



دیدگاه

فرونشست زمین، شاخص تخریب ساختاری سرزمین در ایران خشک

دیدگاهی مبتنی بر نتایج یک ارزیابی ملی در ۱۱ حوضه آبریز داخلی

مریم نعیمی*^۱ و عادل جلیلی^۲

چرا اکنون باید درباره فرونشست به مثابه شاخص تخریب سرزمین حرف زد؟

۱۳۹۵ استوار است که داده‌های حاصل از پایش تغییر شکل زمین از طریق تداخل‌سنجی راداری (از جمله تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1) را با نقشه‌ها و گزارش‌های مرجع سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تجمیع نموده است. گستره این ارزیابی، ۱۱ حوضه آبریز داخلی کشور را شامل کویر مرکزی، گاوخونی، کویر درانجیر، کویر لوت، کویر سیاه‌کوه، دریاچه نمک، هامون جازموریان، طشتک-بختگان-مه‌ارلو، سفیدرود، قره‌قوم و سیرجان-ابرقو در قالب ۱۶۲ محدوده مطالعاتی تحت پوشش قرار داده است. ذکر این نکته لازم است، در این دیدگاه، تمرکز بر تفسیر نتایج و پیامدهای اکولوژیک بوده و شرح جزئیات فنی پردازش در مقالات علمی دیگر (نعیمی و همکاران، ۱۴۰۳) مطرح شده است.

یافته‌های ملی: گستره، تمرکز و شدت

الف) گستره درگیر: «کم‌مساحت» اما معنادار

تحلیل مکانی داده‌های تغییر شکل زمین نشان‌دهنده ابعاد نگران‌کننده اما کانون‌محور این بحران در پهنه‌های داخلی ایران است: براساس ارزیابی‌های انجام‌شده، حدود ۱۱ هزار کیلومتر مربع از اراضی محدوده‌های مطالعاتی (معادل ۱/۲ درصد از کل مساحت مناطق بررسی‌شده) به‌طور مستقیم با پدیده فرونشست فعال درگیر هستند. اگرچه سهم درصدی این پهنه در مقیاس ملی کوچک به نظر می‌رسد، اما از منظر اقتصاد سیاسی و اکولوژی، این اراضی منطبق بر استراتژیک‌ترین دشت‌های آبرفتی، قطب‌های تولید کشاورزی، کریدورهای ترانزیتی و مترکم‌ترین مراکز سکونتگاهی کشور هستند. از این رو، وزن بوم‌شناختی و ریسک فرونشست در این اراضی بسیار فراتر از سهم هندسی آن‌ها در نقشه است.

ب) تمرکز بحران: ۷۸ درصد در چهار حوضه آبریز

حدود ۷۸ درصد مساحت فرونشست در چهار حوضه آبریز اصلی متمرکز است:

● دریاچه نمک (۳۲ درصد)

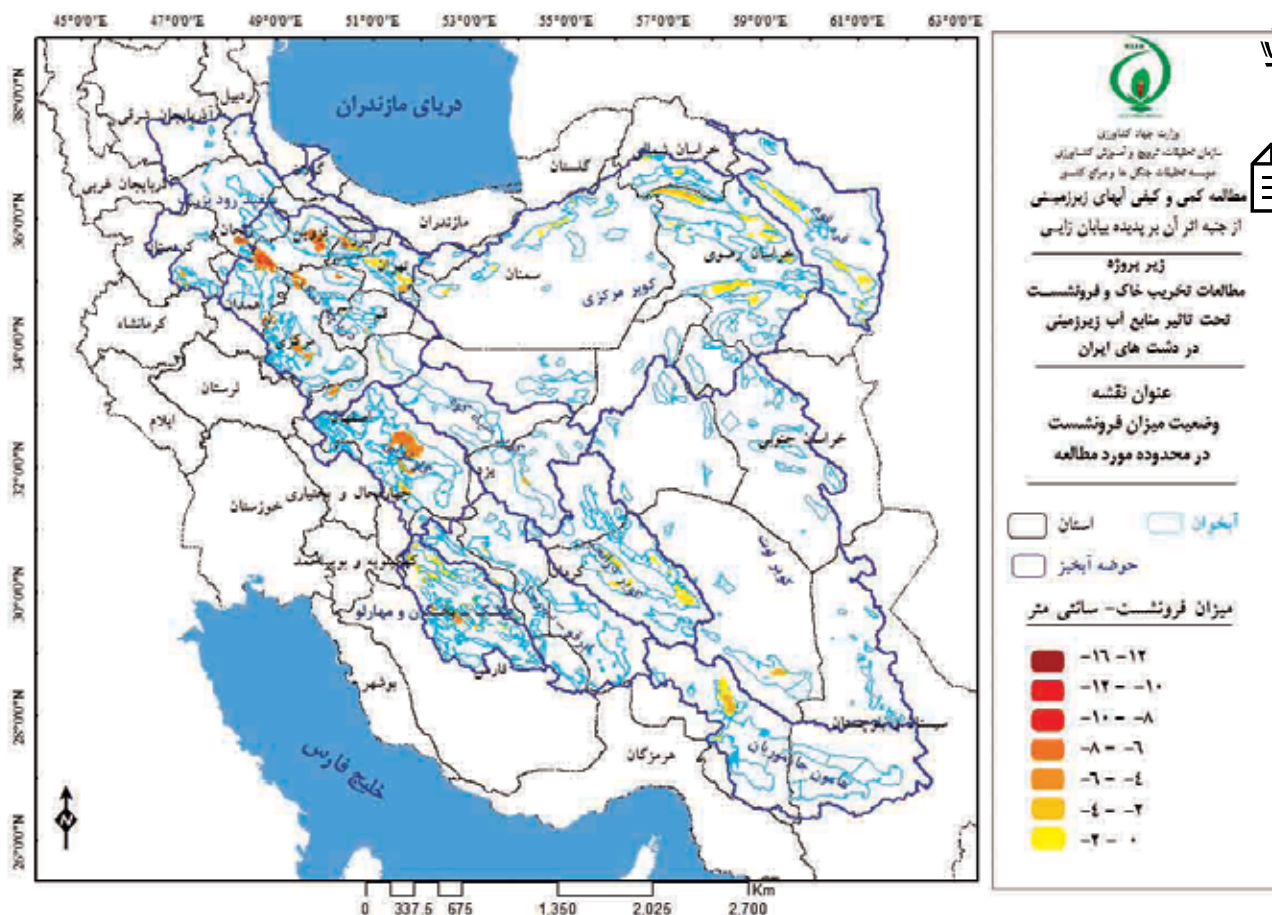
ایران در کمربند خشک جهان واقع شده و توسعه کشاورزی، شهری و صنعتی آن طی نیم‌قرن گذشته وابستگی شدیدی به تخلیه منابع آب زیرزمینی داشته است. در این چهارچوب مدیریتی، همواره «افت تراز آب زیرزمینی» به‌عنوان اصلی‌ترین شاخص هشداردهنده بحران تلقی می‌شد. با این حال، شواهد علمی نوین آشکار می‌سازند که افت تراز آب، به تنهایی قادر به توصیف فاز نهایی و برگشت‌ناپذیر تخریب فیزیکی سرزمین نیست. در بسیاری از آبخوان‌های فرونشسته، سامانه هیدروژئولوژیکی وارد مرحله‌ای می‌شود که در آن، تغییر شکل‌های مکانیکی لایه‌ها به پدیده‌ای خودمحور و مستقل از نوسانات کوتاه‌مدت آب تبدیل می‌شود (Pedretti et al., 2024)، فازی که با کاهش دائمی ظرفیت ذخیره هیدرولیکی، نابودی تخلخل مفید و فروپاشی ساختاری زمین همبسته است (Bagheri-Gavkosh, Poland, 1984; et al., 2021).

فرونشست زمین در این دیدگاه، فراتر از یک مخاطره ژئوتکنیکی موضعی، به‌عنوان یک شاخص تلفیقی و فرابخشی از تخریب ساختاری سرزمین تعریف می‌شود. این پدیده هم‌زمان بازتاب‌دهنده فشار انباشته بشری، زوال پایداری ژئومکانیکی دشت‌ها و پیشران زنجیره‌ای از پیامدهای ناگوار محیط‌زیستی در مقیاس حوزه‌ای است. هدف این دیدگاه، تبیین ضرورت بازنگری در ارزیابی‌های ملی تخریب سرزمین از طریق اثبات نقش کلیدی معیار فرونشست زمین در ارتقای دقت مدل‌های بیابان‌زایی (همچون IMDPA) (شاهینی و همکاران، ۱۴۰۰) و ارائه شواهدی است که نشان می‌دهند، چگونه غفلت از این پارادایم ژئومکانیکی به کم‌برآوردی بحران در دشت‌های بحرانی کشور می‌انجامد.

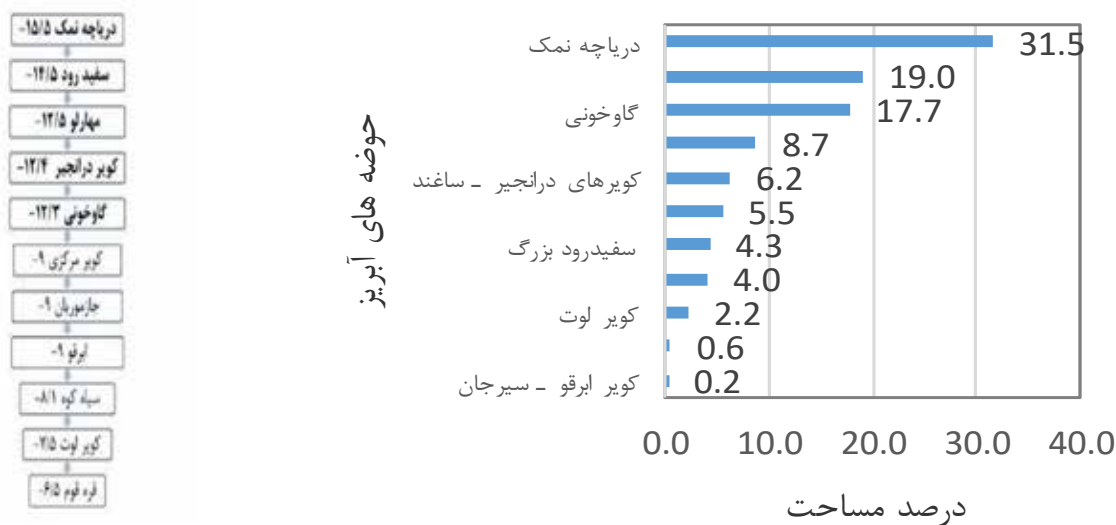
پشتوانه شواهد: خلاصه‌ای از یک تصویر ملی در ۱۱ حوضه آبریز داخلی

این دیدگاه بر نتایج یک فراتحلیل ملی و سیستماتیک در سال

* 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



شکل ۱- پهنه بندی نرخ فرونشست سال ۱۳۹۵ با تصاویر گرفته شده از سازمان زمین شناسی کشور به تفکیک محدوده های مطالعاتی (نعیمی، ۱۴۰۲)

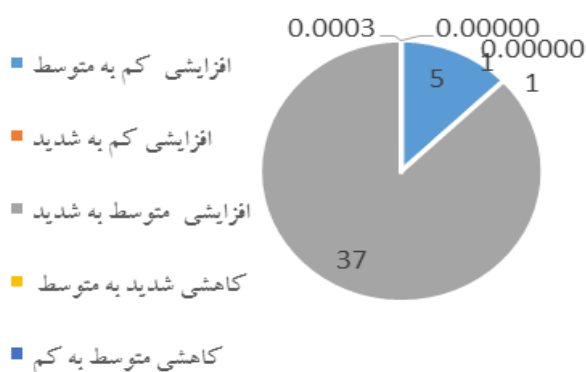
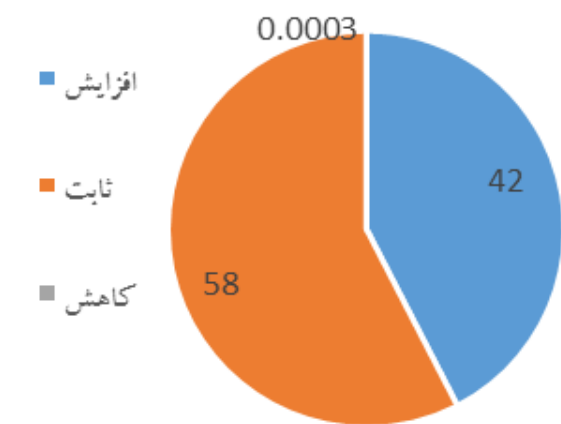


شکل ۲- درصد مساحت کلاس های فرونشست در کل محدوده مطالعاتی به تفکیک حوضه های آبریز (نعیمی، ۱۴۰۲)

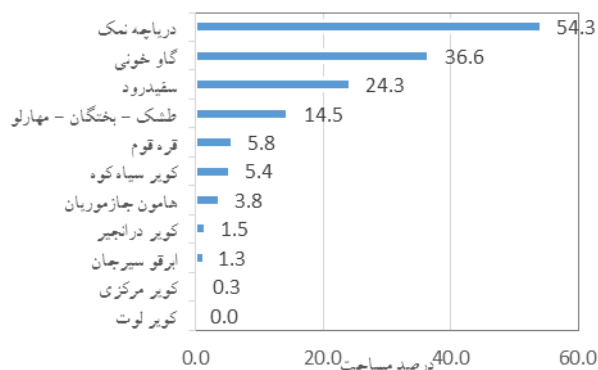
۱. نشان می دهد فرونشست در ایران یک بحران «کانون محور» است، نه پراکنده؛
۲. امکان می دهد برنامه های کاهش ریسک و احیا «هدفمند» شوند، زیرا بخش بزرگی از مشکل در چند پهنه قابل شناسایی و پایش مستمر است.

- کویر مرکزی (۱۹ درصد)
 - گاو خونی (۱۸ درصد)
 - هامون جازموریان (۹ درصد)
- این تمرکز از دو منظر اهمیت دارد:

شاخص یکنواخت نیست. با حذف کلاس‌های ثابت و کاهشی، حوضه آبریز دریاچه نمک، گاوخونی، سفیدرود و مهارلو، به ترتیب معادل ۵۴، ۳۷، ۲۴ و ۱۵ درصد افزایش مساحت تخریب داشته‌اند. در مقابل، حوضه آبریز کویر لوت هیچ تغییری را ثبت نکرده است و حوضه‌های آبریز کویر مرکزی، جازموریان و ابرقو- سیرجان



شکل ۳- وضعیت کلاس‌های بیابان‌زایی در کل محدوده‌های مطالعاتی، پیش و پس از ورود معیار فرونشست



شکل ۴- درصد مساحت تغییرات افزایشی کلاس شدت بیابان‌زایی با ورود معیار نرخ فرونشست در هر یک از حوضه‌های آبریز (بدون در نظر گرفتن مساحت‌های ثابت و کاهشی)

ج) شدت فرونشست: ورود به فازهای پرخطر
ثبت نرخ‌های بیشینه فرونشست تا حدود ۱۵ تا ۱۶ سانتی‌متر در سال در برخی دشت‌ها (شکل ۲)، نشان‌دهنده تخلیه سریع آب به همراه فروریزش فضا‌های خالی میان‌دانه‌ای در لایه‌های رسی است. این شدت از تغییر شکل فیزیکی، طبق تئوری‌های تحکیم خاک، آغازگر روند زوال برگشت‌ناپذیر آبخوان و ازدست‌رفتن همیشگی ظرفیت ذخیره استاتیک آن است (Pedretti et al., 2024).

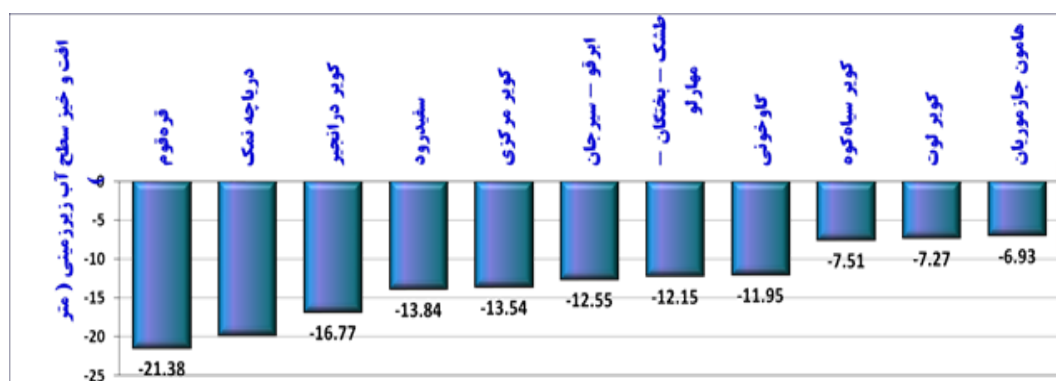
د) کانون‌های شاخص: پیوند با سکونتگاه و تولید
نقشه‌برداری فرونشست نشان می‌دهد، کانون‌های پرمخاطره کشور در دشت‌های مهمی نظیر قزوین، جیرفت، تهران-کرج، مشهد، نیشابور و کوهپایه سگزی اصفهان واقع شده‌اند. انطباق این زون‌های بحرانی با کانون‌های جمعیتی و زیرساختی، ابعاد بحران را از یک چالش صرفاً زیست‌محیطی به یک ریسک چندسیستمی (زیرساختی-اجتماعی-امنیتی) ارتقا می‌دهد.

شواهد کمی از مدل‌های ارزیابی تخریب سرزمین: تقابل IMDPA و IMDPAS

ارزش ساختاری فرونشست زمین در ارزیابی پایداری زیست‌محیطی هنگامی آشکار می‌شود که رفتار مدل‌های تخریب سرزمین را با و بدون حضور این شاخص موردکاوی قرار دهیم. در این بخش، نتایج حاصل از مدل پایه ارزیابی بیابان‌زایی (IMDPA) در قالب سناریوهای مختلف با مدل توسعه‌یافته هیدروژئومکانیک (IMD-PAS) مقایسه شده است.

الف) اثر ورود معیار نرخ فرونشست در مدل بومی IMDPA
مقایسه نتایج سناریوی پایه (بدون فرونشست) و سناریوی دوم (با ورود معیار فرونشست به‌عنوان زیرشاخص منابع آب) در ۱۶۲ محدوده مطالعاتی نتایج تکان‌دهنده‌ای را نشان می‌دهد:
● تغییر کلاس تخریب سرزمین: ۵۸ درصد مساحت مناطق درگیر ثابت مانده، اما ۳۶ درصد با افزایش کلاس تخریب (بدتر شدن وضعیت) مواجه شده‌اند (شکل ۳). تنها ۶ درصد، کاهش کلاس داشته‌اند که بیشتر به دلیل پویایی هیدروژئولوژیکی محلی بوده است.
● جهش به سمت کلاس‌های بحرانی: تحلیل جزئی‌تر نشان می‌دهد، با ورود فرونشست، ۱۹ درصد از مناطق از کلاس «کم» به «متوسط» و ۱۷ درصد از کلاس «متوسط» به «شدید» منتقل شده‌اند (شکل ۴).
● جهش ۶ برابری کلاس شدید: شاخص‌ترین یافته این است که گستره کلاس «شدید» بیابان‌زایی در مناطق دارای فرونشست پس از ورود این معیار، افزایش ۶ برابری پیدا کرده است. این امر ثابت می‌کند، ارزیابی‌های فاقد شاخص فرونشست، تا چه حد پتانسیل واقعی تخریب سرزمین را در دشت‌های بحرانی پنهان می‌سازند.

ب) رفتار متمایز حوضه‌های آبریز در سناریوی ورود فرونشست
باتوجه به شکل ۴، توزیع مکانی واکنش حوضه‌های آبریز به این



شکل ۵- تغییرات تجمعی سطح آب زیرزمینی به تفکیک حوضه‌های آبریز منطقه مورد مطالعه برای سال آبی ۱۳۸۰-۹۹ (زندی فر، ۱۴۰۲)

در حوضه‌های آبریز گاوخونی و هامون جازموریان، فرونشست زمین بازتاب‌دهنده زوال آبخوان‌های پشتیبان در دشت‌های پایاب است. تراکم لایه‌های آبرفتی مانع از نفوذ آبخوان و جریان‌های زیرسطحی تغذیه‌کننده تالاب‌ها در فصول خشک می‌شود. این امر پایداری رطوبتی گاوخونی و جازموریان را به شدت کاهش می‌دهد و تالاب‌ها را به رخدادهای سیلابی کوتاه‌مدت و ناپایدار وابسته می‌سازد، فرایندی که به مرگ بیولوژیک پایاب‌ها سرعت می‌بخشد.

ب) تخریب فیزیکی و افت خدمات بوم‌شناختی سرزمین‌های مولد در دشت‌های قزوین و جیرفت که از قطب‌های امنیت غذایی کشور به‌شمار می‌روند، فرونشست با ایجاد شکاف‌های طولی، دگرگونی در ریزتوبوگرافی اراضی و اختلال در شبکه‌های زهکشی طبیعی همراه است. این گسیختگی فیزیکی خاک، کارکرد هیدرولیکی آن را مختل می‌کند، هدررفت رطوبت سطحی را افزایش می‌دهد و در نهایت با کاهش حاصلخیزی خاک، اراضی مولد را به سمت رهاشدگی سوق می‌دهد، پدیده‌ای که محرک بیابان‌زایی ثانویه است.

ج) فعال‌سازی کانون‌های داخلی گردوغبار در پهنه‌های مرکزی تمرکز چشمگیر فرونشست در حوضه آبریز دریاچه نمک (۳۲ درصد) و کویر مرکزی (۱۹ درصد) از منظر منشأیابی ریزگردها بسیار مهم است. اگرچه فرونشست به‌طور مستقیم بادرگمی ایجاد نمی‌کند، اما از طریق کاهش تاب‌آوری پوشش گیاهی مقاوم (به دلیل افت شدید عمق دسترسی ریشه به آبخوان)، رهاشدگی اراضی کشاورزی کم‌بازده و افزایش شکنندگی فیزیکی سطح خاک، بستر مناسبی را برای فرسایش بادی شدید فراهم می‌سازد. این هم‌پوشانی مخاطرات، تبیین‌کننده پتانسیل بالای استان‌های قم، سمنان، اصفهان، کرمان و سیستان و بلوچستان در فعال‌سازی کانون‌های داخلی گردوغبار تحت تأثیر زوال هیدروژئومکانیکی دشت‌هاست.

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای سیاستی

یافته‌های برخاسته از اجرای مدل‌های بوم‌شناختی IMDPA و نسخه

تغییرات افزایشی زیر ۵ درصد داشته‌اند. این تنوع نشان می‌دهد، دشت‌هایی که هم‌زمان با تخلیه آبخوان و لایه‌های ریزدانه ضخیم مواجه‌اند (مانند دریاچه نمک و گاوخونی)، بیشترین حساسیت را به این سناریو نشان می‌دهند.

ج) جهش ارزیابی با مدل توسعه‌یافته هیدروژئومکانیک (IMD-PAS)

در مدل توسعه‌یافته IMDPAS، معیار فرونشست نه به‌عنوان یک زیرشاخص فرعی، بلکه به‌عنوان یک معیار مستقل و هم‌وزن با منابع آب (شکل ۵) وارد فرایند ارزیابی شد تا وزن ژئومکانیکی دشت‌ها به‌طور واقعی اعمال شود. نتایج مقایسه مدل توسعه‌یافته با مدل پایه نشان می‌دهد:

- استفاده از مدل توسعه‌یافته IMDPAS منجر به افزایش ۴۲ درصدی در کلاس‌های بالاتر شدت تخریب سرزمین در مناطق فرونشست شده است، درحالی‌که سهم مناطق کاهش‌ی نزدیک به صفر (کمتر از یک صدم درصد) بوده است.
- بیشترین سهم تغییر کلاس در این مدل بومی مربوط به انتقال از کلاس متوسط به شدید (معادل ۳۷ درصد مساحت مناطق) است.
- از نظر مکانی، حوضه‌های آبریز دریاچه نمک (۳۴ درصد)، گاوخونی (۲۹ درصد) و کویر مرکزی (۱۳ درصد) بیشترین افزایش شدت تخریب را در مدل IMDPAS تجربه کرده‌اند.
- در سطح تفکیکی محدوده‌های مطالعاتی، حادثه‌ترین تغییرات افزایشی شامل انتقال از کلاس کم به متوسط در دشت تهران-کرج، انتقال از متوسط به شدید در دشت سگزی اصفهان و انتقال بسیار خطرناک از کلاس کم به شدید در دشت مشهد رخ داده است.

پیامدهای بوم‌شناختی و محیط‌زیستی در پرتوی ارزیابی‌های کمی نوین

یافته‌های حاصل از مقایسه مدل‌ها اثبات می‌کند، فرونشست زمین پیشران پنهان بیابان‌زایی و زوال اکولوژیک است. پیوند فرونشست با سایر پیامدهای محیط‌زیستی را می‌توان در سه محور تبیین نمود:

الف) فروپاشی رژیم رطوبتی تالاب‌ها و پایاب‌ها

- Pedretti, L., Giarola, A., Korff, M., Lambert, J. and Meisina, C., 2024. Comprehensive database of land subsidence in 143 major coastal cities around the world: overview of issues, causes, and future challenges. *Frontiers in Earth Science*, 12, p.1351581.
- Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S.M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F. and Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 778, p.146193
- Poland, J.F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

ارتقایافته ژئومکانیکی آن (IMDPAS) در سطح ۱۱ حوزه آبریز داخلی کشور نشان داد:

● فرونشست زمین گستره‌ای معادل ۱۱ هزار کیلومترمربع از حیاتی‌ترین پهنه‌های سکونتگاهی و کشاورزی ایران را در بر گرفته است.

● این مخاطره کاملاً کانون‌محور بوده و ۷۸ درصد آن در چهار حوزه آبریز اصلی (به‌ویژه دریاچه نمک و گاوخونی) متمرکز است.

● استفاده‌نکردن از معیار فرونشست در برآوردهای ملی تخریب سرزمین، پتانسیل واقعی بیابان‌زایی دشت‌های فرونشسته را با کم‌برآوردی فاحش مواجه می‌کند، به‌طوری‌که اعمال وزن مستقل فرونشست در مدل IMDPAS، وسعت کلاس شدید تخریب را تا ۶ برابر افزایش می‌دهد.

براین‌اساس، موارد زیر به‌عنوان توصیه‌های سیاستی برای گذار به مدیریت پایداری ساختاری سرزمین پیشنهاد می‌شود:

● اصلاح استانداردهای ملی ارزیابی تخریب سرزمین: شاخص فرونشست زمین مبتنی بر پایش راداری (InSAR)، باید به‌عنوان یکی از معیارهای قانونی و مستقل در گزارش‌های دوره ملی تخریب سرزمین (NAP) و کنوانسیون مقابله با بیابان‌زایی (UNCCD) در ایران گنجانده شود.

● گذار به مدیریت ژئومکانیکی آبخوان: اولویت تخصیص منابع مالی و طرح‌های تعادل‌بخشی آب‌های زیرزمینی باید از رویکرد سنتی «صرف کنترل تراز آب» به رویکرد «پیشگیری از تراکم برگشت‌ناپذیر آبخوان» تغییر یابد و کانون‌های حساس به تحکیم فیزیکی (همچون دریاچه نمک و گاوخونی) در اولویت ردیف‌های بودجه ملی قرار گیرند.

● توسعه شبکه پایش ملی و هشدار زودهنگام: باید یک سامانه یکپارچه پایش ماهواره‌ای مستمر با قدرت تفکیک مکانی بالا به‌منظور ردگیری نرخ‌های نشست دشت‌ها و همبسته‌سازی آن با کاربری‌های اراضی و برنامه‌های آمایش سرزمین کشور ایجاد شود.

منابع

- زندفر، س.، ۱۴۰۲. مطالعات ارزیابی و پهنه‌بندی کمی منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران. مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، ۷۰۰ صفحه.
- نعیمی، م.، ۱۴۰۲. مطالعات تخریب خاک و فرونشست تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران. تهران، انتشارات مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، ۴۰۰ صفحه.
- نعیمی، م.، جلیلی، ع.، شهبازی، ر.، زندفر، س.، لطفی‌نسب اصل، س. و گوهردوست، آ.، ۱۴۰۳. ارزیابی عددی تخریب سرزمین با در نظرگیری معیار نرخ فرونشست زمین در یازده حوزه آبریز داخلی ایران. مجله علمی آمایش سرزمین، ۱۶ (۲): doi: 10.22059/jtcp.2025.386471.670485.382-363
- شاهی‌نی، ز.، فرامرزی، م.، گرابی، و. و علیم‌رادی، ص.، ۱۴۰۰. ارزیابی شدت بیابان‌زایی با تأکید بر معیار آب زیرزمینی با استفاده از مدل IMDPA (مطالعه موردی: دشت مهران، استان ایلام). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۱ (۱)، ۲۸-۱۷. doi: 10.22034/iwm.2021.247940
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۵. گزارش و نقشه ملی پایش فرونشست زمین در حوزه‌های داخلی ایران. معاونت زمین‌شناسی، تهران.