

Explanation of desertification and land degradation from the perspective of water and subsidence in the Qareqom Basin

Yaser. Ghasemi Aryan^{1*}, Hadi. Eskandari Damaneh², Maryam. Naeimi³, Adel. Jalili⁴,
Samira. Zandifar³, Azadeh. Gohardoust², Sakineh. Lotfinasabasl^r

1*-Corresponding author, Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: ghasemiaryan@rifr-ac.ir.

2- Researcher, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

4- Professor, Botany Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 06/30/2024

Revised: 08/21/2024

Accepted: 03/08/2025

Published: 04/08/2025

Abstract

Background and objectives

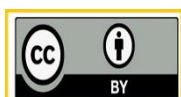
Land subsidence, primarily caused by excessive groundwater extraction, constitutes the most advanced and irreversible stage of desertification and land degradation. While this phenomenon poses a significant threat to numerous plains and major urban centers across Iran, existing desertification assessment models have largely overlooked subsidence rates and the agricultural sector's substantial groundwater consumption. This study evaluates desertification intensity in the Qaraqom basin through the dual lenses of water resource utilization and land subsidence dynamics.

Methodology

The study employed the Inverse Distance Weighting (IDW) method in GIS 10.8 to create zonation maps for three critical groundwater indices: electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), and groundwater level decline. Data from 273 observation wells (2001-2018) were classified into four desertification intensity categories (low, moderate, severe, and very severe). These maps were integrated with a land subsidence rate map (2015-2016 water year) derived from Sentinel-1 satellite imagery provided by the Geological Survey of Iran. Additionally, reservoir volume changes (1985-2018) were analyzed for each aquifer to assess their relationship with subsidence patterns.

Results

Analysis revealed severe to very severe desertification across 46.6% of the basin based on EC values, while SAR indicated low degradation in 90.6% of the area. Groundwater depletion showed the most critical conditions, with 53.4% of the basin experiencing severe to very severe impacts, particularly in the Sarakhs, Fariman-Torbat Jam, southwest Mashhad, and Narimani aquifers. Subsidence rates reached severe levels in 18.1% of the basin, with maximum values observed in the Mashhad, Fariman-Torbat Jam, Taybad, and Karat aquifers. The Mashhad aquifer



demonstrated the highest subsidence rates and the most significant reservoir volume changes. Integrated assessment of groundwater and subsidence criteria classified 55.9% of the Qara Qom watershed as moderately affected and 26.1% as low-intensity desertification.

Conclusion

As agriculture represents the dominant water consumer in the basin, immediate implementation of water efficiency and productivity measures in this sector is crucial to prevent irreversible socio-economic and ecological consequences of ongoing desertification and land degradation.

Keywords: Electrical conductivity, land degradation, IMDPA model, SAR, subsidence.

تبیین بیابان‌زایی و تخریب سرزمین از منظر آب و فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم

یاسر قاسمی آریان^{۱*}، هادی اسکندری دامنه^۲، مریم نعیمی^۳، عادل جلیلی^۴، سمیرا زندی‌فر^۲، آزاده گوهردوست^۲ و سکینه لطفی‌نسب^۳

۱- نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

پست‌الکترونیک: ghasemiaryan@rifra-ac.ir

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

۳- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۴- استاد پژوهش، بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

چکیده

سابقه و هدف

فرونشست زمین که بیشتر پیامد برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی است، آخرین و غیرقابل‌بازگشت‌ترین مرحله از فرایند بیابان‌زایی و تخریب سرزمین است. اگرچه این موضوع امروزه به عنوان یک ابرچالش، بسیاری از دشت‌ها و حتی کلان‌شهرهای مهم ایران را با تهدید جدی مواجه کرده است، اما در بیشتر معیارها و شاخص‌های مربوط به مدل‌های برآورد شدت بیابان‌زایی، میزان فرونشست زمین و نقش بخش کشاورزی (به عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب زیرزمینی) مغفول مانده است. در همین راستا، این پژوهش با هدف برآورد شدت بیابان‌زایی و تخریب سرزمین از منظر آب و فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم انجام شد. مواد و روش‌ها: در این پژوهش نقشه‌های پهنه‌بندی سه شاخص معیار آب زیرزمینی (هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، افت سطح تراز) برای ۲۷۳ چاه مشاهده شده در بازه زمانی ۹۷-۱۳۸۰، براساس طبقات شدت بیابان‌زایی (کم، متوسط، شدید و خیلی شدید) به روش معکوس مربع فاصله (IDW) در محیط نرم‌افزار GIS10.8 تهیه گردید. با تلفیق نقشه‌های یادشده با نقشه میزان فرونشست زمین برای سال آبی ۹۵-۱۳۹۴، نقشه شدت بیابان‌زایی محدوده مطالعاتی استخراج شد. با توجه به اهمیت تغییرات حجم مخزن، به عنوان عامل اصلی پدیده فرونشست، تغییرات این شاخص نیز در طول سال‌های آبی ۱۳۹۷-۱۳۶۴ به تفکیک هر آبخوان تجزیه و تحلیل گردید.

نتایج

نتایج نشان داد وضعیت بالفعل بیابان‌زایی از نظر شاخص هدایت الکتریکی، در ۴۶/۶ درصد حوضه مورد مطالعه شدید و خیلی شدید است. همچنین این میزان در رابطه با نسبت جذب سدیم در ۹۰/۶ درصد حوضه، کم و در رابطه با شاخص افت آب زیرزمینی ۵۳/۴ درصد حوضه شدید و خیلی شدید می‌باشد. بدترین وضعیت مربوط به شاخص افت آب زیرزمینی بوده که وضعیت مشکوک و نامناسب شوری در آبخوان‌های سرخس، فریمان - تربت جام، جنوب غربی مشهد و نریمانی نیز تا حدود زیادی معلول این شاخص است. نتایج بررسی شاخص میزان فرونشست نشان داد وضعیت بیابان‌زایی از نظر این شاخص در ۱۸/۱ درصد از حوضه مورد مطالعه شدید است. در این میان آبخوان‌های مشهد، فریمان - تربت جام، تایباد و کرات، به ترتیب دارای بیشترین میزان فرونشست هستند. نتایج بررسی تغییرات حجم مخزن نیز نشان داد که بیشترین سطح فرونشست در آبخوان مشهد با بیشترین تغییرات حجم همراه بوده است. نتایج به‌دست آمده در مورد وضعیت بالفعل بیابان‌زایی تحت دو معیار آب زیرزمینی و فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم نشان داد که ۵۵/۹ درصد از محدوده مورد مطالعه در طبقه متوسط و ۲۶/۱ درصد از آن در طبقه کم قرار دارد. بر این اساس، شدت بیابان‌زایی در کل حوزه تحت دو معیار آب زیرزمینی و فرونشست در طبقه متوسط و کم قرار می‌گیرد.

با توجه به اینکه بخش کشاورزی بیشترین مصرف آب را در حوضه مورد مطالعه به همراه دارد، پیشنهاد می‌گردد تمهیدات ویژه‌ای در مورد افزایش کارایی و بهره‌وری آب در این بخش انجام شود. در غیر این صورت، پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و اکولوژیکی بیابان‌زایی

و تخریب سرزمین، جبران‌ناپذیر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تخریب اراضی، فرونشست، مدل IMDPA، هدایت الکتریکی، SAR.

مقدمه

بیابان‌زایی به عنوان تخریب زمین در مناطق خشک، نیمه‌خشک و خشک نیمه‌مرطوب در اثر عوامل مختلف از جمله تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است که با پیامدهای منفی اجتماعی-اقتصادی همراه است (Kassas, 1995, Baartman *et al.*, 2007, Eskandari Dameneh *et al.*, 2021b)، امنیت غذایی، رشد اقتصادی و پیشرفت اجتماعی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای به شدت تحت تأثیر حساسیت به تخریب زمین قرار دارند. این پدیده، یک چالش مهم برای آینده بشر است، همانطور که پیش‌بینی می‌شود شدت آن در آینده افزایش یافته و دسترسی به غذا، آب و سایر نیازهای اساسی انسان را با مخاطره روبرو می‌سازد (Eskandari Dameneh *et al.*, 2021b). از این‌رو، برآورد دقیق این پدیده برای شناخت روند و راه‌های کنترل و مقابله با آن، یکی از دغدغه‌های اساسی دانشمندان و متخصصان در چند دهه اخیر بوده است (Eskandari Dameneh and Ghasemi Aryan, 2025, Eskandari Dameneh *et al.*, 2022). در این راستا، مدل‌های مختلفی با لحاظ معیارها و شاخص‌های متعدد پیرامون موضوع بیابان‌زایی در اقصی نقاط جهان و ایران معرفی گردیده‌اند. معیارهای آب، خاک، پوشش گیاهی و اجتماعی-اقتصادی همواره به عنوان مهمترین معیارها در مدل‌های بیابان‌زایی به‌ویژه مدل ایرانی IMDPA مطرح بوده‌اند. در این میان، معیار آب با توجه به نقش اساسی آن در حیات و پایداری سکونت‌گاه‌های انسانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرونشست زمین که بیشتر پیامد برداشت بی‌رویه از لایه‌های آبدار زیرزمینی است (Lyu *et al.*, 2020, Zhou *et al.*, 2023) از مهمترین مصادیق بیابان‌زایی است که اراضی کشاورزی و حتی سکونت‌گاه‌های شهری را با تهدید جدی مواجه کرده است. به‌طوری‌که طبق برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا

در معرض این پدیده قرار دارند (Yue, *et al.*, 2005; Hua *et al.*, 2004). در حال حاضر بسیاری از دشت‌ها و حتی تعدادی از کلان‌شهرهای مهم ایران از جمله اصفهان و تهران متحمل فرونشست شده‌اند. براساس اعلام سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، میزان فرونشست زمین در برخی عرصه‌های کشور بین ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر در سال است (Sarbaz and Aghamiri, 2023). پژوهش‌های مختلفی در زمینه ارزیابی و برآورد شدت بیابان‌زایی انجام شده است. Zakerinejad و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی بیابان‌زایی زرین دشت استان فارس، بیان کردند که به ترتیب کلاس‌های شدید و خیلی شدید حدود ۳۷/۴۱ و ۶۲/۵۹ درصد از سطح اراضی این دشت را دربر گرفته است. Zehtabian و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای تحت عنوان استفاده از مدل ایرانی (IMDPA) در ارزیابی پدیده بیابان‌زایی برای توسعه پایدار منطقه‌ای، بیان کردند که ۷۳/۸۸ درصد از مساحت کشور برابر ۶/۳۸۵۲۳۶ هکتار، تحت تأثیر پدیده بیابان‌زایی قرار داشته که بیش از ۵۷/۹۱ درصد در کلاس II یا متوسط و سطحی واقع شده است. Kohbanani و همکاران (۲۰۱۹) برای پهنه‌بندی گستره خطر فرونشست زمین در دشت کاشمر و خلیل‌آباد از تصاویر Sentinel-1A مربوط به سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که این منطقه در بیشترین حالت ۱۷ سانتیمتر در سال فرونشست داشته که بیشتر در حومه جنوب‌غرب شهر کاشمر و مناطق غربی دشت خلیل‌آباد متمرکز است. نتایج Akbari و همکاران (۲۰۲۰) برای پایش فرایندهای بیابان‌زایی با استفاده از شاخص‌های اکولوژیکی و ارائه برنامه‌های مدیریتی در مناطق خشک ایران نشان داد که روند بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ افزایشی بوده است، به‌نحوی‌که افت کمی و کیفی آب زیرزمینی و گسترش اراضی کشاورزی کم بازده از علل اصلی تخریب اراضی و بیابان‌زایی

این دست، کمتر مورد توجه بوده، میزان فرونشست زمین و نقش بخش کشاورزی (به عنوان اصلی ترین متقاضی مصرف آب زیرزمینی) در بیابانزایی بوده است. به بیانی دیگر، در طول چند دهه گذشته، به تناسب جایگاه تشکیلاتی سازمان متولی امر مقابله با بیابانزایی، یعنی سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، تمرکز برنامه ریزی ها، سیاست ها و اقدامات در زمینه مقابله با این پدیده، بر اراضی ملی به شکل عام و مناطق بیابانی به شکل خاص استوار بوده و نقش و تأثیر مهم تخریب اراضی کشاورزی در بیابانزایی و پیامدهای ناشی از آن، به ویژه تشدید فرسایش بادی و طوفان های گردوغبار، کمتر مورد توجه بوده است. از این رو، در این مطالعه، شدت بیابانزایی و تخریب اراضی در حوزه آبریز قره قوم از منظر آب و فرونشست بررسی شده است.

مواد و روش ها

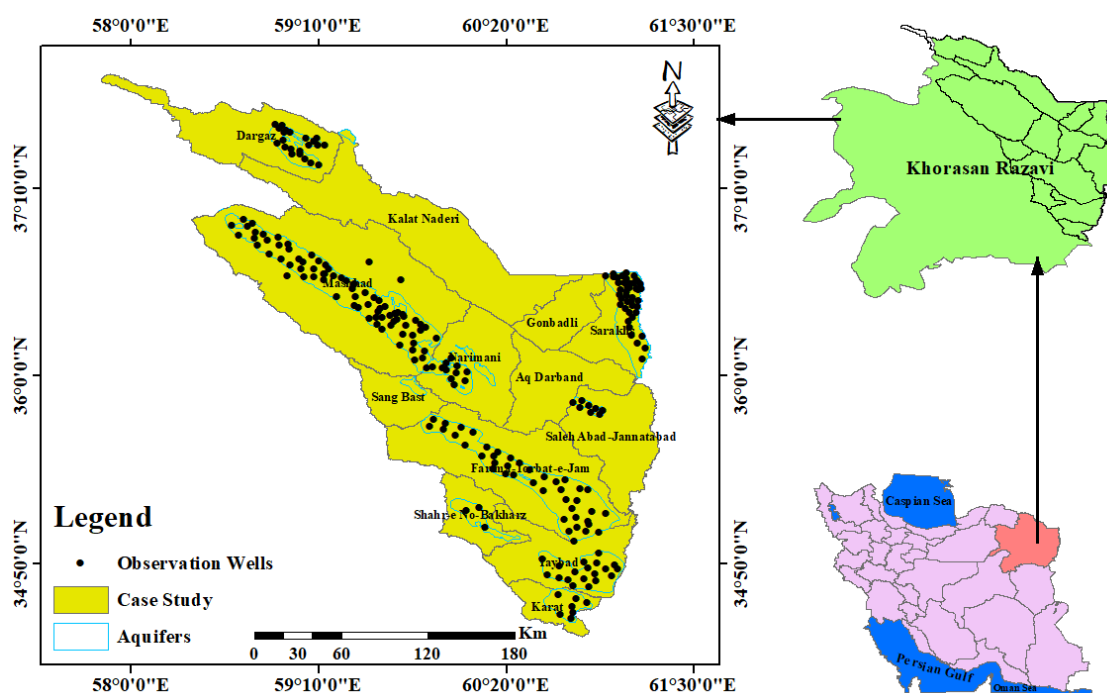
معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز قره قوم با مساحت ۴۴۱۶۵ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی (درجه ۱) ایران می باشد. این حوضه در کشورهای ایران، ترکمنستان و افغانستان قرار دارد که بخش جنوب غربی آن قسمت شمال شرق استان خراسان رضوی را می پوشاند و به دلیل آنکه جریان های سطحی و زه آب های خروجی این حوضه در نهایت به صحرای قره قوم در کشور ترکمنستان می ریزد منطقه مطالعاتی بنام حوضه آبریز قره قوم نامیده شده است. حوضه مورد مطالعه دارای ۱۳ محدوده مطالعاتی بوده که محدوده های مشهد، فریمان - تربت جام و کلات نادری بزرگترین دشت های واقع در این حوضه به حساب می آیند. ارتفاع حوضه آبریز قره قوم ۹/۱۲۰۳ متر می باشد. حداقل ارتفاع با ۲۲۰ متر در شمال شرق منطقه در محدوده مطالعاتی سرخس (در محل خروجی رودخانه هریود از مرز کشور) و حداکثر آن با ۳۲۸۹ متر در قله بینالود در غرب محدوده مطالعاتی مشهد قرار دارد. در حوضه آبریز قره قوم ۲۸۰۰۰ هکتار اراضی مرتعی (عمدتاً تنک، فقیر و غیرمترکم) وجود دارد که ۶۵ درصد از کل حوضه را پوشش می دهد. عرصه جنگلی فقط در حدود ۴ درصد سطح حوضه

این منطقه گزارش شده است. Saleh و همکاران (۲۰۲۳) میزان تأثیر افت سطح و تغییر کیفیت آب زیرزمینی و فرونشست زمین را در بیابانزایی و تخریب اراضی در حوزه آبخیز مهارلو- بختگان با استفاده از مدل IMDPA مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که ۸۳ درصد از سطح حوزه مورد مطالعه دارای شدت بیابانزایی کم و متوسط و ۱۷ درصد از آن دارای شدت بیابانزایی شدید و خیلی شدید است. Soleimanpour و همکاران (۲۰۲۴) در در ارزیابی روند بیابانزایی با بهره گیری از معیار آب زیرزمینی و فرونشست با استفاده از مدل IMDPA در حوزه آبخیز رفسنجان، بیان کردند که میزان فرونشست بین هفت تا کمتر از یک سانتی متر در سال متغیر بوده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که شدت بیابانزایی طبق دو معیار آب زیرزمینی و فرونشست، در سه طبقه کم، متوسط و شدید قرار می گیرد که بیشترین سطح مربوط به شدت متوسط می باشد. Adem و همکاران (۲۰۲۴) در ارزیابی تغییرات فرونشست زمین و ذخیره آب زیرزمینی به ترتیب از داده های InSAR و GRACE در عربستان سعودی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در سال های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ میانگین میزان فرونشست سالانه بین ۱/۱ تا ۵/۱ میلی متر در سال بوده، این در حالی است که براساس تجزیه و تحلیل داده های حاصل از ماهواره GRACE ذخیره آب زیرزمینی ۱۱/۲ میلی متر در این سال ها کاهش یافته است. حوضه آبریز قره قوم در شمال شرق ایران یکی از شش حوضه آبریز اصلی کشور است که بیشترین میانگین افت سطح آب زیرزمینی را نسبت به سایر آبخوان های آبرفتی حوضه های آبریز کشور دارد (Ghasemi Aryan, Y., 2024, Zandifar., 2023). در این تحقیق برای برآورد شدت بیابانزایی و تخریب سرزمین در این حوزه از منظر آب، از مدل ایرانی IMDPA استفاده گردید که کارآمدی آن در مطالعات مختلف گزارش شده است (Khosarvi et al., 2019, Zehtabian et al., 2017). در این راستا، در بیشتر مطالعات انجام شده، معیار آب زیرزمینی به عنوان یک معیار اصلی و تعیین کننده در برآورد شدت بیابانزایی مطرح بوده است. اما آنچه در مدل یادشده و در مطالعات انجام شده از

شده توسط Zandifar (۲۰۲۳) نشان می‌دهد که تغییرات سطح آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌قوم نسبت به سایر حوضه‌های کشور در دوره زمانی ۹۸-۱۳۸۰ بیشتر بوده است. به نحوی که به‌طور متوسط ۴۵ متر افت سطح آب در آبخوان‌های این حوضه اتفاق افتاده است. شکل شماره ۱ نقشه موقعیت حوضه آبریز قره‌قوم را در کشور و استان خراسان رضوی نشان می‌دهد (Ghasemi Aryan, 2023)

را پوشش می‌دهد که بسیار ناچیز است. در این منطقه رویشی ایران و تورانی، ارس به عنوان گونه غالب می‌باشد که از نظر حفاظتی حائز اهمیت است. بارندگی این حوضه دارای تغییرات زمانی و مکانی زیادی است و متوسط بارش در آن ۲۴۵ میلی‌متر در سال برآورد شده است. همچنین متوسط دمای سالانه کل حوضه ۱۲/۷ درجه سانتیگراد و اقلیم غالب حوضه، خشک سرد برآورد گردیده است (Jamab Consulting Engineering., 1994). نتایج مطالعات انجام



شکل ۱- موقعیت محدوده‌های مطالعاتی و آبخوان‌های حوضه آبریز قره‌قوم در کشور و استان خراسان رضوی
Figure 1- Location of Qareqom basin and its aquifers in Iran and Khorasan Razavi province

فرونشست تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ توسط سازمان زمین‌شناسی کشور در این سال) ارزیابی شد. برای این منظور، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های یادشده طبق آمار و اطلاعات مربوط به ۲۷۳ چاه مشاهده شده (پراکنش آنها در شکل شماره ۱ نمایش داده شده است) در بازه زمانی ۹۷-۱۳۸۰، براساس طبقات شدت بیابان‌زایی (کم، متوسط، شدید و خیلی شدید) به روش معکوس مربع فاصله (IDW) در محیط نرم‌افزار GIS_{10.8} تهیه گردید. بررسی خطای حاصل از

روش تحقیق

در این پژوهش برای برآورد شدت بیابان‌زایی حوضه آبریز قره‌قوم از دو معیار آب زیرزمینی و میزان فرونشست تحت مدل ایرانی IMDPA استفاده گردید. معیار آب زیرزمینی در دو طبقه کمیت و کیفیت با سه شاخص هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم (SAR) و افت سطح آب زیرزمینی و معیار فرونشست با استفاده از شاخص میزان فرونشست برای سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ (با توجه به نقشه‌های

روش‌های درونیابی کریجینگ و معکوس مجذور فاصله (IDW) به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش در جدول ۱ آمده است. بر این اساس، روش IDW از دقت مناسب‌تری برخوردار است.

جدول ۱- نتایج خطای درونیابی برای تخمین شاخص‌های مورد مطالعه

Table 1- Result of interpolation errors in the estimation of studied indicators

Indicator	IDW	Kriging
Electrical Conductivity (EC)	1017	1052
Sodium Absorption Ratio (SAR)	8.84	9.54
Groundwater level decline (GWLD, centimetres per year)	2.37	4.32

معیار آب زیرزمینی طبق جدول ۲ امتیازدهی شده و ارزش عددی این معیار طبق رابطه ۱ تعیین گردید (Zehtabian et al. 2015).

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص‌های کمی و کیفی معیار آب زیرزمینی در IMDPA

Table 2-Classification of qualitative and quantitative indicators for groundwater criteria in the IMDPA model

Indicator	The current state of desertification			
	Low	Moderate	Severity	Very severity
Electrical Conductivity (EC)	750<	750-2250	2250-5000	>5000
Sodium Absorption Ratio (SAR)	18<	18-26	26-32	>32
Groundwater level decline (GWLD, centimetres per year)	20<	20-30	30-50	>50

از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ در سال آبی ۱۳۹۴-۹۵ توسط سازمان زمین‌شناسی کشور ارزیابی گردید. این شاخص طبق جدول ۳ امتیازدهی شد.

$$GWI = (GWLD \times EC \times SAR)^{1/3}$$

رابطه ۱

معیار فرونشست با استفاده از نقشه فرونشست تهیه شده

جدول ۳- کلاس‌بندی شاخص معیار میزان فرونشست در مدل IMDPA

Table 3. Classification of the subsidence rate index in the IMDPA model

Indicator	The current state of desertification			
	Low	Moderate	Severity	Very severity
Land subsidence (centimetres per year)	>-1.49	-1.5,-2.99	-3,-5.99	<-6

در این رابطه، GWI معیار آب زیرزمینی، SRI معیار میزان فرونشست و DM وضعیت فعلی بیابان‌زایی می‌باشد. طبق مدل IMDPA شدت بیابان‌زایی در چهار کلاس کم، متوسط، شدید و بسیار شدید طبقه‌بندی می‌گردد. جدول ۳ کلاس‌ها و وزن‌های اخذ شده برای ارزیابی وضعیت معیارها در مدل IMDPA را نشان می‌دهد. جدول ۴- طبقات کلاس‌های شدت بیابان‌زایی مدل IMDPA

پس از محاسبه معیارهای آب زیرزمینی و فرونشست و تهیه نقشه‌های مربوطه، نقشه نهایی وضعیت بیابان‌زایی طبق رابطه ۲ و براساس میانگین هندسی معیارها طبق جدول ۴ تعیین گردید (Zehtabian et al. 2018).

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

رابطه ۲

بدترین وضعیت را از نظر شاخص هدایت الکتریکی دارد. نتایج بررسی شاخص نسبت جذب سدیم نشان داد که بیشترین سطح محدوده از نظر این شاخص در وضعیت عالی قرار دارد. با این حال، وضعیت این شاخص در محدوده‌های مطالعاتی سرخس، نریمانی، جنت‌آباد-صالح‌آباد، فریمان و تایباد خوب و متوسط است. نتایج بررسی شاخص افت سطح منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های حوزه آبریز قره‌قوم، نشان داد بیشترین سطح محدوده در کلاس خیلی شدید قرار دارد. به‌طورکلی وضعیت بالفعل بیابان‌زایی از نظر شاخص هدایت الکتریکی، در ۴۶/۶ درصد حوزه مورد مطالعاتی شدید و خیلی شدید برآورد گردید. همچنین این میزان در رابطه با نسبت جذب سدیم در ۹۰/۶ درصد حوزه، کم و در رابطه با شاخص افت آب زیرزمینی ۵۳/۴ درصد حوزه شدید و خیلی شدید برآورد شد. جدول شماره ۵ وضعیت شاخص‌های معیار آب زیرزمینی و شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب وضعیت شاخص‌های هدایت الکتریکی، SAR و افت سطح آب زیرزمینی را در سطح حوزه آبریز قره‌قوم نشان می‌دهد.

جدول ۵- وضعیت بالفعل بیابان‌زایی تحت شاخص‌های معیار آب زیرزمینی در حوزه آبریز قره‌قوم

Table 5- The current status of desertification based on criteria indicators for groundwater levels in the Qareqoum basin

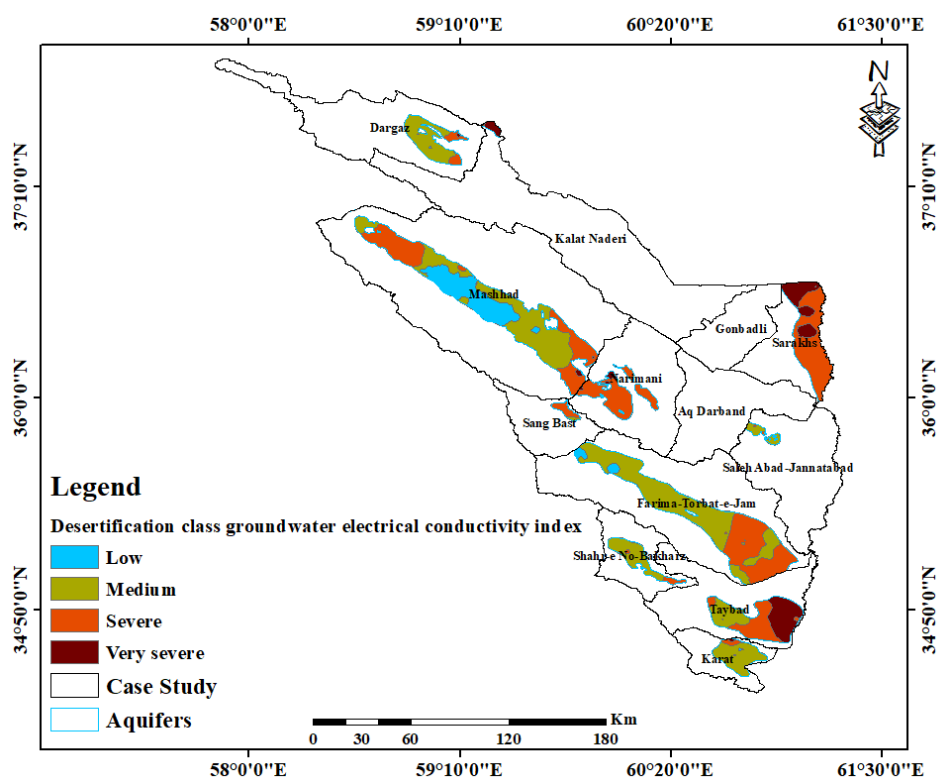
Desertification Classification	Quality of groundwater				Quantity of groundwater	
	EC		SAR		Groundwater level	
	Area (KM2)	Area (%)	Area (KM2)	Area (%)	Area (KM2)	Area (%)
Low	708.9	8.5	7532.3	90.6	1940.9	23.3
Moderate	373.1	44.9	785.7	9.4	1937.5	23.3
Severity	3194.9	38.4	0	0	1596.4	19.2
Very severity	683.1	8.2	0	0	2843.2	34.2
Sum	8318	100	8318	100	8318	100

Table 4- The final table for evaluating desertification using the IMDPA model.

Desertification Classification	Score
Low	0.5-1.5
Moderate	1.5-2.5
Severity	2.5-3.5
Very severity	3.5-4

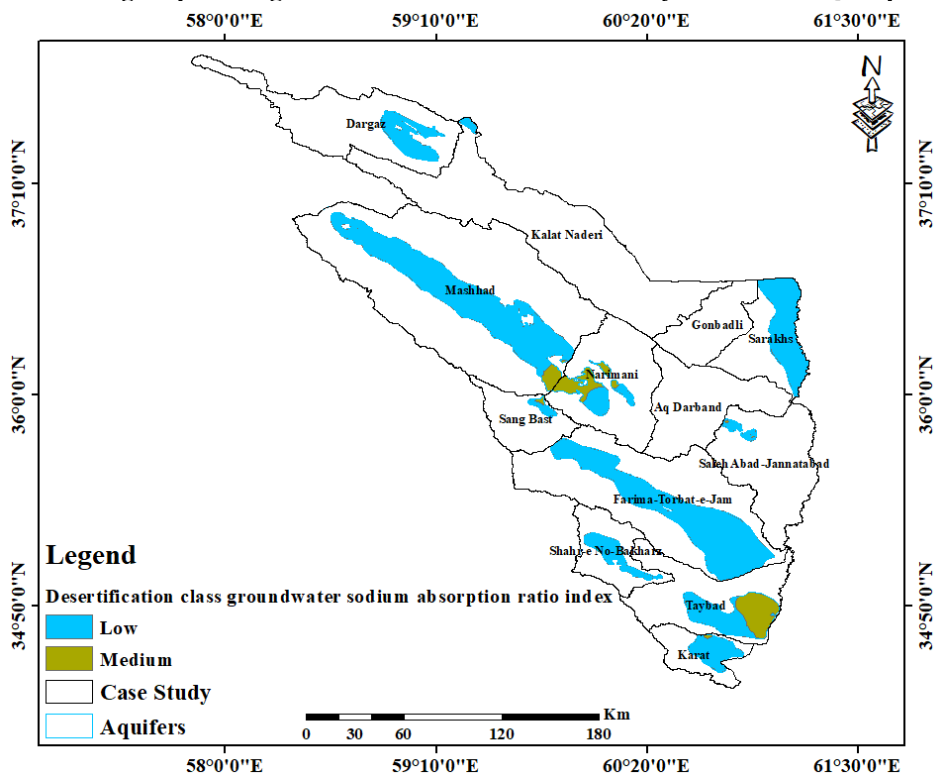
نتایج

نتایج حاصل از بررسی معیار آب زیرزمینی در سطح حوزه آبریز قره‌قوم نشان داد هدایت الکتریکی در کل حوزه بین مقادیر کمتر از ۲۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر تا بزرگتر از ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر در نوسان است. بر این اساس، آبخوان‌های کرات، شهرنو-باخرز، سنگ‌بست، جنت‌آباد-صالح‌آباد و بخش‌هایی از درگز و فریمان - تربت‌جام دارای کلاس شوری قابل قبول بوده ولی وضعیت شوری در آبخوان‌های سرخس، فریمان - تربت‌جام، جنوب‌غربی مشهد و نریمانی مشکوک و نامناسب است. در این راستا، محدوده مطالعاتی سرخس



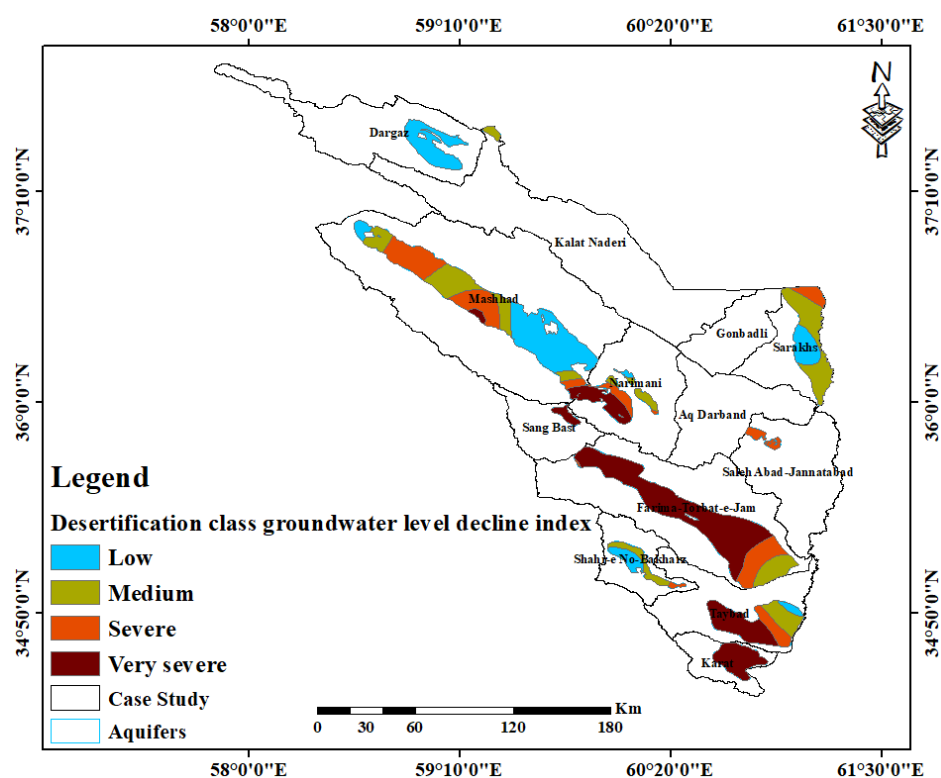
شکل ۲- نقشه پهنه‌بندی شاخص هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌قوم

Figure 2- Zoning map of the groundwater electrical conductivity index in the Qareqom basin.



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی شاخص نسبت جذب سدیم آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌قوم

Figure 3- Zoning map of the groundwater sodium absorption ratio index in the Qareqom basin



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی افت سطح آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌قوم

Figure 4- Zoning map of groundwater decline level in the Qareqom basin

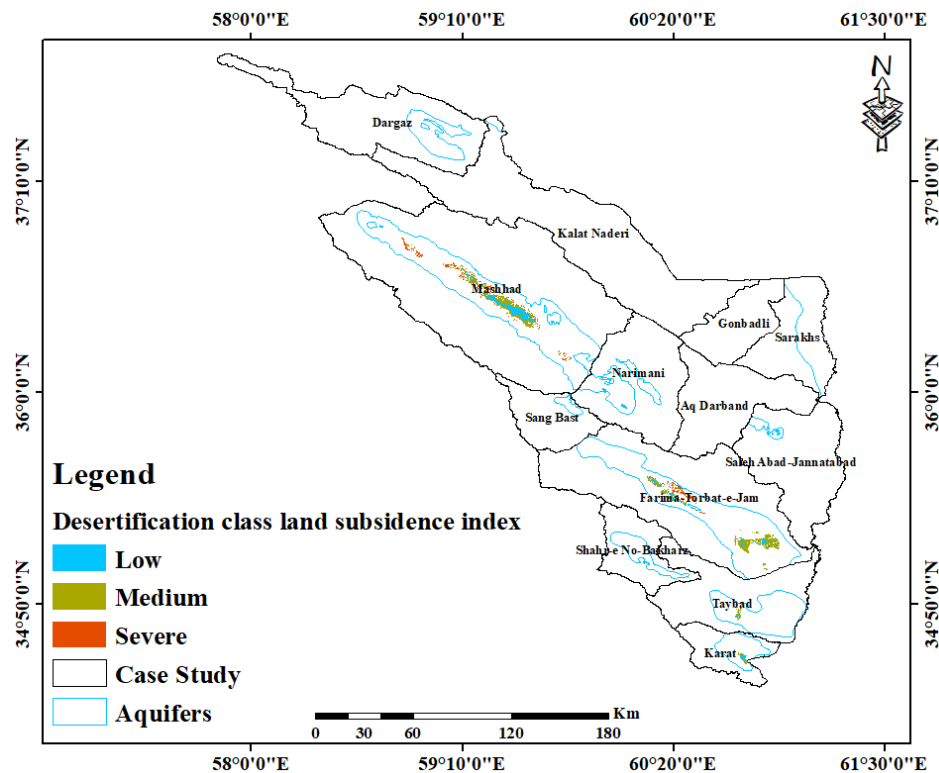
فرونشست در ۱۸/۱ درصد از حوضه مورد مطالعه شدید است. در همین راستا، بیشترین سطح محدوده مطالعاتی از نظر این شاخص در طبقه متوسط با ۵۵/۹ درصد قرار گرفته است. جدول ۶ و شکل ۵ به ترتیب وضعیت بالفعل بیابان‌زایی و پهنه‌بندی آن را تحت شاخص میزان فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم نشان می‌دهند.

نتایج بررسی شاخص میزان فرونشست نشان داد آبخوان‌های مشهد، چناران، فریمان - تربت‌جام، تایباد و کرات، به ترتیب دارای بیشترین میزان فرونشست هستند. نتایج طبقه‌بندی این شاخص نشان می‌دهد که بیشترین سطح آن در طبقه صفر تا یک سانتیمتر قرار دارد. به‌طورکلی وضعیت بیابان‌زایی از نظر شاخص میزان

جدول ۶- وضعیت بالفعل بیابان‌زایی تحت شاخص میزان فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم

Table 6- The current status of desertification with criteria land subsidence in the Qareqom basin

The current state of desertification	Area (KM ²)	Area (%)
Low	137.3	26.1
Moderate	294	55.9
Severity	95	18.1
Sum	526.3	100



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی فرونشست زمین در سال ۱۳۹۵ در حوضه آبریز قره‌قوم
Figure 5-Zoning map of land subsidence in the 2016 Qareqom basin

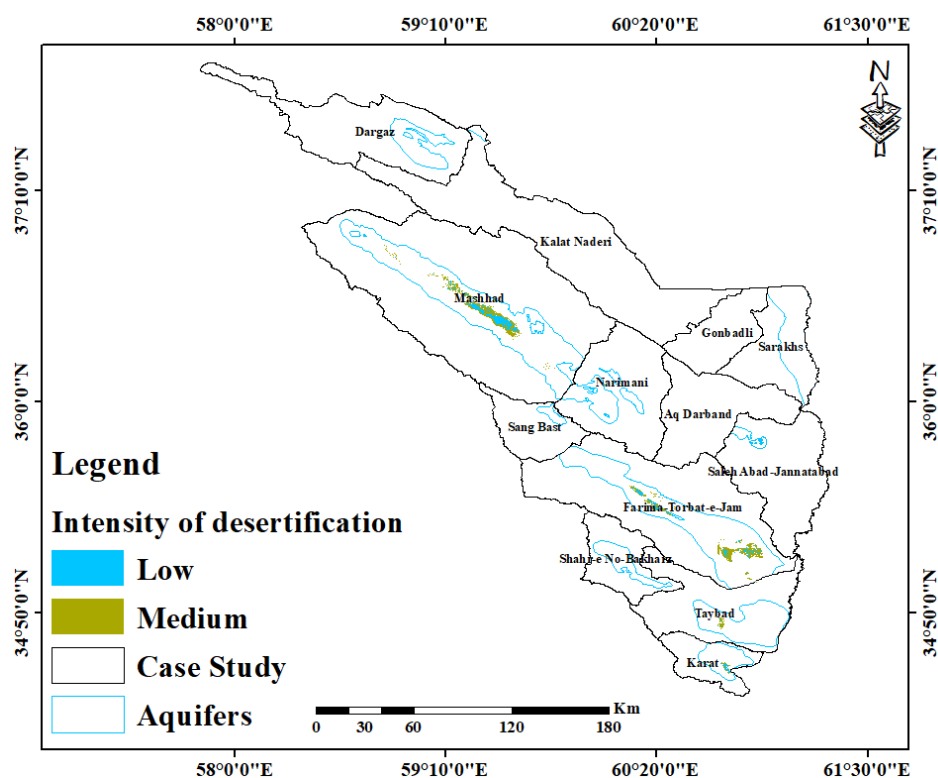
زیرزمینی و فرونشست در طبقه متوسط و کم قرار می‌گیرد. جدول ۷ و شکل ۶ به ترتیب وضعیت بالفعل بیابان‌زایی و پهنه‌بندی آن را تحت دو معیار آب زیرزمینی و فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم نشان می‌دهند.

نتایج به دست آمده در مورد وضعیت بالفعل بیابان‌زایی تحت دو معیار آب زیرزمینی و فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم نشان داد ۵۵/۹ درصد از محدوده مورد مطالعه در طبقه متوسط و ۲۶/۱ درصد از آن در طبقه کم قرار دارد. بر این اساس، شدت بیابان‌زایی در کل حوزه تحت دو معیار آب

جدول ۷- وضعیت بالفعل بیابان‌زایی تحت معیار آب زیرزمینی و فرونشست در حوضه آبریز قره‌قوم

Table 7- The current desertification status, groundwater, and land subsidence in the Qareqom basin.

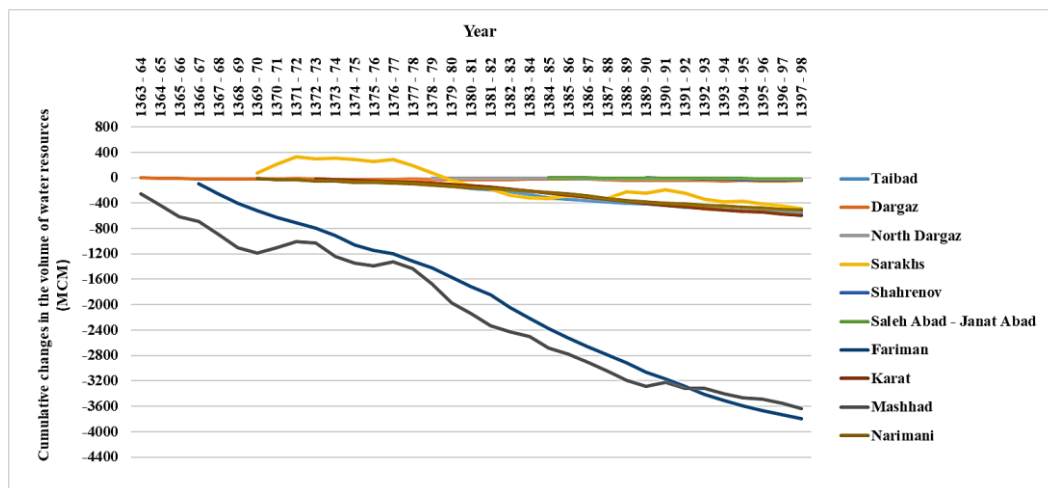
The current state of desertification	Area (KM ²)	Area (%)
Low	137.3	26.1
Moderate	294	55.9
Sum	526.3	100



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی در حوضه آبریز قره‌قوم
Figure 6- Zoning map the intensity of desertification in the Qareqom basin

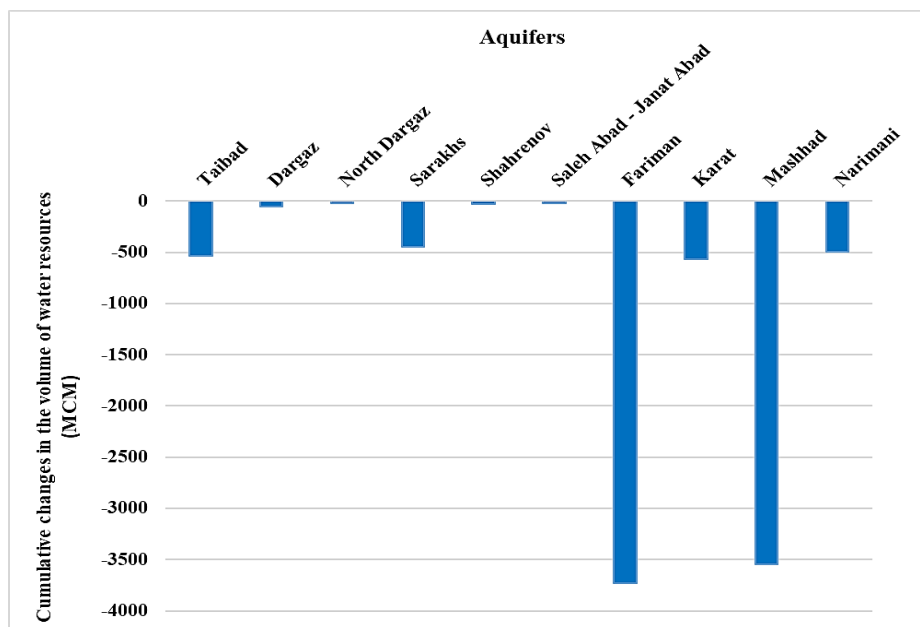
البته طی سال‌های پس از این، به دلیل عدم توسعه منابع آبی منطقه، تغییرات قابل توجهی در سطح اراضی زیر کشت منطقه اتفاق نیفتاده است. Toosab consulting engineering, (2015). شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تغییرات تجمعی حجم مخزن در آبخوان‌های حوضه آبریز قره‌قوم را به تفکیک هر سال و هر آبخوان نشان می‌دهند. نتایج بررسی موقعیت فرونشست در حوضه مورد مطالعه نشان داد بیشترین سطح فرونشست در آبخوان‌هایی اتفاق افتاده است که بیشترین تغییرات حجم مخزن را داشته‌اند. جدول شماره ۸، سطح و درصد مساحت شدت‌های مختلف فرونشست را به تفکیک آبخوان نشان می‌دهد. بر این اساس، اگرچه حجم تجمعی مخزن و افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان فریمان بیشتر بوده اما سطح فرونشست در آبخوان مشهد بیشتر از آبخوان فریمان گزارش شده است. هر چند به همان نسبت شدت فرونشست در آبخوان فریمان بیشتر است.

با توجه به اینکه عامل اصلی پدیده فرونشست، اضافه‌برداشت از آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی است، در این تحقیق تغییرات تجمعی حجم مخزن در آبخوان‌های مختلف تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد آبخوان مشهد با ۷۳۳۴۵/۸ میلیون مترمکعب بیشترین و آبخوان صالح‌آباد-جنت‌آباد ۱۳۳/۸ میلیون مترمکعب کمترین تغییرات حجم مخزن را در طول دوره ۳۴ ساله داشته‌اند. در ادامه آبخوان‌های فریمان، تایباد، کرات و نریمانی بیشترین تغییرات حجم مخزن را داشته‌اند. رقم کل تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌قوم ۱۶۴۰۰۶ میلیون مترمکعب است. از آنجا که بخش کشاورزی بیشترین مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد، نتایج بررسی‌ها نشان داد سطح اراضی زیر کشت آبی از حدود ۲۷۸ هزار هکتار در سال ۱۳۷۳ (Jamab consulting engineering, 1994) به حدود ۳۳۰ هزار هکتار در سال ۱۳۸۵ (با ۱۹ درصد افزایش) رسیده است.



شکل ۷- تغییرات تجمعی حجم مخزن در آبخوان‌های حوضه آبریز قره‌قوم

Figure 7- Cumulative changes in the reservoir volume of the aquifers in the Qareqom basin



شکل ۸. نمودار تغییرات تجمعی حجم مخزن در حوضه آبریز قره‌قوم به تفکیک هر آبخوان

Figure 8- The cumulative changes in the volume of the reservoir in the Qareqom basin, separated by each aquifer

جدول ۸- سطح و درصد مساحت شدت‌های مختلف فرونشست به تفکیک هر آبخوان در حوضه آبریز قره‌قوم

Table 8- Area and area percent of different intensity of land subsidence in every aquifer in the Qareqom basin

Aquifer	land subsidence	land subsidence intensity			Groundwater level(meter)	cumulative changes in the volume of the reservoir (MCM)
		Low	Moderate	severity		
Fariman	21.2	17.8	64.9	17.3	-43	-3732.8
Mashhad	28.3	31.8	47.9	10.2	-23.9	-3546.4
Karat	1.57	48.2	48.5	3.4	-43.6	-531.1
Taybad	1.45	10.8	86.4	2.8	-15.6	-568.4

بحث

افت کمی و کیفی آب زیرزمینی و به تبع آن فرونشست، ازجمله مصادیق بیابان‌زایی محسوب می‌شوند که با وجود برگشت‌ناپذیری و دامنه وسیع پیامدها و تهدیدات اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی آن، کمتر از سوی متخصصان و کارشناسان امر در زمینه شناسایی، کنترل و مقابله با خطر بیابان‌زایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این راستا، این پژوهش با هدف توجه به این مهم در حوضه آبریز قره‌قوم انجام شد. نتایج در رابطه با معیار آب زیرزمینی گویای این واقعیت است که وضعیت بالفعل بیابان‌زایی از نظر شاخص هدایت الکتریکی، در ۴۶/۶ درصد حوضه مورد مطالعاتی شدید و خیلی شدید است. همچنین این میزان در رابطه با نسبت جذب سدیم در ۹۰/۶ درصد حوضه، کم و در رابطه با شاخص افت آب زیرزمینی در ۵۳/۴ درصد حوضه شدید و خیلی شدید می‌باشد. در این راستا بدترین وضعیت، مربوط به شاخص افت آب زیرزمینی بوده که وضعیت مشکوک و نامناسب شوری در آبخوان‌های سرخس، فریمان - تربت‌جام، جنوب‌غربی مشهد و نریمانی و فرونشست‌های رخ داده در محدوده‌های مطالعاتی مشهد، فریمان، تایباد و کرات، تا حدود زیادی معلول همین شاخص است. بدترین وضعیت از نظر شاخص هدایت الکتریکی در آبخوان سرخس مشاهده گردید. به‌طوری‌که وضعیت کیفی آب این آبخوان، در طبقه نامناسب قرار دارد. مطابق با گزارش‌های وزارت نیرو (۲۰۱۵) مهم‌ترین عامل افت کیفی این آبخوان، برداشت‌های بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی و حرکت جبهه آب شور به سمت سرخس بوده است، به‌طوری‌که تغییرات تجمعی حجم مخزن این آبخوان، رقم ۴۸۵/۷ میلیون مترمکعب را نشان می‌دهد. نتایج بررسی وضعیت بیابان‌زایی از نظر شاخص میزان فرونشست نیز بیانگر وضعیت شدید در ۱۸/۱ درصد از حوضه مورد مطالعه است. در این میان آبخوان‌های مشهد، فریمان، تایباد و کرات، به ترتیب دارای بیشترین میزان فرونشست هستند. در همین راستا، بیشترین سطح محدوده مطالعاتی از نظر این شاخص در طبقه متوسط با ۵۵/۹ درصد قرار گرفته است. Saleh و همکاران (۲۰۲۳)، Abdi (۲۰۰۷) و Shokoohi و همکاران

(۲۰۱۳) به ترتیب با بررسی وضعیت بیابان‌زایی مناطق ابوزیدآباد استان اصفهان و خضرآباد اله‌آباد استان یزد براساس مدل IMDPA با تأکید بر معیارهای آب و خاک به نتایج مشابهی دست یافتند و شاخص هدایت الکتریکی را دارای تأثیر قابل توجهی در تخریب منابع آب زیرزمینی و بیابان‌زایی دانسته‌اند. نکته قابل توجه در این پژوهش، همبستگی بین تغییرات تجمعی حجم مخزن با فرونشست در محدود مورد مطالعه است. به‌طوری‌که نتایج نشان داد آبخوان مشهد، فریمان، تایباد و کرات بیشترین تغییرات حجم مخزن را داشته‌اند. در این راستا، اگرچه حجم تجمعی مخزن و افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان فریمان بیشتر بوده، اما سطح فرونشست در آبخوان مشهد بیشتر از آبخوان فریمان گزارش شده است. هر چند به همان نسبت شدت فرونشست در آبخوان فریمان بیشتر است. رقم کل تغییرات حجم مخزن آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌قوم ۹۴۳۹- میلیون مترمکعب است. از آنجا که بخش کشاورزی بیشترین مصرف آب را به خود اختصاص می‌دهد، نتایج بررسی‌ها نشان داد که سطح اراضی تحت کشت آبی در حدود ۳۱۴ هزار هکتار بوده که ۱/۳۵ برابر حد مجاز است. هر چند عدم رعایت الگوی مناسب کشت نیز مزید بر علت بر مصرف آب بخش کشاورزی افزوده است. در همین زمینه مطالعات Talebi و Hossein Abad (۲۰۱۴) در مورد نسبت مصرف به آب تجدیدپذیر در حوضه آبریز قره‌قوم، رقم ۱/۲۴ را نشان داده است که با توجه به استاندارد، نشانه عدم تعادل در بیلان است. این بدان معنی است که برای رسیدن به تعادل کمی بایستی مصارف حوضه آبریز قره‌قوم حدود ۲۰ درصد و برای دستیابی به تعادل کیفی ۴۴ درصد کاهش یابد.

به‌طورکلی نتایج تحقیق بیانگر شرایط نامناسب حوضه آبریز قره‌قوم از نظر بیابان‌زایی و تخریب سرزمین است. این در حالی است که سطح آب زیرزمینی آبخوان‌های حوزه آبریز قره‌قوم با میانگین ۲۱/۳۸ - متر، بیشترین افت را نسبت به سایر آبخوان‌های آبرفتی واقع در حوضه‌های آبریز کشور دارا می‌باشد (Ghasemi Aryan, Y., 2024; Zndifar., 2023). در همین راستا، سایر منابع پایه حوضه،

بیابان‌زایی IMDPA مورد بررسی قرار گرفته تا وضعیت تخریب سرزمین و بیابان‌زایی به شکل دقیق‌تر ارائه شود. بیشترین محدودیت در زمینه انجام تحقیقاتی از این دست، فقدان یا کمبود داده‌های دقیق در رابطه با نظارت و پایش شاخص‌ها، طی سالیان گذشته است، در این زمینه نیز پیشنهاد می‌گردد سیستم‌های پایش و اعلام هشدار بیابان‌زایی طراحی و اجرا گردد.

سیاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی «مطالعات تخریب خاک و فرونشست تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران (حوزه آبریز قره‌قوم)» با کد مصوب ۰۹-۱-۰۹-۵۴۳-۹۹۰۲۵-۹۹۰۳۰-۰۹ با حمایت مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان مقاله از معاون محترم پژوهشی آن مؤسسه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

شامل خاک و پوشش گیاهی نیز از وضعیت مساعدی برخوردار نیستند. به‌طوری‌که ۱۱ کانون بحرانی فرسایش بادی و گردوغبار با مساحتی در حدود ۱۳۵ هزار هکتار در شهرستان‌های سرخس، مشهد، تربت‌جام و تایباد فعال بوده که پیامدهای مخرب اجتماعی، اقتصادی و اکولوژیکی فروانی را به‌ویژه در شهرهای مشهد و سرخس به همراه داشته است (Ghasemi Aryan, Y., 2022). در این میان، نتایج تحقیقات در مورد وضعیت تغییرات اقلیمی نیز مؤید شدت این رخداد در شمال‌شرق ایران است (Eskandari Damanah et al., 2021a; Naeim et al., 2022). شرایط را برای هر گونه مدیریت و اقدام برای افزایش تاب‌آوری سرزمین بیش از پیش دشوار می‌نماید. نتایج این تحقیق می‌تواند در آگاهی‌رسانی، حساس‌سازی و تقویت هماهنگی بین نهادهای مرتبط با مدیریت پایدار سرزمین مؤثر واقع گردد. در همین راستا، پیشنهاد می‌گردد ضمن بررسی روند تغییرات اقلیمی و تبیین پیامدهای آن در حوزه آبریز قره‌قوم، سایر معیارها و شاخص‌های مدل

References

- Abdi, J., 2007. Investigation and preparation of desertification intensity map based on IMDPA model with emphasis on two criteria of water and soil in Abu Zaidabad. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Iran. (In Presian).
- Adem, E., Shults, R., Ukasha, M., Elfeki, A., Alqahtani, F., & Elhag, M., 2024. Land subsidence and groundwater storage change assessment using InSAR and GRACE in the arid environment of Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06733-8>
- Akbari, Morteza, Masoud Jafari Shalamzari, Hadi Memarian, and Atefeh Gholami., 2020. "Monitoring desertification processes using ecological indicators and providing management programs in arid regions of Iran." *Ecological Indicators* 111: 106011. (In Presian). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106011>
- Baartman, J. E., van Lynden, G. W., Reed, M. S., Ritsema, C. J., & Hessel, R., 2007. Desertification and land degradation: origins, processes and solutions. DESIRE Report series: Scientific Report, (Wageningen: DESIRE).
- Eskandari Damanah, H. and Ghasemi Aryan, Y., 2025. Investigating the trend and explaining the key drivers of desertification and land degradation in Salehiyeh wetland and Qazvin salt plain. *Integrated Watershed Management*, 4(4): 81-93. doi: 10.22034/iwm.2024.2026209.1146
- Eskandari Damanah, H., Eskandari Damanah, H., Sayadi, Z., & Khoorani, A., 2021a. Evaluation of spatiotemporal changes and correlations of aerosol optical depth, NDVI and climatic data over Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(4): 772-786. (In Presian). <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125252>
- Eskandari Damanah, H., Gholami, H., Telfer, M. W., Comino, J. R., Collins, A. L., & Jansen, J. D. 2021b. Desertification of Iran in the early twenty-first century: assessment using climate and vegetation indices. *Scientific Reports*, 11(1): 20548. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99636-8>
- Eskandari Damanah, H., Gholami, H., Mahdavi, R., Khoorani, A. and Li, J., 2022. Evaluation of land degradation trend using satellite imagery and climatic data (Case study: Fars province). *Desert Ecosystem Engineering*, 8(24): 49-64. doi:

- 10.22052/deej.2018.7.24.35
- Farahani, A., & Darvish, M., 2013. Assessment and generating desertification map using FAO and UNEP method in Kavire-e-Meighan basin. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 19(4), 547-556. (In Presian). <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2013.3027>.
 - Ghasemi Aryan, Y., 2022. Monitoring of dust sources and shifting sand in Khorasan Razavi province. Final project report, Research institute of forests and rangelands. 188. (In Presian).
 - Ghasemi Aryan, Y., 2023. Comprehensive studies of soil degradation and subsidence under the influence of groundwater resources in the plains of Iran (Case Study: Qare-qom Basin). Final project report, Research institute of forests and rangelands, Pp. 188. (In Presian).
 - Ghasemi Aryan, Y., 2023. Investigation and quantitative study of underground water and its zoning in Qareqom basin. Final project report, Research institute of forests and rangelands. 88. (In Presian).
 - Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. U., & Wang, S. J., 2004. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1-2), 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.006>
 - Jamab consulting engineering., 1994. water resources studies in the Qareqom basin. Khorasan Razavi Regional Water Company. Bureau of basic studies of water resources. (In Presian).
 - Kassas, M., 1995. Desertification: a general review. *Journal of arid environments*, 30(2), 115-128. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(05\)80063-1](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(05)80063-1)
 - Khosravi, H., Zehtabian, G. R., Abolhasani, A., & Eskandari Damaneh, H., 2019. Assessment, Monitoring and Early Warning System for Desertification Based on Water Criterion (case Tudy: Kashan, Iran). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 629-637. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-629-2019>
 - Kohbanani, H., Yazdani, M. R., & Hosseini, S. K., 2019. Mapping Land Subsidence Hazard through InSAR (Case study: Kashmar and Khalil Abad plain). *Desert Management*, 7(13), 65-76. (In Presian). <https://doi: 10.22034/jdmal.2019.36526>
 - Lee, E. J., Piao, D., Song, C., Kim, J., Lim, C. H., Kim, E., ... & Lee, W. K., 2019. Assessing environmentally sensitive land to desertification using MEDALUS method in Mongolia. *Forest Science and Technology*, 15(4): 210-220. <https://doi.org/10.1080/21580103.2019.1667880>.
 - Lyu, H. M., Shen, S. L., Zhou, A., & Yang, J., 2020. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717, 135310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135310>
 - Naeimi, M., Mirakbari, M., Khosroshahi, M., Zandifar, S., & Ghasemi Aryan, Y., 2022. Analyzing the effects of climate change on dust events, a case study: Khorasan Razavi province. *Desert Ecosystem Engineering*, 10(33): 65-78. (In Presian). <https://doi: 10.22052/deej.2021.10.33.41>.
 - 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. (In Presian). <https://doi: 10.22098/mmws.2022.11906.1187>.
 - Sarbaz H, Aghamiri M., 2023. Policymaking and cross-sectoral management to solve the problem of subsidence phenomenon in Iran. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*. 9 (2): 5. (In Presian).
 - shahedi, M., & Talebi Hossein Abad, F., 2014. Introducing few indices to evaluate the balance of Water Resources and sustainable development (Case Study: Qareh-Qum Basin in Iran). *Journal of Water and Sustainable Development*, 1(1): 73-79. (In Presian). <https://doi: 10.22067/jwsd.v1i1.34603>.
 - 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. (In Presian). <https://doi: 10.22034/iwm.2021.247940>
 - Shokoohi, A., Zehtabiyan, Gh., & Tavili, A., 2013. Study of desertification status using IMDPA model with emphasis on water and soil criteria (Case study: Khezr Abad - Elah Abad of Yazd - plain). *Journal of Rangeland and Watershed Management. Iranian Journal of Natural Resources*, 4: 517 -528. (In Presian). <https://doi:10.22059/jrwm.2012.32050>
 - Soleimanpour S M, Naeimi M, Rahmati O, Moatamednia M. Investigate Desertification using Underground Water and Subsidence Criteria by IMDPA Model (Case Study: Rafsanjan Watershed). *E.E.R.*, 2024; 14 (2):126-140. (In Presian).
 - Studies on updating the country's comprehensive water plan in the watersheds of the east of the country, Tous-Ab consulting engineers., 2018. (In Presian).
 - Toosab Consulting Engineering., 2015. Update report on the integration of water resources studies in the

- Qareqom basin. Report No. 430517-4673. Khorasan Razavi Regional Water Company. Bureau of basic studies of water resources. (In Presian).
- Yue, H., Hanssen, R., Van Leijen, F., Marinkovic, P., & Ketelaar, G., 2005. Land subsidence monitoring in city area by time series interferometric SAR data. In Proceedings. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 7: 4590-4592. IEEE. <https://doi:10.1109/IGARSS.2005.1526689>
 - Zakerinejad, R., masoudi, M., Fallah shamsi, R., & Afzali, F., 2012. Assessment of Desertification using ground water criteria and GIS (case study: Zarin Dasht Fars). Irrigation and Water Engineering, 2(3), 1-10. (In Presian).
 - Zandifar, S., 2023. Quantitative assessment and zoning of groundwater resources in the plains of Iran. Final project report, Research institute of forests and rangelands. (In Presian).
 - Zehtabian G, khosravi H, Eskandari Damaneh H, Abolhasani A., 2018. An Iranian Model of Desertification Potential Assessment for Sustainable Regional Development. E.E.R. 8 (1):21-38. (In Presian).
 - Zhao, F., Gong, W., Tang, H., Pudasaini, S. P., Ren, T., & Cheng, Z., 2023. An integrated approach for risk assessment of land subsidence in Xi'an, China using optical and radar satellite images. Engineering Geology, 314, 106983. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106983>.