



Land degradation modeling based on land subsidence rates: A case study of Semnan province

Maryam Naeimi^{1*} , Adel Jalili² , Samira Zandifar³ , Azadeh Gohardoost⁴  and Seyed Jafar Seyed Akhlaghi⁵

- 1*- Corresponding author, Associate Prof., Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, E-mail: naeimi@rifr-ac.ir
2- Prof., Botany Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Associate Prof., Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
4- Researcher, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
5- Assistant Prof., Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 20.10.2025

Revised: 28.12.2025

Accepted: 25.01.2026

Abstract

Background and Objective: In recent decades, environmental consequences of excessive groundwater extraction—driven by population growth and agricultural development—have caused irreparable losses to ecosystem structure, including land subsidence. Land subsidence can be regarded as the final stage of land degradation in arid and desert regions. Semnan Province is the third arid/desert province in Iran and has become a migration destination in recent years due to its location along the Tehran–Mashhad corridor. This study aims to assess land degradation using the original IMDPA (Iranian model of desertification potential assessment) and the developed IMDPAS (Iranian model of desertification potential assessment with subsidence), based on two main criteria: groundwater status and the rate of land subsidence in Semnan Province.

Methodology: According to the study objectives, this work models and numerically evaluates land degradation in six areas subject to land subsidence—Ivanaki, Garmsar, Semnan, Damghan, Bastam, Shahroud, and Miami—in Semnan Province. The assessment employs the principal IMDPA model and its extension (IMDPAS), integrating two groundwater criteria—level-drop indices, electrical conductivity (EC), and sodium adsorption ratio (SAR)—along with a land-subsidence-rate criterion. Groundwater level-drop data were obtained from piezometric and observational wells for 2015–2016, while water-quality data for 2014–2018 were sourced from the Ministry of Energy. To characterize subsidence, radar interferometry analyses were conducted using two Sentinel-1 A (SLC) acquisitions from August to December 2016, provided by the Geological and Mineral Exploration Organization. Subsequently, study areas were zoned by subsidence rates after scoring and classifying degradation severity for each criterion. The numerical degradation assessment was then repeated by (i) computing the geometric mean of the two main criteria and applying the original IMDPA classification, and (ii) reclassifying using a new proposed scheme. Finally, results were analyzed through comparative assessments.

Results: The results indicate notable spatial differences in degradation when assessed with groundwater criteria (water level drop, EC, and SAR) and subsidence data. Based on water depletion, EC and SAR showed land degradation of 87%, 57%, and 100% as degraded in the whole province, while the largest shares were in Damghan, Garmsar, and Shahrood areas. Subsidence analysis for Semnan Province shows that the subsidence rate in 2016 varied, with 62% of subsiding areas falling into the medium class (1.5–3 cm); Shahrood accounts for 38% of this medium-class subsidence. The sole observed site in the very severe subsidence category (>6 cm) is in Garmsar.

Applying the original IMDPA classification, 99% of the province fell within the moderate degradation class. When reclassified using the developed IMDPAS scheme, the severity class shifts to a 40% increase in the severe category, indicating that the areas with the highest land degradation intensity shift to Shahrood, Semnan, Ivanaki, and Miami under the new scheme. A finer-scale analysis of agricultural land use from 2011–2021 shows an expansion of irrigated garden crops in Garmsar, Damghan, and Shahrood, corroborating the observed degradation patterns and groundwater withdrawals in these areas.

Conclusion: Examining land degradation in Semnan Province—one of Iran's three arid/desert provinces with a dry climate, recurrent droughts, limited rainfall and water resources, and a naturally declining water table—reveals a critical ecosystem state when assessed using groundwater criteria and land-subsidence rates. The findings underscore the need to revisit the class definitions in land-degradation indicators and criteria to reflect the fragile conditions of arid/desert ecosystems. Moreover, analyses of land area and agricultural production suggest adopting new technologies, implementing modern irrigation practices, and reducing cultivation in arid/desert regions to mitigate impending water shortages and subsidence.

Keywords: Desertification, land subsidence, groundwater resources, IMDPAS, Semnan province.

مدل سازی تخریب سرزمین مبتنی بر نرخ فرونشست زمین (مطالعه موردی: استان سمنان)

مریم نعیمی^{۱*}، عادل جلیلی^۲، سمیرا زندی^۳، آزاده گوهر دوست^۴ و سیدجعفر سیداخلاقی^۵

*۱- نویسنده مسئول، دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، پست الکترونیک: naeimi@rifr-ac.ir

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

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

۴- محقق، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۵

چکیده

سابقه و هدف: در دهه‌های اخیر، پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی به دلیل رشد جمعیت و توسعه کشاورزی، منجر به زیان‌های جبران‌ناپذیری بر پیکره اکوسیستم از جمله فرونشست زمین شده که می‌توان به عنوان آخرین مرحله تخریب سرزمین در مناطق خشک و بیابانی یا بیابان‌زایی دانست. استان سمنان، سومین استان خشک و بیابانی کشور بوده که به دلیل قرارگیری در مسیر جاده تهران-مشهد از جمله اهداف مهاجرت هموطنان در سالهای اخیر بوده است. بنابراین هدف این پژوهش، ارزیابی وضعیت تخریب سرزمین با استفاده از مدل اصلی IMDPA و توسعه یافته IMDPAS بر پایه دو معیار اصلی آب زیرزمینی و معیار نرخ فرونشست زمین در استان سمنان است.

مواد و روش‌ها: با توجه به هدف این پژوهش، مدل‌سازی و ارزیابی عددی تخریب سرزمین در شش محدوده مطالعاتی مواجه با فرونشست زمین شامل ایوانکی، گرمسار، سمنان، دامغان، بسطام، شاهرود و میامی در استان سمنان با استفاده از مدل اصلی IMDPA و توسعه یافته آن بر پایه دو معیار اصلی آب زیرزمینی شامل شاخص‌های افت تراز، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم و معیار نرخ فرونشست زمین انجام شد. داده‌های معیار افت تراز آب زیرزمینی با استفاده از چاه‌های پیزومتری و مشاهده‌ای در بازه زمانی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ و داده‌های کیفیت در دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۹۳ در محدوده دشت‌های مورد مطالعه از وزارت نیرو اخذ شد. به منظور بررسی فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری و تصاویر Sentinel A از نوع SLC در بازه زمانی ۲۰۲۰/۰۸ تا ۲۰۲۰/۱۲ اخذ شده از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، استفاده گردید. در ادامه، محدوده‌های مطالعاتی دارای نرخ فرونشست زمین پس از امتیازدهی و طبقه‌بندی شدت تخریب براساس شاخص موردنظر در هر معیار، پهنه‌بندی شدند. سپس ارزیابی عددی تخریب سرزمین با استفاده از میانگین هندسی از هر دو معیار با کلاسه‌بندی معرفی شده در مدل اصلی و بعد با به‌کارگیری طبقه‌بندی پیشنهادی جدید تکرار شده و در نهایت نتایج به کمک مقایسه‌های کاربردی تحلیل گردید.

نتایج و یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد که براساس معیار آب زیرزمینی افت سطح تراز آب، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم به ترتیب ۸۷، ۵۷ و ۱۰۰ درصد کل استان در وضعیت تخریب خیلی شدید قرار دارد که بیشترین سهم در دامغان، گرمسار و شاهرود می‌باشد. بررسی نرخ فرونشست در استان سمنان نشان می‌دهد که بتا هفت سانتی‌متر در سال ۱۳۹۵ متغیر بوده که در مجموع محدوده‌های دارای فرونشست در استان، ۶۲ درصد در کلاس متوسط (۳-۱/۵ سانتی‌متر) قرار داشته که در مجموع ۳۸ درصد آن نیز در شاهرود

قابل گزارش است. همچنین، تنها نقطه دارای فرونشست در کلاس بسیار شدید (بیشتر از ۶ سانتی‌متر) در گرمسار است. در نهایت، کلاسه‌بندی شدت تخریب با استفاده از مدل اصلی حاکی از قرارگیری ۹۹ درصد استان در کلاس متوسط بود؛ که با تغییر کلاسه‌بندی در مدل توسعه یافته افزایش ۴۰ درصدی در کلاس شدید را به همراه داشته و حاکی از آن است که کلاس شدید و بالاترین شدت تخریب سرزمین در محدوده‌های مطالعاتی شاهرود، سمنان، ایوانکی و میامی قرار دارد. در نهایت، بررسی دقیق‌تر سطح زیرکشت محصولات کشاورزی در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ نشان از افزایش سطح زیرکشت محصولات باغی پر آب‌خواه در مناطقی مانند گرمسار، دامغان و شاهرود بود که تأییدکننده نتایج شدت تخریب سرزمین در مناطق مذکور ناشی از برداشت‌های آب زیرزمینی است.

نتیجه‌گیری: بررسی شدت تخریب سرزمین با استفاده از معیارهای آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین در استان سمنان، به‌عنوان یکی از سه استان خشک و بیابانی کشور با وضعیت اقلیمی خشک، خشکسالی‌های مداوم، بارش و منابع آبی محدود و طبیعتاً افت تراز ایستابی وضعیت اکوسیستم را بحرانی نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر ضرورت بازبینی کلاس‌های تعریف شده در شاخص‌ها و معیارهای مدل‌های اندازه‌گیری تخریب سرزمین با توجه به شرایط بحرانی اکوسیستم‌های شکننده خشک و بیابانی در کشور است. همچنین، بررسی سطح زیرکشت کشور و محصولات در استان نشانگر الزام بهره‌گیری از فناوری جدید و اعمال روش‌های نوین آبیاری و کاهش سطح زیرکشت در مناطق خشک و بیابانی، برای جلوگیری از بروز بحران آب و فرونشست زمین پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیابان‌زایی، فرونشست زمین، منابع آب زیرزمینی، مدل IMDPAS، استان سمنان.

مقدمه

فرونشست زمین از جمله رخنمون‌های تخریب سرزمین بوده که جایگاه ویژه‌ای از دیدگاه محیط‌زیست، اکوسیستم و خاک دارد. تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با نام «بیابان‌زایی» نیز معرفی شده است، یکی از بحران‌های بنیادین محیط‌زیستی و توسعه پایدار، ماهیتی خزنده، تدریجی و به‌ظاهر نامحسوس دارد؛ با این حال تداوم آن، تهدیدی جدی برای تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و بقای منابع طبیعی تجدیدشونده محسوب می‌شود (Golshiriasfahani & Sarai, 2013; Rafi Sharifabad & Alipour, 2023). این فرایند نه تنها پیامد فشارهای فزاینده انسانی بر سامانه‌های طبیعی، مانند استفاده بی‌رویه از ظرفیت سرزمین و تخریب پوشش گیاهی، بلکه نتیجه تشدیدکننده عوامل اقلیمی نظیر خشکسالی‌های مکرر و تغییرات اقلیمی است که در تعامل با یکدیگر روند تخریب سرزمین را تسریع می‌کنند.

در سال‌های اخیر، فرونشست زمین از یک فرایند فیزیکی صرف فراتر رفته و به مسئله‌ای با پیامدهای گسترده اجتماعی-اقتصادی، زیست‌محیطی و امنیتی (Fang et al., 2022) و تهدید جدی پایداری اکوسیستم‌های مناطق خشک

و نیمه‌خشک تبدیل شده است. این پدیده تاکنون در بیش از ۱۵۰ کشور جهان گزارش شده و نرخ‌های قابل‌توجه آن در مناطقی مانند حوزه کالیفرنیا (Lees & Knight, 2024)، مکزیک (Fernández-Torres et al., 2025)، ایران (Abd-Elhamid et al., 2022)، اندونزی (Bramanto et al., 2023) و دشت چین (Chai et al., 2024) گزارش شده است. براین‌اساس، فرونشست زمین به‌عنوان یک محرک مکانی-زمانی متنوع و ناهمگون، به عنوان عاملی کلیدی در تغییرات ژئومورفولوژیک معرفی خواهد شد (Brown & Nicholls, 2015).

ایران از جمله کشورهایی بوده که با توجه به تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به مدد ازدیاد جمعیت، در مناطق دشتی، مواجه با پدیده فرونشست زمین است. گزارش‌ها حاکی از آن است که ۵۰ درصد از دشت‌های ایران (۳۰۰ دشت) در خطر فرونشست قرار دارند (Motagh et al., 2008; Haghshenas & Motagh, 2024) که خسارت‌ها و خطرات فراوانی برای زیرساخت‌ها، مناطق کشاورزی، مسکونی و مسیرهای ارتباطی به وجود آورده است (Sun et al., 1999).

سرزمین با تعداد شاخص‌های محدود، ازجمله آب زیرزمینی (Saleh et al., 2023) است.

از سویی، نتایج پژوهش‌های بین‌المللی (Ma et al., 2019; Sajad et al., 2023) و داخلی (Soleimanpour et al., 2024; Ghasemi Aryan et al., 2024) گویای آن است که فرونشست زمین، به‌عنوان یکی از پیامدهای مستقیم افت سطح آب‌های زیرزمینی و بهره‌برداری‌های ناپایدار از منابع، نقش کلیدی در تشدید فرایند تخریب سرزمین ایفا می‌کند. بالاین‌حال، نتایج متفاوت در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف نشان‌دهنده ضرورت رویکردی تلفیقی و بین‌رشته‌ای است که بتواند همزمان عوامل طبیعی و انسانی را لحاظ کند. از این منظر، توجه به داده‌های بومی و شرایط اقلیمی-اکولوژیکی هر منطقه نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای دقت مدل‌ها، بهبود قابلیت پیش‌بینی و درنهایت، پشتیبانی از سیاست‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی پایدار برای مقابله با روند فزاینده تخریب سرزمین دارد.

هدف این پژوهش، به‌کارگیری یک رویکردی ترکیبی مبتنی بر ادغام داده‌های افت سطح ایستابی، کیفیت آب زیرزمینی و فرونشست زمین به‌منظور ارزیابی ظرفیت تخریب سرزمین و بیابان‌زایی در استان سمنان، یکی از استان‌های خشک کشور و تهیه شاخص‌ها و نقشه‌های کاربردی برای پشتیبانی از سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آب و خاک است. با توجه به محدودیت‌های شدید منابع آب در استان سمنان و سهم قابل‌توجه کشاورزی در مصرف آب، تخریب سرزمین و بیابان‌زایی با استفاده ناهمگن از منابع آب زیرزمینی و نوسانهای فرونشست زمین می‌تواند امنیت غذایی، تاب‌آوری اقتصادی روستاها و پایداری اکوسیستم‌های محلی را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش با همزمان‌سازی داده‌های افت سطح ایستابی، نرخ فرونشست و کیفیت آب زیرزمینی، به‌دنبال استخراج الگوهای فضایی-زمانی و شناسایی مناطق حساس به تخریب سرزمین است تا مبنای تصمیم‌گیری برای مدیریت کاربری اراضی، بهبود کارایی استفاده از آب کشاورزی و کاهش فشار بر منابع آبی زیرزمینی را فراهم نماید. همچنین، نتایج می‌تواند نقشی راهبردی در

(Kok & Costa, 2021). مشخصاً، تداوم این شرایط نه تنها زیرساخت‌های شهری و کشاورزی را در معرض آسیب جدی قرار می‌دهد، بلکه از طریق کاهش امنیت غذایی، افزایش مهاجرت و تسریع در فرایند تخریب سرزمین، به چالشی راهبردی در مدیریت سرزمین و امنیت زیست‌محیطی تبدیل خواهد شد.

به‌منظور بررسی میزان تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناخت دقیق معیارها و شاخص‌های مؤثر، پیش‌شرطی بنیادین برای توسعه مدل‌هایی است که بتوانند شدت و گستره این پدیده را پایش نموده و بستر لازم را برای مدیریت و برنامه‌ریزی اصولی در نواحی مذکور فراهم نمایند. در این رابطه، تاکنون پژوهش‌های متعددی با بهره‌گیری از مدل‌های چند معیاره و شاخص‌های متنوع برای ارزیابی و برآورد شدت تخریب سرزمین انجام شده است (Khosravi et al., 2014; Han et al., 2021; Lan et al., 2023). مرور مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که تخریب سرزمین به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پدیده‌ای چندعاملی و پیچیده است که در اثر تعامل فعالیت‌های انسانی و مدیریتی (Azizi et al., 2019)، اقلیمی و زمین‌شناسی بروز می‌کند (Meza et al., 2022). با توجه به محدودیت‌های مناطق خشک و بیابانی در ارتباط با اقلیم (تداوم خشکسالی‌ها) (Zandifar et al., 2022)، خاک (وجود خاک‌های فقیر و شور و قلیا) و اثر فعالیت‌های انسانی مانند سوء مدیریت سرزمین شامل برداشت‌های بی‌رویه و عدم بهره‌برداری با توجه به ظرفیت اکوسیستم از منابع آب و خاک، مشکلات این مناطق را چندین برابر کرده است. این موضوع نشانگر ضرورت ارزیابی و تحلیل تخریب سرزمین است. در همین راستا، استفاده از مدل‌های داخلی مانند IMDPA (Iranian Model of Desertification Potential Assessment) ارائه شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و بر پایه مدل مدالوس (MEDALUS) ارائه شده توسط کمیسیون بین‌المللی اروپا، در پروژه‌های تعیین معیارها و شاخص‌های بیابان‌زایی توصیه می‌شود (Khosravi et al., 2014). از مهمترین مزایای این مدل، توانایی ارزیابی شدت تخریب

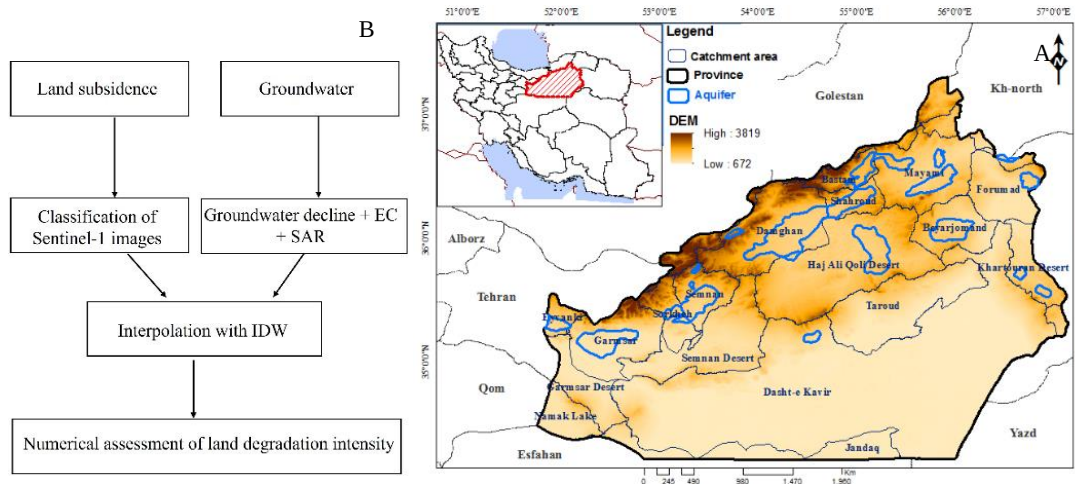
همسو کردن سیاست‌های استانی با الزامات طرح‌های توسعه ملی و چشم‌اندازهای پایداری منابع آب ایفا کند و امکان‌پذیرسازی مدل‌های پیش‌بینی برای سناریوهای اقلیمی-اقتصادی آینده را تسهیل کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان سمنان با وسعت برابر ۹۷۴۷۸ کیلومترمربع، ۶/۳ درصد از مساحت ایران را دربرگرفته و دارای ۶ شهرستان (دامغان، سمنان، شاهرود، گرمسار، بسطام و ایوانکی) می‌باشد و بین ۵۱ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه عرض

شمالی قرار گرفته است (شکل ۱ A). استان سمنان از طرف شمال به استان‌های خراسان شمالی، گلستان و مازندران، از جنوب به استان‌های یزد و اصفهان، از مشرق به استان خراسان رضوی و از مغرب به استان‌های تهران و قم محدود است. میانگین بارش استان کمتر از ۱۲۰ میلی‌متر، یعنی حدود ۴۸ درصد میانگین بارش کشور است و متوسط حجم بارش در استان سالانه حدود ۱۱/۵ میلیارد مترمکعب برآورد می‌شود که ۹/۲ میلیارد مترمکعب آن (۸۲ درصد) از طریق تبخیر مستقیم از دسترس خارج می‌گردد. بررسی شاخص استاندارد شده بارندگی (SPI) در جدول ۱، در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ حاکی از کاهش بارندگی است.



شکل ۱- A. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و B. شماتیک کلی روش تحقیق این پژوهش

Figure 1. A. geographical location of the study area and B. General schematic of the research method of this study

جدول ۱- بررسی شاخص SPI در مناطق مختلف استان در دوره آماری ۱۵ ساله (۲۰۰۳-۲۰۱۷) (Yousefi Mobarhan &

(Khaleghi, 2023)

Table 1. Study of SPI index in different regions of the province in the 15-year statistical period (2003-2017)

(Yousefi Mobarhan & Khaleghi, 2023)

Row	Station	SPI	Class of drought
1	Garmsar	0.77	Normal
2	Semnan	0.91	
3	Shahrood	0.26	Moderate drought
4	Damghan	-0.15	

پژوهش دو تصویر Sentinel A از نوع SLC در بازه زمانی مرداد ۱۳۹۵ تا آذر ۱۳۹۵ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی گرفته شد. پس از اخذ تصاویر با فرمت Geotiff، ابتدا همه تصاویر فرونشست در منطقه مورد مطالعه یکپارچه و بعد موزاییک شدند. در ادامه، پایگاه اطلاعات مرتبط با تصاویر ساخته و تقسیم گردید و در بهترین برازش با بالاترین ضریب تعیین برای کلاسه‌بندی استفاده شد (Naeimi et al., 2025). در ادامه، براساس معیارهای ارائه‌شده در جدول ۲، مقادیر نرخ فرونشست زمین و امتیاز شدت تخریب برای هر محدوده محاسبه شد. سپس، نقشه شدت تخریب سرزمین با استفاده از این شاخص‌ها در نرم‌افزار ESRI ArcGIS Pro (نسخه ۳،۵،۳) و با به‌کارگیری روش درون‌یابی فاصله معکوس (IDW) تهیه گردید. روش درون‌یابی فاصله معکوس یکی از معروف‌ترین روش‌های درون‌یابی بوده که برای تخمین مقدار یک سطح پیوسته در مکان‌های بدون داده و براساس مقادیر نقاط نمونه اطراف استفاده می‌شود. به این معنی که نمونه‌هایی که فاصله نزدیک‌تر دارند ارزش و تأثیر بیشتری باید داشته باشند. با تخصیص وزن به هر نقطه نمونه، براساس فاصله آن تا محل موردنظر کار می‌کند و وزن نهایی براساس فاصله نقاط اطراف و مقدار وزن نیز براساس فاصله خواهد بود.

برای ارزیابی شدت تخریب سرزمین از مدل پایه IMDPA و دو معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین، به‌عنوان معیارهای کلیدی استفاده شد. شکل ۱ قسمت B، شماتیک کلی روش تحقیق در این پژوهش را نشان می‌دهد. براین‌اساس، برای بررسی معیار آب زیرزمینی از سه شاخص افت آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی (Electrical conductivity: EC) و نسبت جذب سدیم (Sodium Absorption Ratio: SAR) بهره گرفته شد. داده‌های این شاخص با استفاده از چاه‌های پیزومتری و مشاهده‌ای به دست آمد. داده‌های تغییرات تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۴ - ۱۳۹۵ نیز به‌منظور تهیه پهنه‌بندی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت‌های مورد مطالعه از وزارت نیرو اخذ شد. برای محاسبه افت، متوسط تغییرات سالیانه عمق سطح آب پیزومترها محاسبه شد. در ارتباط با داده‌های کیفیت آب از داده‌های دوره آماری ۱۳۹۷ - ۱۳۹۳ برای پیشبرد اهداف تحقیق استفاده گردید. نتایج اولیه بررسی داده‌های کمی و کیفی نشان می‌دهد در مجموع به‌ترتیب ۴۷۳۸ و ۵۲۸۶ داده چاه در استان سمنان بررسی شده است. در ادامه، به‌منظور ورود نرخ فرونشست زمین، نقشه محدوده‌های دارای فرونشست به همراه بررسی نرخ و جزئیات آن در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور بررسی فرونشست، از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. در این

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین مؤثر بر شدت بیابان‌زایی در مدل اصلی و توسعه‌یافته

(Naeimi et al., 2025)

Table 2. Indicators for evaluating groundwater quality and land subsidence rate affecting desertification intensity in the original and expanded models (Naeimi et al., 2025)

Assessment Index	Low	Moderate	Severe	Very severe
Groundwater depletion	20>	30-20	50-30	50 <
SAR	18>	26-18	32-26	32<
EC (μmohs/cm)	750>	2250-750	5000-2250	5000 <
Subsidence Rate (centimeters per year)	>-1.49	-1.5--2.99	-3--5.99	-6 <

جدول ۳ کلاس‌ها و وزن‌های اخذ شده برای ارزیابی وضعیت معیارها در مدل (Iranian Model of Desertification Potential Assessment with Subsidence) را نشان می‌دهد. یادآوری می‌شود برای بررسی شدت تخریب سرزمین در این پروژه با استفاده از معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین، امتیازدهی به این معیارها در منطقه مورد مطالعه براساس دو مدل IMDPA و مدل توسعه یافته IMDPAS و داده‌های در دسترس انجام شد.

پس از محاسبه نقشه شدت دو معیار که نشان‌دهنده کیفیت هر معیار و تأثیر آنها در بیابان‌زایی است، نقشه نهایی وضعیت بیابان‌زایی از میانگین هندسی معیارهای یاد شده براساس رابطه ۳ (Khosravi *et al.*, 2014) به دست می‌آید.

$$\text{رابطه ۳} \quad DM = [(GWI \times SRI)]^{(1/2)}$$

که در آن GWI معیار آب زیرزمینی، SRI معیار نرخ فرونشست و DM نقشه وضعیت فعلی بیابان‌زایی است.

جدول ۳- طبقات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در مدل اصلی و توسعه یافته (Nacimi *et al.*, 2025)

Table 3. Land degradation severity classes in the original and expanded models (Nacimi *et al.*, 2025)

Row	Land degradation severity class	Score range in the IMDPA	Score range in the IMDPAS
1	Low	0-1.49	0-0.99
2	Moderate	1.5-2.49	1-1.99
3	Severe	2.5-3.49	2-2.99
4	Very Severe	3.5-4	3-4

نتایج

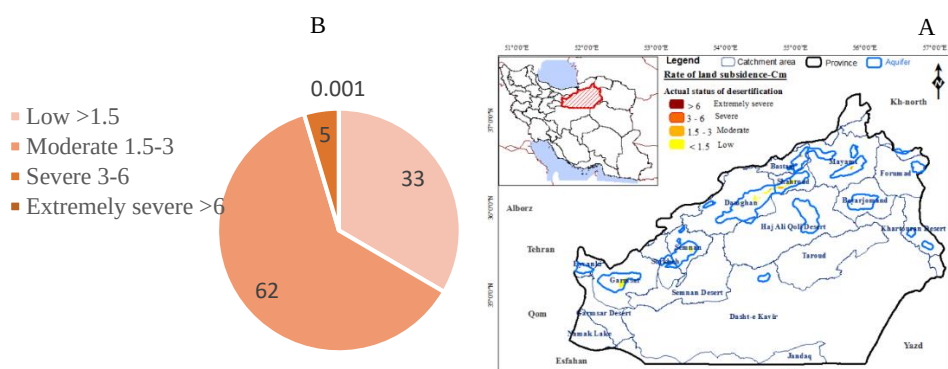
ارزیابی وضعیت فعلی تخریب سرزمین در هریک از شاخص‌ها

معیار نرخ فرونشست زمین

با توجه به شکل ۲، نرخ فرونشست زمین در محدوده‌های مطالعاتی ایوانکی، بسطام، دامغان، میامی، شاهرود، گرمسار و سمنان با مساحت‌های مختلف و نرخ متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین نرخ فرونشست زمین متعلق به محدوده مطالعاتی گرمسار بوده که تا هفت سانتی‌متر قابل گزارش است. همچنین، بسطام، میامی، گرمسار و سمنان تا ۶ سانتی‌متر فرونشست زمین را نیز نشان داده‌اند.

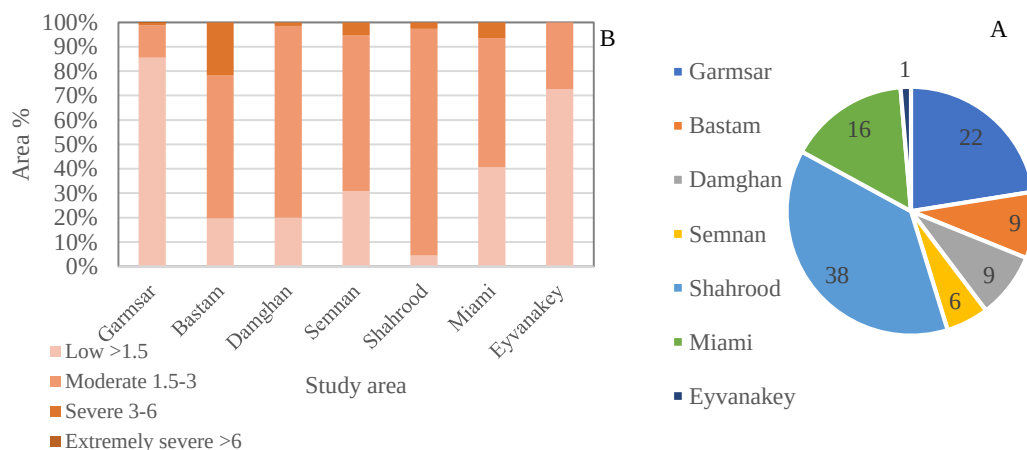
در ادامه، با امتیازدهی به مقادیر فرونشست، شدت تخریب سرزمین از منظر معیار نرخ فرونشست زمین محاسبه شد. شکل ۲ B، پهنه‌بندی طبقات شدت تخریب سرزمین در محدوده استان سمنان از منظر معیار نرخ فرونشست زمین را

در محدوده‌های دارای فرونشست نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، بیشترین و کمترین کلاس‌ها به ترتیب متوسط و بسیار شدید برابر ۶۲ و ۰/۰۰۱ درصد است. همچنین، کلاس‌های کم و شدید به ترتیب دارای ۳۳ و ۵ درصد را تشکیل می‌دهند. در ادامه سهم تخریب سرزمین از منظر نرخ فرونشست زمین در هریک از محدوده‌های مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۳ A، بیشترین نرخ فرونشست در محدوده‌های مطالعاتی شاهرود، گرمسار و میامی برابر ۳۸، ۲۲ و ۱۶ درصد است. بسطام، دامغان و سمنان نیز در مرحله بعدی و زیر ۱۰ درصد مساحت قرار دارند. درصد نرخ فرونشست زمین با توجه به کلاس‌بندی کم، متوسط و شدید در محدوده‌های گرمسار (۸۶ درصد کم)، شاهرود (۹۳ درصد متوسط) و بسطام (۲۲ درصد شدید) قابل گزارش است. همچنین، کلاس بسیار شدید تنها در محدوده گرمسار دیده می‌شود.



شکل ۲- A. وضعیت تخریب سرزمین در مناطق دارای فرونشست با توجه به مدل توسعه یافته IMDPAS و B. درصد مساحت در استان سمنان

Figure 2. A. Actual status of land degradation in subsidence areas according to the developed IMDPAS model and, B. Area percentage of each study area in Semnan province



شکل ۳- A. وضعیت تخریب سرزمین در مناطق دارای فرونشست با توجه به مدل توسعه یافته IMDPAS و B. درصد مساحت در محدوده‌های مطالعاتی استان سمنان

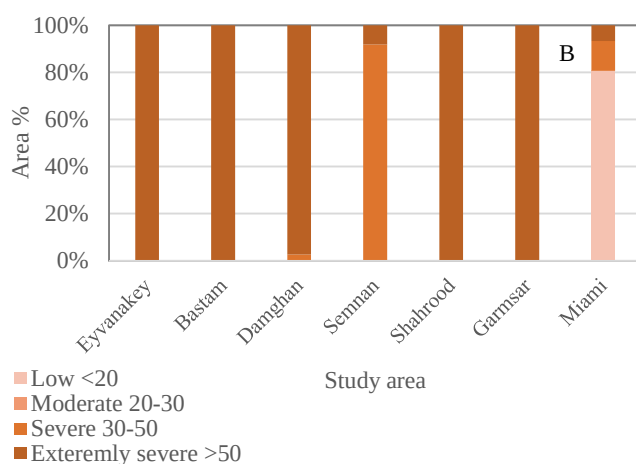
Figure 3. A. Actual status of land degradation in subsidence areas according to the developed IMDPAS model and, B. Area percentage of each study area in Semnan province.

از منظر شاخص افت آب زیرزمینی محاسبه شد. با توجه به نتایج، بیشترین و کمترین کلاس‌ها به ترتیب بسیار شدید و متوسط برابر ۸۷ و ۱ درصد است. همچنین، کلاس‌های کم و شدید به ترتیب دارای ۴ و ۸ درصد را تشکیل می‌دهند. در ادامه سهم تخریب سرزمین از منظر افت آب زیرزمینی در هریک از محدوده‌های مطالعاتی استان سمنان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج در شکل ۵ A، بیشترین میزان

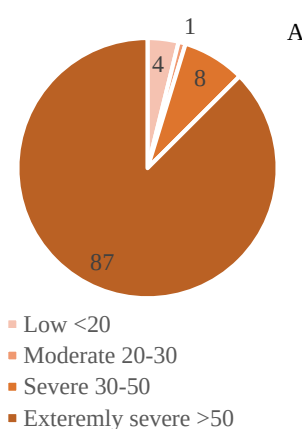
ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی براساس معیار آب زیرزمینی شاخص افت آب زیرزمینی

شکل ۴ کلاس‌بندی به همراه درصد مساحت طبقات شدت تخریب سرزمین استان سمنان از منظر شاخص افت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. با امتیازدهی به مقادیر افت آب زیرزمینی با استفاده از مدل IMDPA، شدت تخریب سرزمین

به ترتیب ۸۳، ۱۶ و ۱ درصد را شامل می‌شود. در نهایت در کلاس بسیار شدید، تمامی محدوده‌ها را شامل شده که دامغان، گرمسار و شاهرود برابر ۴۰، ۱۹ و ۱۱ درصد پیشرو هستند. یافته‌های این بخش از پژوهش بیانگر بازبینی طبقه‌بندی‌های پیشین در شاخص افت آب زیرزمینی است. به عبارت دیگر، با توجه به افزایش افت آب زیرزمینی در سال‌های اخیر، تنها یک یا دو محدوده مطالعاتی در کلاس کم و متوسط و تمامی محدوده‌ها در کلاس بسیار شدید قرار گرفتند.



افت در محدوده‌های مطالعاتی میامی، سمنان و دامغان برابر ۵۲، ۲۳ و ۱۴ درصد است. گرمسار، شاهرود و بسطام نیز در مرحله بعدی و زیر ۵ درصد مساحت قرار دارند. درصد مساحت کلاس کم افت آب زیرزمینی با توجه به کلاسه‌بندی و شکل ۴ A، تنها در محدوده مطالعاتی میامی قابل گزارش است. در کلاس متوسط، افت آب زیرزمینی تنها در محدوده‌های میامی و دامغان برابر ۸۳ و ۱۷ درصد قرار گرفتند. کلاس شدید در محدوده‌های سمنان، میامی و دامغان



شکل ۴- A. کلاسه‌بندی تخریب سرزمین از منظر افت آب زیرزمینی و B. درصد مساحت در محدوده‌های مطالعاتی استان سمنان

Figure 4. A. Classification of land degradation from the perspective of groundwater depletion and, B. Area percentage of each study area in Semnan province

الکتریکی آب زیرزمینی در هریک از محدوده‌های مطالعاتی استان سمنان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج در شکل ۵ A، بیشترین میزان هدایت الکتریکی در آب زیرزمینی در محدوده‌های مطالعاتی بسطام، گرمسار و دامغان برابر ۳۱، ۲۱ و ۱۴ درصد است. سمنان، میامی و شاهرود نیز در مرحله بعدی قرار دارند. درصد مساحت کلاس کم هدایت الکتریکی در آب زیرزمینی با توجه به کلاسه‌بندی و شکل ۵ B، تنها در محدوده مطالعاتی بسطام قابل گزارش است. در کلاس متوسط و شدید، محدوده دامغان با مساحت ۴۴ و ۳۶ درصد در صدر قرار دارد. در نهایت در کلاس بسیار شدید، تمامی محدوده‌ها را شامل شده که سمنان و گرمسار با ۳۳ درصد پیشرو هستند. یافته‌های این بخش از پژوهش بیانگر بازبینی طبقه‌بندی‌های پیشین در شاخص هدایت الکتریکی است. به عبارت دیگر، با

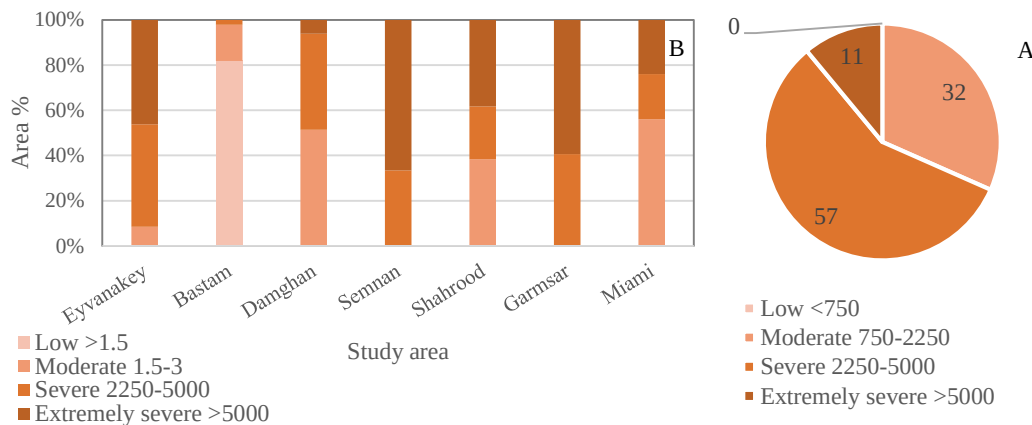
شاخص هدایت الکتریکی

شکل ۵ کلاسه‌بندی به همراه درصد مساحت طبقات شدت تخریب سرزمین استان سمنان را از منظر شاخص هدایت الکتریکی نشان می‌دهد. با امتیازدهی به مقادیر هدایت الکتریکی آب زیرزمینی با استفاده از مدل IMDPA، شدت تخریب سرزمین از منظر این شاخص محاسبه شد. با توجه به نتایج، بیشترین و کمترین کلاس‌ها به ترتیب شدید، متوسط و بسیار شدید برابر ۵۷، ۳۲ و ۱۱ درصد است. همچنین، کلاس کم در منطقه وجود نداشته و براین اساس، آب‌های منطقه از نظر هدایت الکتریکی در شرایط بحرانی است. یادآوری این نکته لازم است که داده‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۱۳۹۷-۱۳۹۳ می‌باشد.

در ادامه سهم تخریب سرزمین از منظر شاخص هدایت

تنها یک محدوده مطالعاتی در کلاس کم قرار گرفته ولی تمامی محدوده‌ها در کلاس شدید و بسیار شدید قرار گرفتند.

توجه به افزایش هدایت الکتریکی در آب زیرزمینی در سال‌های اخیر که به‌طور قطع ناشی از عوامل اقلیمی است،

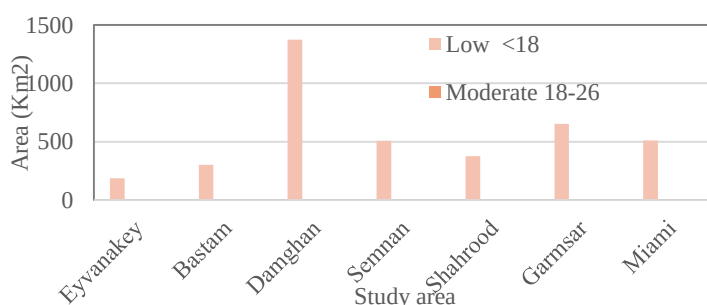


شکل ۵- A. کلاسه‌بندی تخریب سرزمین از منظر افت آب زیرزمینی و B. درصد مساحت در محدوده‌های مطالعاتی استان سمنان

Figure 5. A. Classification of land degradation from the perspective of groundwater depletion and, B. Area percentage of each study area in Semnan province

تخریب سرزمین از منظر معیار افت آب زیرزمینی محاسبه شد. با توجه به نتایج، تمامی محدوده‌های مورد مطالعه در استان سمنان در کلاس کم قرار دارند. این در حالی است که بیشترین و کمترین مساحت کلاس کم به‌ترتیب در دامغان و ایوانکی برابر ۳۵ و ۵ درصد است.

شاخص نسبت جذب سدیم
شکل ۶ نشان‌دهنده کلاسه‌بندی به همراه درصد مساحت طبقات شدت تخریب سرزمین استان سمنان از منظر شاخص نسبت جذب سدیم در آب زیرزمینی است. با امتیازدهی به مقادیر افت آب زیرزمینی با استفاده از مدل IMDPA، شدت



شکل ۶- کلاسه‌بندی تخریب سرزمین از منظر نسبت جذب سدیم در آب زیرزمینی

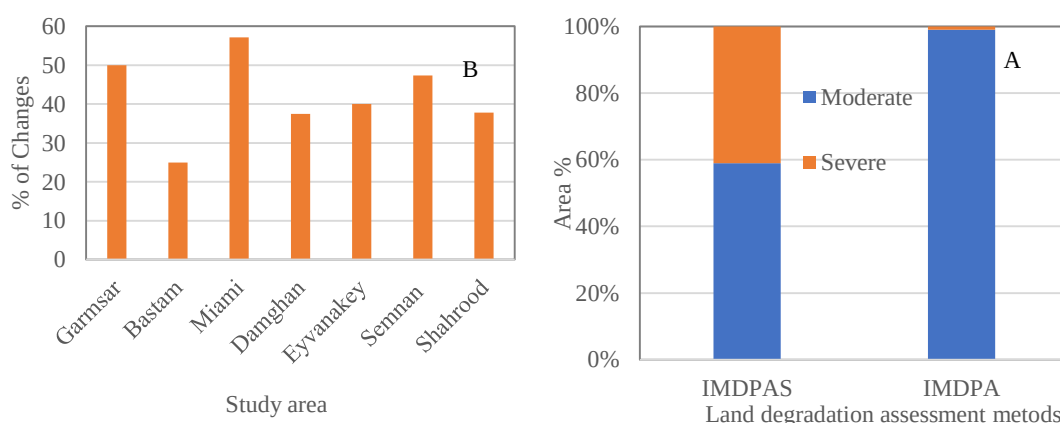
Figure 6. Classification of land degradation from the perspective of SAR in groundwater resources

با استفاده از کلاسه‌بندی مدل IMDPA و بار دیگر با تغییر کلاسه‌بندی با استفاده از مدل MDPAS (Naeimi et al., 2025) ارزیابی انجام شد. در ادامه تفاوت‌های شدت تخریب سرزمین در هر دو طبقه‌بندی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به نتایج در شکل ۷، شدت تخریب سرزمین طبق این

ارزیابی شدت تخریب سرزمین در این مرحله، شدت بیابان‌زایی براساس دو معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست زمین که در مرحله قبل تعیین گردید؛ ارزیابی شد. به این منظور، با هم‌پوشانی معیار آب زیرزمینی و فرونشست، با استفاده از رابطه (۲) و ابتدا ارزیابی

شدید در میامی، گرمسار و سمنان برابر ۵۷، ۵۰ و ۴۷ است. یادآوری می‌شود که کلاسه‌بندی جدید با افزودن نرخ فرونشست زمین به مدل اصلی IMDPA با توجه به محدودیت کلاس شاخص‌های آب زیرزمینی انجام شد؛ بدین صورت که مدل اصلی با توجه به شرایط ۳۰ سال گذشته در کشور انجام شده و با تغییر شرایط اقلیمی و مدیریتی ضرورت تغییر این کلاسه‌بندی الزامیست.

دو معیار در مدل اصلی، در طبقه متوسط و تنها ۱ درصد در طبقه شدید و تنها در محدوده مطالعاتی شاهرود قرار می‌گیرد. این در حالی است که با تغییر کلاسه‌بندی و محدودیت طبقات طبق جدول ۳، در مدل جدید کلاس شدید افزایش ۴۰ درصدی داشته است. همچنین، با توجه به شکل ۷ B، نرخ تغییرات در محدوده‌های مطالعاتی ۲۵-۵۷ درصد و بیشترین درصد تغییر کلاسه‌بندی شدت تخریب سرزمین از متوسط به



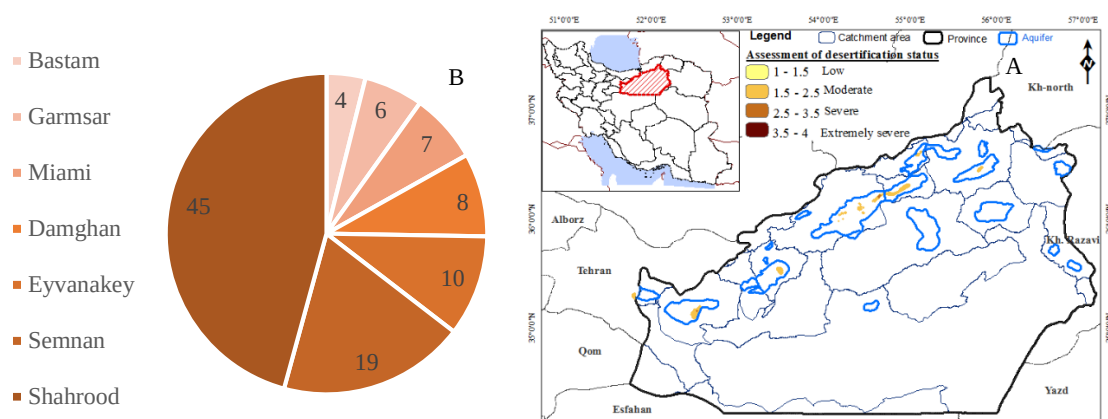
شکل ۷- A. کلاسه‌بندی شدت تخریب سرزمین با استفاده از معیار آب زیرزمینی و نرخ فرونشست در استان سمنان با استفاده از مدل اصلی (IMDPA) و مدل جدید (IMDPAS) و B. درصد مساحت تغییر کلاس متوسط به شدید و ثابت متوسط در محدوده‌های

مطالعاتی استان سمنان

Figure 7. A. Classification of land degradation severity using groundwater criteria and subsidence rate in Semnan province using the original model (IMDPA) and the new model (IMDPAS), and B. Percentage of area changing from moderate to severe and constant moderate class in the study areas of Semnan province

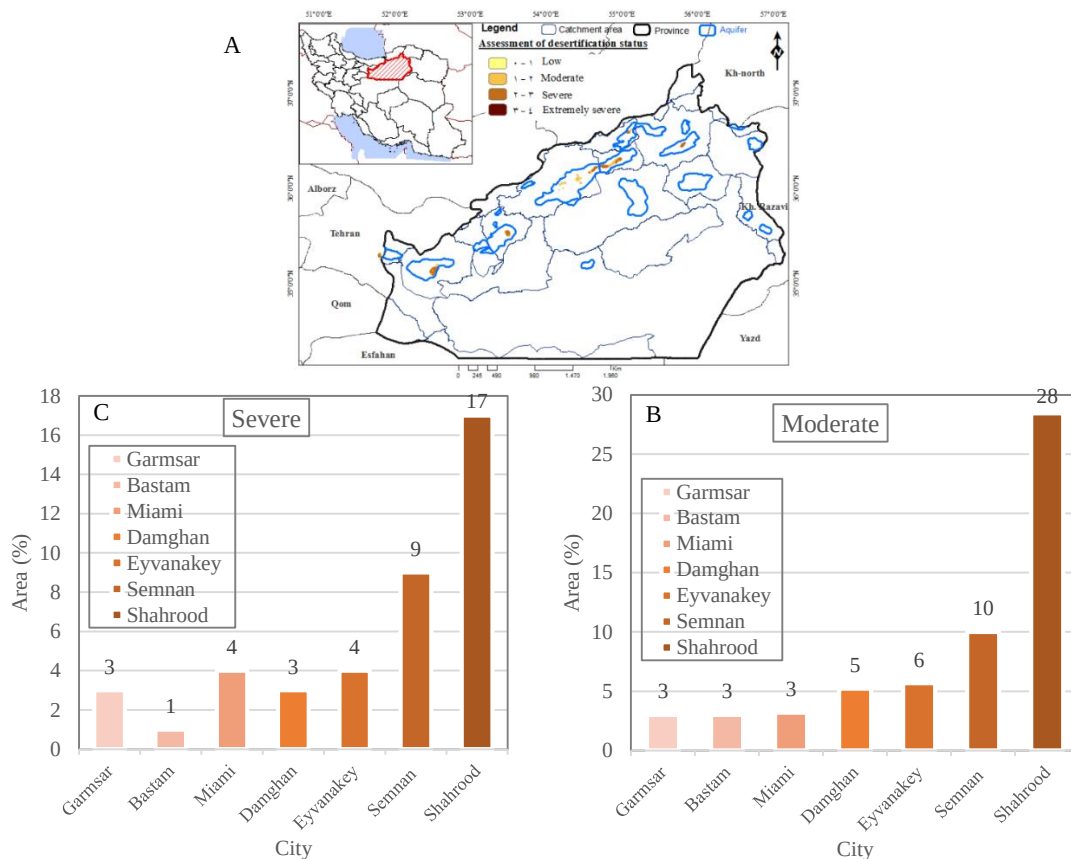
کلاسه‌بندی در مدل جدید، در کلاس متوسط به ترتیب شاهرود، سمنان و ایوانکی با ۲۸، ۱۰ و ۶ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه پیشرو هستند. در طبقه شدت شدید، شهرستان‌های شاهرود، سمنان، میامی و ایوانکی به ترتیب با ۱۷، ۹، ۴ و ۴ درصد از موارد ثبت شده، بیشترین سهم را در این طبقه به خود اختصاص داده‌اند.

در ادامه، شکل‌های ۸ و ۹ نشان‌دهنده پراکنش شدت شدید تخریب سرزمین در محدوده‌های مطالعاتی استان سمنان و بر روی آبخوان‌های دارای فرونشست است. با توجه به شکل ۹، شاهرود، سمنان و ایوانکی بالاترین درصد مساحت به ترتیب برابر ۴۵، ۱۹ و ۱۰ از تخریب سرزمین را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین، با توجه به شکل ۹، پس از تغییر



شکل ۸- A. شدت تخریب سرزمین طبق معیار آب زیرزمینی و فرونشست در استان سمنان با استفاده از مدل IMDPA و B. درصد مساحت هریک از محدوده‌های مطالعاتی در کلاس متوسط

Figure 8. A. Land degradation intensity according to groundwater and subsidence criteria in Semnan province using the IMDPA model and, B. Area percentage of each study area in the moderate class



شکل ۹- A. شدت تخریب سرزمین طبق معیار آب زیرزمینی و فرونشست در استان سمنان با استفاده از مدل IMDPAS و B. درصد مساحت هریک از محدوده‌های مطالعاتی در کلاس‌های متوسط و C. شدید

Figure 9. A. Land degradation intensity according to groundwater and subsidence criteria in Semnan province using the IMDPAS model and, B. Area percentage of each study area in moderate and, C. Severe classes

بحث

امروزه، خشکسالی‌های تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و شیوه‌های نامناسب مدیریت منابع آب شامل آبیاری در اراضی کشاورزی منجر به کاهش قابلیت دینامیکی سفره‌های آب، فرونشست زمین، فشردگی خاک، کاهش آب‌دهی و خشکیدگی برخی چاه‌ها و پیشروی جبهه آب‌شور در نواحی همجوار کفه‌های سفره‌های زیرزمینی شده است (Hadian et al., 2013). این روندها با سرعتی فراتر از ظرفیت تجدیدشونده منابع، منجر به تخریب گسترده سطحی منابع آب و کاهش پایداری زیست‌بوم‌ها شده‌اند.

در استان سمنان، به‌عنوان یکی از سه استان خشک و بیابانی کشور با وضعیت اقلیمی خشک، خشکسالی‌های مداوم، بارش و منابع آبی محدود و طبیعتاً افت تراز ایستابی وضعیت اکوسیستم را بحرانی نشان می‌دهد. درعین‌حال، نتایج مطالعات زمین‌شناسی در استان سمنان نشان می‌دهد که به‌غیر از عوامل اقلیمی، تحت تأثیر دی‌اپیرسم نمکی، ناهمواری‌های ویژه‌ای در این منطقه ایجادشده که سن تقریبی آنها به دوره میوسن می‌رسد. در این ناهمواری‌ها تحت تأثیر فرایندهای تکتونیکی و فرسایشی کارست‌های متنوع نمکی شکل گرفته که می‌توان آنها را در قالب کارست‌های نمکی، چاله‌های بسته، حفره‌های زیرزمینی و اشکال ناشی از فرایندهای هیدرولوژیکی طبقه‌بندی نمود (Maghami Moghim et al., 2024). براین‌اساس، کیفیت آب‌های زیرزمینی تابعی از شرایط زمین‌شناسی نیز کاهش خواهد یافت.

از سویی، ارائه گزارش‌هایی از نرخ فرونشست زمین و طبعاً کاهش فضای آبی زیرزمینی در منطقه مذکور به‌طور همزمان با تغییرات کاربری اراضی و فشارهای کشاورزی، منجر به تخریب سرزمین و پدیده بیابان‌زایی و در سالهای آینده عدم امکان سکنی‌گزینی می‌شود. در این رابطه، پژوهش پیش‌رو با هدف تعیین شدت تخریب سرزمین در این استان، از طریق به‌کارگیری مدل ایرانی IMDPA و توسعه مدل با ورود نرخ فرونشست زمین به همراه معیار آب زیرزمینی و طبقه‌بندی دوباره کلاس‌ها، انجام شده است.

نتایج تخریب سرزمین در هریک از شاخص‌های معیار

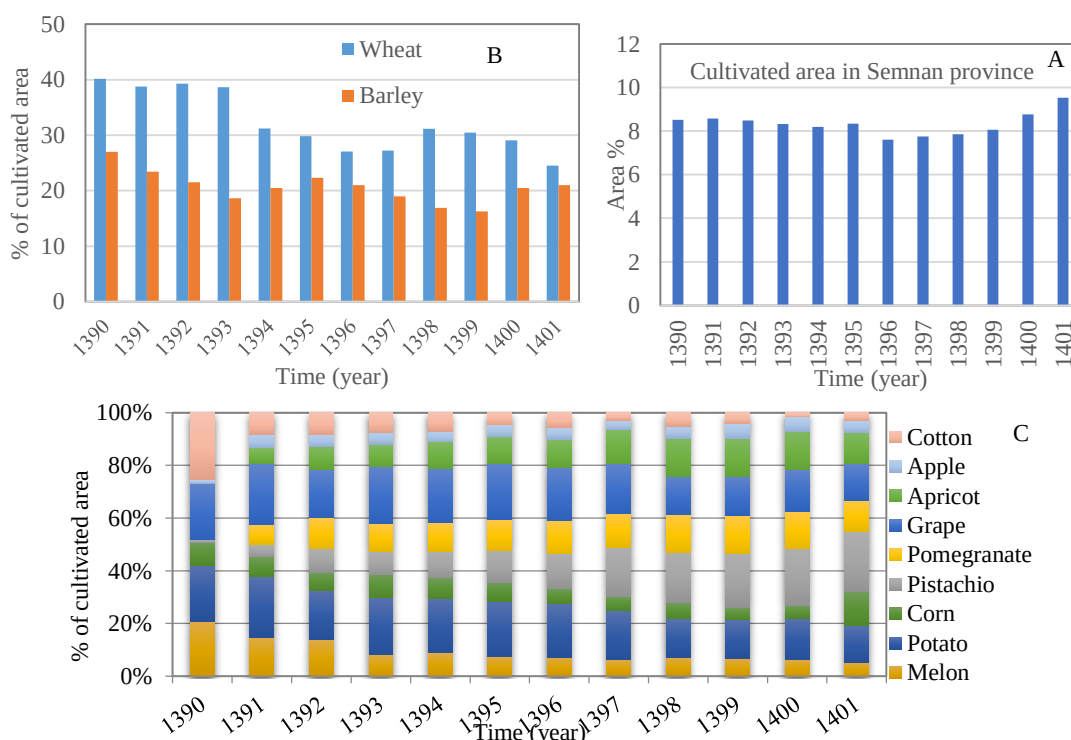
آب زیرزمینی در استان سمنان نشان از عدم پایداری اکوسیستم و توسعه پایدار براساس آمایش سرزمین را مانند دشت کرمان (Mesbah Zadeh & Soleimani Sardo, 2018) و استان خراسان رضوی (Garivani, 2009) دارد. افت تراز آب‌های زیرزمینی در ۸۷ درصد استان سمنان در کلاس بسیار شدید قرار دارد. این در حالیست که هدایت الکتریکی نیز در ۵۷ درصد محدوده مطالعاتی در کلاس بسیار شدید بوده که ناشی از شرایط زمین‌شناسی و عوامل اقلیمی و مدیریتی است. در ارتباط با افزایش تخریب سرزمین، با بررسی معیار آب زیرزمینی نتایج حاکی از آن است که قرارگیری کیفیت منابع آب‌های زیرزمینی در کلاس شدید و بسیار شدید همبستگی مثبت و قابل توجهی با افزایش شوری خاک و کاهش تراز آب زیرزمینی دارد، که این رابطه می‌تواند نقش کلیدی در فرایندهای فرسایشی خاک و به‌ویژه تخریب سرزمین ایفا کند. بیشتر نیز در مناطقی از آفریقا و پاکستان پژوهشی مشابه انجام شده که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد (Qasim et al., 2016; Zalibekov et al., 2019; Dhaouadi et al., 2022). علاوه بر این، کاهش سطح آب زیرزمینی با تشدید نرخ فرونشست زمین همراه است و از طریق تعامل با سایر عوامل هیدروشیمیایی، احتمال و شدت پدیده‌های بیابان‌زایی را افزایش می‌دهد (Naeimi et al., 2025). همچنین، نقش سدیم قابل جذب، مواد آلی و سایر نمک‌ها بر افزایش روند تخریب سرزمین بیشتر نیز موردبررسی قرار گرفته است که با یافته‌های این پژوهش مطابقت دارد (Afzali et al., 2021).

در ادامه به بررسی دلایل افت آب زیرزمینی و فرونشست زمین در استان پرداخته خواهد شد. بررسی جزئی‌تر در روند بارش در استان سمنان نشان می‌دهد که میزان بارش شهرستان سمنان، گرمسار و شاهرود طی ۱۰ سال آبی منتهی به ۱۳۹۴-۱۳۹۵ برابر به‌ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۱۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد (Tavakoli et al., 2021). در این مطالعه دامغان، گرمسار و شاهرود به‌ترتیب بالاترین درصدهای افت آب زیرزمینی را در استان نشان می‌دهند که با مطالعات اقلیمی پیشین (جدول ۱) بررسی شاخص استاندارد شده بارندگی

۱۳۹۰ به حداقل بالای ۵ درصد در سال ۱۴۰۱ هستیم. این در حالی است که سهم ذرت علوفه‌ای که سابقاً نقشی در الگوی کشت منطقه نداشته است، هم‌اکنون ۷/۷ درصد از سطح زیرکشت در استان را به خود اختصاص داده است. این تغییرات به وضوح نشان‌دهنده انتقال تدریجی الگوی کشت از محصولات کم‌آب‌خواه به سمت محصولات پرآب‌خواه است. چنین تحولی، پیامدهای جدی برای منابع آب زیرزمینی داشته و موجب تشدید بحران آب و فرونشست زمین در منطقه شده است. در ادامه، محصولاتی مانند پنبه و خربزه از سطح کشت به ترتیب ۵ و ۶ درصد به زیر ۱ درصد رسیده که عمده سطح زیرکشت در گرمسار با بالاترین افت آب زیرزمینی است. این مطالعه هم نشان داد که بیشترین نرخ فرونشست در دشت‌های گرمسار، شاهرود، میامی، سمنان و دامغان رخ داده که با کانون‌های اصلی کشت محصولات پرآب‌خواه مطابقت دارد.

(SPI)، هماهنگی دارد. همچنین، سمنان، میامی و دامغان نیز در کلاس شدید افت تراز آب زیرزمینی قرار دارند. کاهش بارندگی و به طبع آن منفی‌گرایی در شاخص SPI (جدول ۱) نشانگر کاهش منابع آب زیرزمینی ([Delghandi et al., 2023](#)) و افزایش نرخ فرونشست زمین است.

تحلیل روند تغییرات الگوی کشت در محدوده مطالعاتی، طی سال‌های ۱۳۹۰-۱۴۰۱ با توجه به شکل ۱۰، نشان‌دهنده تحولات در ساختار کشت محصولات کشاورزی به‌ویژه الگوی کشت این منطقه است. براساس آمار و داده‌های سطح زیرکشت (Ministry of Agricultural Jihad, 2022)، سهم گندم در الگوی کشت به عنوان محصول اصلی از ۴۰ درصد در سال ۱۳۹۰ به ۲۵ درصد در سال ۱۴۰۱ کاهش یافته که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه به این محصول راهبردی است. در مقابل، شاهد رشد چشمگیر محصولات باغی پرآب‌خواه از زیر ۱ درصد در



شکل ۱۰- A. سطح زیرکشت در استان سمنان، B. سطح زیرکشت گندم و جو و C. سطح زیرکشت سایر محصولات کشاورزی در بازه

زمانی ۱۳۹۰-۱۴۰۱

Figure 10. A. Cultivated area in Semnan Province, B. Cultivated area of wheat and barley, and C. Cultivated area of agricultural crops in the period 2011-2022.

بررسی و ممانعت بیشتر از ادامه تخریب در مناطق با تخریب شدید برای حفاظت از اکوسیستم شکننده مناطق خشک و بیابانی انجام شود. تحقیقات پیشین در حوزه آبخیز مهارلو-بختگان (Saleh et al., 2022) و دشت رفسنجان (Soleimanpour et al., 2024) نیز نشان داد که به ترتیب ۸۳ و ۱۷ درصد از حوزه در طبقات کم متوسط مدل اصلی قرار گرفته و زیر ۲۰ و ۱۰ درصد نیز در طبقه شدید طبقه بندی شده است؛ این در حالی است که با تغییر کلاسه بندی با مدل IMDPAS و با در نظر گرفتن تراز منفی محدوده های مطالعاتی مذکور شرایط به حالت فوق بحرانی تغییر خواهد یافت. این رویکرد امکان سنجی و تبیین هم افزایی بین تغییرات کمی در سطح ایستابی و کاهش منابع آبی زیرزمینی را فراهم می کند تا بتوان به رویکردهای مدیریتی کارآمد برای کاهش شدت بیابان زایی و حفظ پایداری خاک و آب دست یافت.

سیاسگذاری

این اثر برگرفته از نتایج پروژه تحقیقاتی با عنوان «مطالعات تخریب خاک و فرونشست تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی در دشت های ایران»، با کد ۹۹۰۵۴۳-۹۹۰۲۵-۹۹۰۰۱-۰۹-۰۳۰ مصوب در مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور است. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می دانند از همکاری و پشتیبانی آن مؤسسه، همچنین، از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی و وزارت نیرو برای اخذ داده های فرونشست زمین و کمیت و کیفیت آب زیرزمینی سیاسگذاری و قدردانی نمایند.

از آنجایی که درصد عمده مصارف آب در استان سمنان همانند دیگر نقاط کشور، مربوط به بخش کشاورزی است، افزایش بهره وری آب کشاورزی و اصلاح سامانه های آبیاری به عنوان مهمترین راهکار پیشرو برای مقابله با کمبودهای فیزیکی آب شناخته می شود (Steduto et al., 2007). براین اساس، در جهت کاهش نرخ فرونشست تحت تأثیر آب زیرزمینی، استفاده از روش های نوین آبیاری که موجب افزایش عملکرد کمی و در مواردی کیفی نسبت به روش های سطحی و سنتی مورد انتظار است، پیشنهاد می شود. البته استفاده از آبیاری تحت فشار می تواند مصرف آب آبیاری را بدون آنکه منجر به کاهش تولید محصولات کشاورزی شود، به میزان چشمگیری کاهش دهد (Tavakoli et al., 2021).

تغییر کلاس های شدت بیابان زایی در مدل IMDPA با ورود نرخ فرونشست زمین به معیارها و نام گذاری IMDPAS و مقایسه کلاسه بندی ها حاکی از اضافه شدن کلاس شدید و بالاترین شدت تخریب سرزمین در محدوده های مطالعاتی شاهرود، سمنان، ایوانکی و میامی است. در مدل اصلی و کلاسه بندی قدیمی ۹۹ درصد منطقه در کلاس متوسط قرار گرفت؛ در حالی که کلاسه بندی جدید منجر به افزایش ۴۰ درصدی کلاس شدید شد. ضرورت تغییر کلاسه بندی برای تعیین شدت بیابان زایی با توجه به شرایط اقلیمی، برداشت های بی رویه ناشی از فشار کشاورزی و افزایش جمعیت و سوء مدیریت اجتناب ناپذیر است. درعین حال، شناسایی مناطق دارای شدت تخریب متوسط به منظور توجه و پیشگیری از ادامه این روند ضروریست. همچنین، پیشنهاد می شود تا

References

– Abd-Elhamid, H.F., Abd-Elkader, B.S., Wahed, O., Zelenáková, M., and Abd-Elaty, I., 2022. Assessment of changing the abstraction and recharge rates on the land subsidence in the Nile delta, Egypt. *Water*, 14(7): 1096.
– Afzali, S.F., Khanamani, A., Maskooni, E.K., and Berndtsson, R., 2021. Quantitative assessment of environmental sensitivity to desertification using the modified MEDALUS model in a semiarid area. *Sustainability*, 13(14): 7817.

– Azizi, M., Khanmohamadi, M. and Panahandeh, M. 2019. Investigation of Structural Consequences of Shafarud Dam Construction in Shafarud watershed Based on Landscape Ecology Approach. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 17(1): 1-13. <https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2019.125968.1380>
– Bramanto, B., Gumilar, I., Sidiq, T.P., Rahmawan, Y.A., and Abidin, H.Z., 2023. Geodetic evidence of land subsidence in Cirebon, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30: 100933.
– Brown, S., and Nicholls, R. J., 2015. Subsidence and

- human influences in mega deltas: the case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna. *Science of the Total Environment*, 527: 362-374.
- Chai, L., Wei, L., Cai, P., Liu, J., Kang, J., and Zhang, Z., 2024. Risk assessment of land subsidence based on GIS in the Yongqiao area, Suzhou City, China. *Scientific Reports*, 14(1): 11377.
- Cheraghi, H., Hinderer, J., Ebrahimi, S., Mousavi, Z., Saadat, S.A., Arabi, S., and Sedighi, M., 2024. Gravity Change and Its Relation to Land Subsidence and Underground Water Table Variation at Kerman, Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 181(12): 3443-3461.
- Dhaouadi, L., Besser, H., Karbout, N., Wassar, F., and Alomrane, A.R., 2021. Assessment of natural resources in tunisian Oases: degradation of irrigation water quality and continued overexploitation of groundwater. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(1): 36.
- Delghandi, M., Joorablou, S., and Ganji Nowroozi, Z., 2023. The Impact of Climate Change on Severity, Duration and Magnitude of Drought using SPI and RDI in Semnan Region, *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1): 1-18. doi: 10.22077/jdcr.2023.5909.1004 (In Persian).
- Fang, J., Nicholls, R.J., Brown, S., Lincke, D., Hinkel, J., Vafeidis, A.T., Du, S., Zhao, Q., Liu, M., and Shi, P., 2022. Benefits of subsidence control for coastal flooding in China. *Nature Communications*, 13(1): 6946.
- Fernández-Torres, E.A., Cabral-Cano, E., Salazar-Tlaczani, L., and Solano-Rojas, D., 2025. Economic risk of differential subsidence in Mexico City (2014–2022). *Natural Hazards*, 121(3): 2507-2534.
- Ministry of Agricultural Jihad, 2022. Final Report on cultivated area and agricultural products in Semnan Province (In Persian).
- Garivani, G., 2009. An investigation on desertification of north Khorasan. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 16(2): 174-189 (In Persian).
- Ghasemi Arian, Y., Eskandari Dam aneh, H., Naeimi, M., Jalili, A., Zandifar, S., Gohardoust, A., and Lotfinasabasl, S., 2024. Explanation of desertification and land degradation from the Perspective of water and subsidence in the Qareqom Basin. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 32(1): 1-17. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2025.133421>
- Golshiriasfahani, Z., and Sarai, M., 2013. An Investigating of HumanActivities Affecting the Desertification in Arid Rural Areas: A Case Study of Mortazeye Desert, Yazd Province. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 1(1): 35-52 (In Persian).
- Haghshenas Haghighi, M., and Motagh, M., 2024. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10(19): 30-39.
- Hadian, F., Bashari, H., Jafari, R. and Adnani, S. M. 2013. Monitoring land use and cover changes in Qom province over 33 years using maximum likelihood and fuzzy methods. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 11(1), 46-59. <https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2013.106399>
- Han, J., Wang, J., Chen, L., Xiang, J., Ling, Z., Li, Q., and Wang, E., 2021. Driving factors of desertification in Qaidam Basin, China: An 18 -year analysis using the geographic detector model. *Ecological Indicators*, 124: 107404.
- Lan, T., Luo, X., Ma, Q., Jiang, W., and Xia, H., 2023. Desertification Caused by Embankment Construction in Permafrost Environment on the Qinghai -Tibetan Plateau. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(1): 583 -599. <https://doi.org/10.1007/s13369 -022 -06988-y>
- Khosravi, H., Zehtabian, Gh.R., Ahmadi, H., Azarnivand, H., and Ghaiebi, H.Gh., 2014. Hazard Assessment of Desertification as a Result of Soil and Water Recourse Degradation in Kashan Region, Iran. *Desert*, 19(1): 44-55 (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jdesert.2014.51053>
- Kok, S., and Costa, A.L., 2021. Framework for economic cost assessment of land subsidence. *Natural Hazards*, 106(3):1931-1949.
- Lees, M., and Knight, R., 2024. Quantification of record-breaking subsidence in California’s San Joaquin Valley. *Communications Earth & Environment*, 5(1): 677.
- Ma, K., Zhang, Y., Ruan, M., Guo, J., and Chai, T., 2019. Land subsidence in a coal mining area reduced soil fertility and led to soil degradation in arid and semi-arid regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(20): 29-39.
- Maghami Moghim, G., Rohani, M., and Amiri, A., 2024. Exploring the Role of Salt Karsts in the Geomorphology of the Northern Part of Meyami County in Semnan Province. *Journal of Geography and Regional Development*, 22(3): 331-359 (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jgrd.2024.83940.1316>
- Mesbah Zadeh, T., and Soleimani Sardoo, F., 2019. Forecasting of desertification of Kerman plain, based on the climate criterion in 1409 using IMDPA model. *Extension and Development of Watershed Management*, 6(23): 50-57 (In Persian).
- Meza Mori, G., Torres Guzmán, C., Oliva-Cruz, M., Salas López, R., Marlo, G., and 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): 14866.
- Motagh, M., Walter, T.R., Sharifi, M.A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., and Zschau, J., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35, L16403. <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>

- Naeimi, M., Jalili, A., Shahbazi, R., Zandifar, S., Lotfinasabasl, S., and Gohardoust, A., 2025. Numerical Assessment of Land Degradation Considering the Land Subsidence Rate in 11 Watersheds of Iran. *Town and Country Planning*, 16(2): 363-382 (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jtcp.2025.386471.670485>
- Qasim, S., Khan, A.N., Shrestha, R.P., Ahmad, I., and Qasim, M., 2016. The analysis of farmers, perceptions of land management technologies to combat land degradation and desertification in balochistan, Pakistan. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 5(1): 20-25.
- Rafi Sharifabad, J., and Alipour, A., 2023. Formulation and evaluation of desertification control strategies using SWOT model (case study: Yazd province). *Amad and Defense Technology Quarterly*, 5(2): 47-70 (In Persian).
- Sajad, M.M., Wang, J., Afzal, Z., Hussain, S., Siddique, A., Khan, R., Ali, M., and Iqbal, J., 2023. Assessing the impacts of groundwater depletion and aquifer degradation on land subsidence in Lahore, Pakistan: A PS-InSAR approach for sustainable urban development. *Remote Sensing*, 15(22): 18-54.
- Saleh, I., Khazaei, M., and 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 Persian). <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11906.1187>
- Soleimanpour, SM., Naeimi M., Rahmati O., and Moatamednia M., 2024. Investigate Desertification using Underground Water and Subsidence Criteria by IMDPA Model (Case Study: Rafsanjan Watershed). *Environmental Erosion Research Journal*, 14(2):126-140 (In Persian).
- Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E., 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25:189-207.
- Sun, H., Grandstaff, D., and Shagam, R., 1999. Land subsidence due to groundwater withdrawal: potential damage of subsidence and sea level rise in southern New Jersey, USA. *Environmental Geology*, 37(4): 290-296.
- Tavakoli, A., Hokmabadi, H., Naderi Arefi, A., and Hajji, A., 2021. Assessment of Comparative Advantage of Agricultural Crops in Semnan Province Based on Water Productivity. *Journal of Water and Soil Science*, 25 (4): 63-81 (In Persian).
- Yousefi Mobarhan, E., and Khaleghi, A., 2024. Analyzing the Trend of Changes in the Dust Storm Index (DSI) and Its Relationship with the Meteorological Drought in the Arid Climate (Case Study: Semnan Province). *Advanced Environmental Sciences*, 22(2): 289-304 (In Persian). <https://doi.org/10.48308/envs.2024.1369>
- Zalibekov, Z.G., Mamaev, S.A., Biarslanov, A.B., Magomedov, R.A., Asgerova, D.B., and Galimova, U.M., 2019. The use of fresh groundwater from arid regions of the world in the fight against land desertification. *Arid ecosystems*, 9(2): 77-84.
- Zandifar, S., Jalili, A., saeedifar, Z. and Naeimi, M. 2022. Assessing drought and human Interface on reducing groundwater reserves. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 20(1): 199-218. <https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2022.356091.1513>