳۰ سانتی متر تا بیش از ۵۰ سانتیمتر می باشند. میانگین منطقه ای افت تراز سطح آب زیرزمینی برای کل منطقه حدود ۵۴ سانتیمتر و برای کلیه آبخوانها برابر ۵۷ سانتیمتر می باشد. این در حالی است که میزان افت بین ۱ سانتیمتر تا ۲۳۷ سانتی متر در سطح حوضه تغییر متغیر می باشد. تحلیل داده‌ها نشان می دهد که میزان افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف حوضه ابرقو-سیرجان دارای تغییرات مکانی قابل توجهی است که این امر می تواند منجر به تغییرات کیفیت آب، از جمله افزایش هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در برخی نقاط گردد. لذا به منظور بررسی تغییرات کمیت و نوسانات سطح تراز آب زیرزمینی، نمودار مقادیر افت آب زیرزمینی و مقادیر EC و نسبت جذب سدیم برای سالهای ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۷ رسم گردید. شکل ۵ به طور نمونه این نمودارها را برای آبخوان ابرقو نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است تغییرات شوری و نسبت جذب سدیم با افت آب زیرزمین رابطه مستقیم دارد. در مورد بقیه آبخوانها نیز این رابطه برقرار می باشد که نشان دهنده تاثیر تغییرات کمیت و نوسانات سطح تراز آب زیرزمینی بر روی کیفیت آبهای زیرزمین و در نتیجه تخریب سرزمین می باشد. به منظور محاسبه معیار فرونشست در مدل بیابان‌زایی IMDPA از نقشه فرونشست حوضه ابرقو - سیرجان (سازمان زمین شناسی کشور) استفاده شد (شکل ۶). همانطور که از نقشه فرونشست قابل تشخیص است فرونشست برای آبخوان‌های ابرقو، بوانات و سرچاهان شدیدتر از سایر نقاط می باشد به طوری که به جز این سه آبخوان در بقیه حوضه نرخ فرونشست در محدوده صفر تا ۳ سانت می باشد. این مقدار برای آبخوان ابرقو، بوانات و سرچاهان بین ۱ تا ۱۰ سانتی متر در تغییر است که مطابق با جدول ۳ وضعیت متوسط تا خیلی شدید را در بر می گیرد. لذا به نظر می رسد که نرخ فرونشست در بیش از ۹۰ درصد منطقه برای سال ۱۳۹۵ در وضعیت کم و متوسط می باشد.



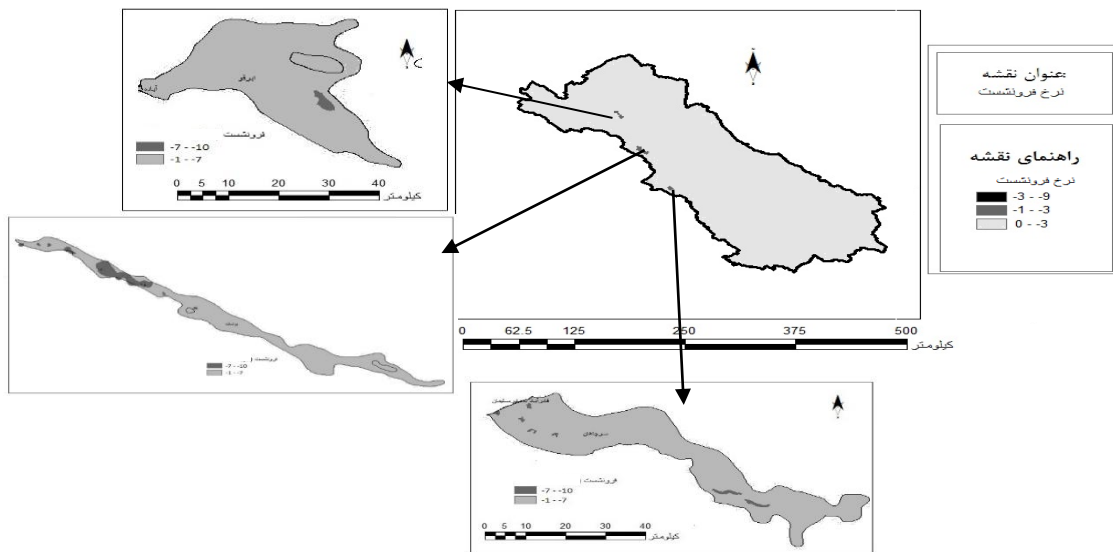
شکل ۳. نقشه توزیع مکانی شاخصه های کیفیت آب زیر زمینی در منطقه مورد مطالعه، الف) شوری ب) نسبت جذب سدیم



شکل ۴. تغییرات سطح تراز آب زیرزمینی در حوضه ابرقو - سیرجان

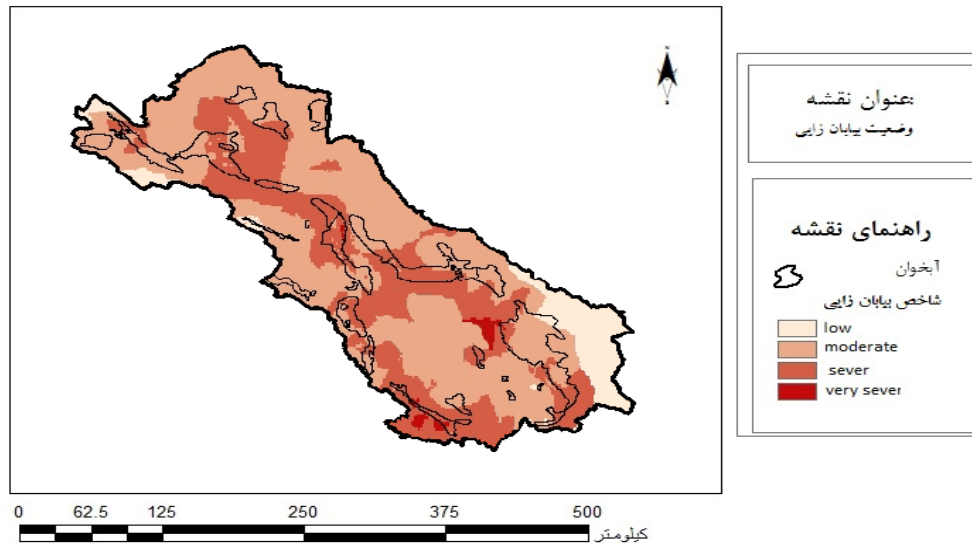


شکل ۵. نمودار مقادیر افت آب زیرزمینی و مقادیر EC و نسبت جذب سدیم



شکل ۶. نرخ فرونشست در حوضه ابرقو - سیرجان مربوط به سال ۱۳۹۵ (به سانتی متر)

تحلیل داده‌های هیدروژئولوژیکی نشان داد که میزان افت سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف حوضه ابرقو-سیرجان دارای نوسانات مکانی قابل توجهی است که این امر منجر به تغییرات کیفیت آب، از جمله افزایش هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در برخی نقاط گردیده است. نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین نیز مناطق مستعد با نرخ‌های مختلف فرونشست را مشخص نموده است. با تلفیق شاخص‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی و داده‌های فرونشست زمین، نقشه شدت بیابان‌زایی تهیه گردید که بر اساس جدول ۳ شدت بیابان‌زایی طبقه‌بندی شد (شکل ۷). همانطور که در شکل نیز مشخص است شدت بیابان‌زایی در بیش از ۹۰ درصد منطقه متوسط تا خیلی شدید می‌باشد که از این میزان حدود ۱۰ درصد خیلی شدید و حدود ۴۰ درصد شدید می‌باشد. همچنین نقشه شدت بیابان‌زایی نشان‌دهنده تمرکز تخریب سرزمین در مناطقی با افت شدید آب زیرزمینی و نرخ بالای فرونشست می‌باشد



شکل ۷. نقشه شدت بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل توسعه یافته IMDPA

۴- نتیجه گیری

بررسی میزان تأثیر افت سطح و تغییر کیفیت آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در بیابان‌زایی و تخریب اراضی در حوزه آبخیز ابرقو - سیرجان با استفاده از مدل IMDPA نشان می‌دهد که میانگین منطقه‌ای میزان EC منابع آب زیرزمینی برای کل حوضه برابر ۵۶۱۲ میکروزیمنس و این مقدار برای مجموع آبخوانها برابر ۴۹۰۰ میکروزیمنس می‌باشد. بررسی نقشه توزیع مکانی EC همچنین نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد آب زیرزمینی منطقه دارای EC بیش از ۵۰۰۰ میکروزیمنس و به عبارتی شوری شدید دارد. بررسی توزیع مکانی درصد جذب سدیم (SAR) نشان می‌دهد که به جز در کویر سیرجان و کویر قطروئیه (مقدار بین ۱۸ تا ۲۶) در بقیه نقاط منطقه ورد مطالعه کمتر از ۱۸ (کم) می‌باشد. میانگین این شاخص برای کل منطقه برابر ۹/۵ درصد می‌باشد که این مقدار برای منابع آب زیر زمین کلیه آبخوانها به طور متوسط برابر ۸/۳ می‌باشد. تقریباً تمامی آبخوانها دارای افت تراز ۳۰ سانتی متر تا بیش از ۵۰ سانتیمتر می‌باشند. میانگین منطقه‌ای افت تراز سطح آب زیرزمینی برای کل منطقه حدود ۵۴ سانتیمتر و برای کلیه آبخوانها برابر ۵۷ سانتیمتر می‌باشد. فرونشست برای آبخوان‌های ابرقو، بوانات و سرچاهان شدیدتر از سایر نقاط می‌باشد به طوری که به جز این سه آبخوان در بقیه حوضه نرخ فرونشست در محدوده صفر تا ۳ سانت می‌باشد. شدت بیابان‌زایی در بیش از ۹۰ درصد منطقه متوسط تا خیلی شدید می‌باشد که از این میزان حدود ۱۰ درصد خیلی شدید و حدود ۴۰ درصد شدید می‌باشد. پژوهش حاضر با ارائه رویکردی جامع برای ارزیابی شدت بیابان‌زایی بر اساس شاخص فرونشست زمین و تغییرات منابع آب زیرزمینی، توانست به افزایش دقت در تعیین مناطق آسیب‌دیده کمک کند. نتایج تأکید می‌کنند که برای مدیریت پایدار منابع طبیعی و جلوگیری از گسترش بیابان‌زایی، توجه به فرونشست زمین به عنوان یک عامل کلیدی و قابل اندازه‌گیری ضروری است.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از طرح پژوهشی «مطالعات تخریب خاک و فرونشست تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران (مطالعه موردی: حوزه آبریز ابرقو - سیرجان)» می‌باشد. بدین‌وسیله از مسئولین محترم مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور قدردانی به عمل می‌آید.

- Azadi, H., & Rahimi, S. 2021. Modeling desertification severity using hydrogeological and geomechanical data in arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(11), 677.
- Gao, H., Liu, M., & Zhang, W. 2020. Impacts of groundwater extraction on soil salinization and desertification in North China. *Environmental Earth Sciences*, 79(4), 97.
- Johnson, M., Smith, R., & Lee, H. 2017. Land subsidence and its impacts on soil degradation: A review. *Environmental Earth Sciences*, 76(6), 1-14.
- Johnson, T., Smith, R., & Lee, K. 2017. Groundwater depletion and land subsidence: Environmental impacts in arid regions. *Journal of Hydrology*, 550, 716–725.
- Khan, S., & Saeed, A. 2019. Effects of groundwater decline on land degradation in arid zones. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(19), 19341–19353.
- Liu, J., Xu, C., & Sun, H. 2017. Spatial-temporal analysis of groundwater depletion and associated land subsidence in the North China Plain. *Science of The Total Environment*, 595, 340–352.
- Morris, B. L., Lawrence, A. R., & Chilton, J. A. 2015. Sustainable groundwater management to mitigate land subsidence in arid environments. *Water Resources Management*, 29(8), 2823–2835.
- Müller, B., Tóth, G., & Beck, H. 2020. Multidimensional drivers of desertification: A systematic review. *Environmental Science & Policy*, 115, 121-130.
- Peyret, M., Jolivet, R., & Leprince, S. 2019. Integrating InSAR and hydrogeological data for monitoring land subsidence in arid environments. *Remote Sensing of Environment*, 234, 111423.
- Rahimi, S., & Azadi, H. 2023. Development of an integrated model for land degradation assessment considering groundwater depletion and land subsidence. *Journal of Environmental Management*, 305, 114345.
- Rahimi, S., Azadi, H., & Moradi, A. 2023. Integrated assessment of desertification severity using groundwater and subsidence data: A case study in Iran. *Journal of Environmental Management*, 320, 115735.
- Smith, J., & Zhang, Y. 2018. Groundwater extraction and land subsidence: Causes, effects, and management strategies. *Water Resources Research*, 54(7), 4891-4908.
- Voss, K. A., J. S. Famiglietti, M. Lo, C. Linage, M. Rodell, and S. C. Swenson. 2013. Groundwater Depletion in the Middle East from GRACE with Implications for Transboundary Water Management in the Tigris-Euphrates-Western Iran Region. *Water Resources Research*, 49 (2): 904–914.
- Wang, F., Chen, L., & Huang, Y. 2018. A new index for desertification risk assessment incorporating land subsidence. *Journal of Arid Environments*, 157, 39–50.
- Zhang, Y., Li, M., & Sun, J. 2022. Coupling groundwater quality deterioration and land subsidence in desertification processes. *Journal of Hydrology*, 603, 127113.
- صالح، ایمان، خزایی، مجید، و نعیمی، مریم. ۱۴۰۲. شدت بیابانزایی تحت تأثیر آب زیرزمینی و فرونشست زمین در حوزه آبخیز مهارلو - بختگان. *مدلسازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱۷۱-۱۸.
- نژادافضلی، کرامت. ۱۴۰۲. ارزیابی شدت خطر بیابانزایی در دشت جیرفت با تأکید بر معیارهای زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی. *مطالعات علوم محیط زیست*، ۸(۱): ۶۱۶۳ - ۶۱۵۴.
- یعقوبی ثریا، فرامرزی مرزبان، کریمی حاجی. ۱۳۹۹. بررسی روند بیابانزایی با استفاده از مدل IMDPA با تأکید بر سه معیار اقلیم، آب و زمین‌شناسی (مطالعه موردی: دشت دهلران استان ایلام). *تخریب و احیاء اراضی طبیعی*. ۱(۲): ۱-۱۲.