19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

فرونشست زمین در ایران: وسعت، عوامل، مشاهدات و مسیرهای کاهش آن

سیده الهام الیاسی[۱]

۱- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه زنجان * Elhamelyasi.28@gmail.com

چکیده

ایران در حال تجربه فرونشست گسترده زمین است که عمدتاً ناشی از استخراج شدید آب‌های زیرزمینی است و تأثیرات شدیدی بر زیرساخت‌ها، اماکن میراثی، کشاورزی و امنیت آب دارد. بررسی‌های اخیر ماهواره‌ای InSAR نشان می‌دهد که حدود ۳٫۵٪ از کشور (حدود ۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع) بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ فرونشست قابل اندازه‌گیری را نشان می‌دهد، از جمله نرخ‌های محلی بیش از ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال در نقاط حساس مانند کرمان، تهران و بخش‌هایی از اصفهان. این مقاله مشاهدات سنجش از دور در مقیاس ملی، مطالعات میدانی محلی و سوابق آب‌های زیرزمینی را برای (۱) تعیین کمیت الگوها و نرخ‌های فرونشست، (۲) پیوند فرونشست با افت آب‌های زیرزمینی و تراکم سفره آب، (۳) بررسی رویکردهای مدل‌سازی برای شبیه‌سازی فرونشست فعلی و آینده، و (۴) تشریح اقدامات عملی کاهش و سیاست‌گذاری برای پیوند آب-زمین-زیرساخت ایران، ترکیب می‌کند. یافته‌های کلیدی بر ضرورت مدیریت یکپارچه آب‌های زیرزمینی، نظارت هدفمند بر فرونشست و برنامه‌ریزی تطبیقی شهری/زیرساخت تأکید دارند.

واژگان کلیدی: بحران آب، سفره‌های آب زیرزمینی، سنجش از دور، فرونشست زمین

مقدمه

فرونشست زمین به معنای پایین رفتن عمودی سطح زمین ناشی از علل طبیعی و انسانی - به یکی از مهمترین مخاطرات زمین‌شناسی ایران تبدیل شده است. مطالعات ماهواره‌ای با وضوح بالا که اخیراً انجام شده است، فرونشست گسترده و با نرخ بالای زمین را نشان می‌دهد که با استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی برای آبیاری و تأمین آب شهری مرتبط است. این پدیده زیرساخت‌های شهری، کریدورهای حمل و نقل و اماکن میراث فرهنگی را در چندین استان تهدید می‌کند. مطبوعات ملی و بین‌المللی و بیانیه‌های دولتی به طور فزاینده‌ای فرونشست را به عنوان بخشی از بحران گسترده‌تر آب ایران مطرح می‌کنند و نیاز به علم و سیاست عملی را تقویت می‌کنند(Sajadi، ۲۰۲۲).

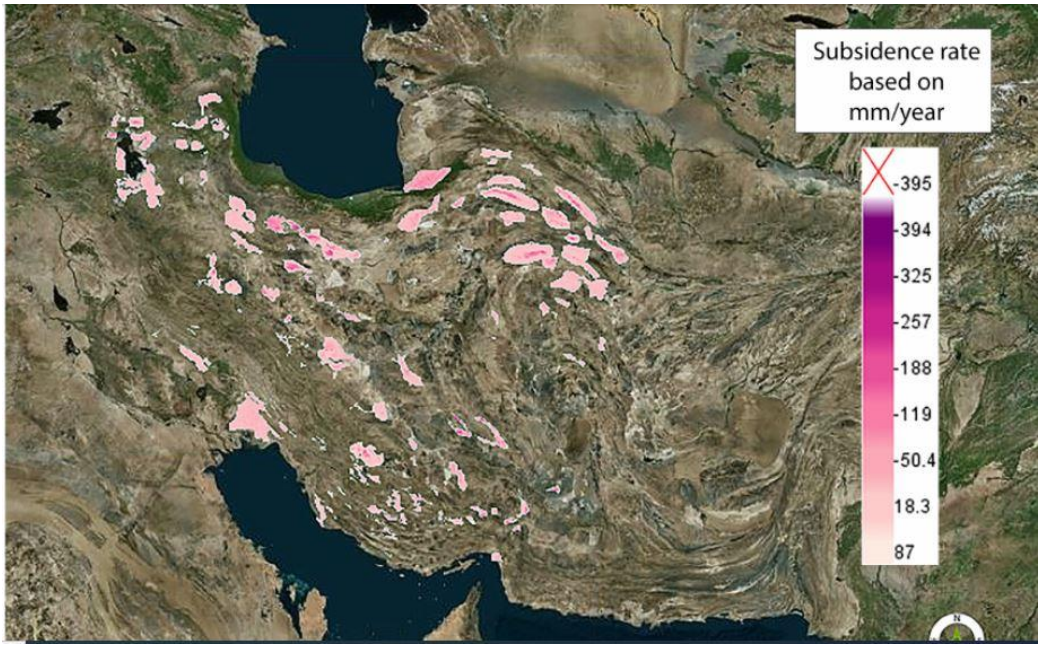
طبق گزارشات پناهی و همکاران (۲۰۲۲)، ایران با بحران شدید فرونشست زمین روبرو است و گزارش‌ها حاکی از آن است که تقریباً ۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع از کشور در معرض خطر است. این منطقه شامل ۸ فرودگاه، ۵۴ ایستگاه راه‌آهن، ۲۵ ایستگاه مترو و محل سکونت حدود ۱۴ میلیون نفر است. دشت تهران به عنوان یکی از بحرانی‌ترین نقاط بحرانی شناخته می‌شود. کمربندهای فرونشست در غرب و جنوب تهران امتداد دارند، جایی که پمپاژ برای تأمین آب شهری و تقاضای کشاورزی همزمان است. نرخ‌های بیش از ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر در سال ثبت شده است که خطراتی را برای کریدورهای حمل و نقل، زیرساخت‌های شهری و مناطق مسکونی ایجاد می‌کند. (شکل شماره ۱).

شکل شماره ۱: فرونشست در اطراف استان تهران

تحلیل نقشه توزیع فرونشست در ایران الگوی مکانی قابل توجهی را نشان می‌دهد که با مناطقی که استخراج شدید آب‌های زیرزمینی در آنها صورت می‌گیرد، همخوانی نزدیکی دارد. فرونشست یکنواخت نیست، بلکه در دشت‌های رسوبی خاصی متمرکز است که در آنها سفره‌های آب زیرزمینی برای دهه‌ها بیش از حد مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. به طور مثال در دشت اصفهان-برخوار، الگوهای فرونشست هم گسترش شهری و هم فشارهای کشاورزی را منعکس می‌کنند. سری‌های زمانی InSAR نشان دهنده کاهش تدریجی سطح زمین از سال ۲۰۱۵ است، و نقشه توزیع، تغییر شکل گسترده در دشت‌های حاصلخیز را برجسته می‌کند. ترک‌ها، شکاف‌ها و فروچاله‌های گاه به گاه گزارش شده در منطقه، پیامدهای اجتماعی مستقیم الگوهای نقشه‌برداری شده را نشان می‌دهند(Ashraf و همکاران، ۲۰۲۱).

مثال واضح تر از فرونشست در ایران، استان کرمان که میزبان شدیدترین سیگنال‌های فرونشست در سراسر کشور است، با نرخ‌های محلی بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال. نقشه توزیع، مناطق کشاورزی وسیعی را نشان می‌دهد که در آن‌ها آبیاری طولانی‌مدت باعث تخلیه شدید سفره‌های آب زیرزمینی شده است. این منطقه نمونه‌ای از ماهیت برگشت‌ناپذیر تراکم است، زیرا رسوبات ظرفیت ذخیره آب خود را از دست می‌دهند .

تحقیقات Khairy و Sarfi (۲۰۲۴) مساحت تقریبی فرونشست در استان خراسان رضوی را حدود ۲۰هزار کیلومتر مربع برآورد می‌کند، یعنی زمینی به طول ۲۰۰ کیلومتر و عرض ۱۰۰ کیلومتر. که اولین آثار فرونشست در این منطقه حدود ۶۰سال پیش در رفسنجان کرمان گزارش شده و براساس تحقیقات این پدیده به وضوح با کاهش آبخوان‌ها مرتبط است. بررسی نمودار کاهش حجم مخازن آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که این کاهش از اواسط دهه ۵۰ شمسی آغاز و در سال‌های ۷۲ و ۷۳، روند کاهش به طرز قابل توجهی تشدید شده و به تبع آن، فرونشست زمین نیز گسترش یافته است (شکل شماره ۲).



شکل شماره ۲: وضعیت فرونشست در سراسر کشور

مطالعات متعددی در طول دو دهه گذشته فرونشست در ایران را بررسی کرده‌اند که معمولاً بر روی دشت‌های منفرد یا مناطق شهری با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی InSAR، بررسی‌های ترازیابی یا سوابق سطح آب‌های زیرزمینی متمرکز بوده‌اند. به عنوان مثال، تحقیقات در دشت تهران همبستگی قوی بین افت آب‌های زیرزمینی و پایین آمدن سطح زمین را نشان داده است Haghshenas Haghighi و همکاران، (۲۰۱۸)، در حالی که مطالعات در دشت اصفهان-برخوار، کمربندهای فرونشست را به پمپاژ آبیاری و گسترش شهری مرتبط دانست (Beni، ۲۰۲۴). از آن زمان، ارزیابی‌های ملی بر اساس تصاویر Sentinel-۱، فرونشست را در سراسر کشور نقشه‌برداری کرده و چندین منطقه پرخطر را برجسته کرده‌اند (Haghshenas Haghighi و همکاران، ۲۰۲۱؛ Haghighi و همکاران، ۲۰۲۴).

بنی در ۲۰۲۴، از داده‌های Sentinel-۱ (۲۰۲۲-۲۰۱۵) برای تعیین کمیت نرخ فرونشست در دشت اصفهان-برخوار، یک قطب اصلی کشاورزی و شهری، استفاده شد. این مطالعه همبستگی قوی بین پمپاژ آب‌های زیرزمینی، تنظیم رودخانه و تغییر شکل زمین را نشان داد و پیامدهای اجتماعی-اقتصادی محلی را برجسته کرد(Beni، ۲۰۲۴).

واتسون و همکاران یک میدان سرعت یکپارچه InSAR-GNSS برای ایران تولید کرد که امکان اعتبارسنجی متقابل اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای و کمی‌سازی حرکات عمودی و افقی پوسته زمین را فراهم می‌کند. کار آنها قابلیت اطمینان نقشه‌برداری فرونشست در مقیاس‌های منطقه‌ای را تقویت می‌کند Watsonو همکاران، (۲۰۲۴). مدل‌های هیدرومکانیکی کوپل شده‌ای برای شبیه‌سازی فرونشست فعلی و آینده تحت سناریوهای مختلف استخراج آب‌های زیرزمینی توسعه داده شد. یافته‌ها بر اهمیت پارامترهای تراکم‌پذیری آبخوان و سیاست استفاده از آب در پیش‌بینی تغییرات سطح زمین در آینده تأکید دارند(Bockstiegel و همکاران، ۲۰۲۴).

تحقیق حاضر بر اساس این مطالعات قبلی انجام شده است، اما با ترکیب مشاهدات ماهواره‌ای در مقیاس ملی با داده‌های میدانی و برجسته کردن پیامدهای آن برای حکومتداری و سازگاری، خود را متمایز می‌کند. این کار به جای تولید یک مطالعه موردی دیگر، بر ماهیت سیستمی فرونشست در سراسر ایران، برگشت‌ناپذیری تراکم آبخوان و نیاز به اصلاح فوری سیاست‌ها تأکید می‌کند. ضرورت آن در پر کردن شکاف بین پایش فنی و تصمیم‌گیری است، در نتیجه از نقشه‌برداری توصیفی به سمت کاهش ریسک عملی حرکت می‌کند. هدف اصلی این تحقیق، تعیین کمیت میزان و عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در ایران، ارزیابی انتقادی تأثیرات آن و ارائه راهبردهای نظارتی و مدیریتی است که به پیوند ملی آب-زمین-زیرساخت می‌پردازد.
به صورت کاملا جزئی هدف این مقاله: (۱) خلاصه‌سازی میزان و نرخ مکانی فرونشست در ایران با استفاده از InSAR و مطالعات میدانی اخیر؛ (۲) تجزیه و تحلیل محرک‌ها و مکانیسم‌های اولیه، با تمرکز بر تخلیه آب‌های زیرزمینی و تراکم سفره‌های آب زیرزمینی؛ (۳) ارائه بهترین شیوه‌های روش‌شناختی برای پایش و مدل‌سازی؛ و (۴) توصیه مداخلات کاهشی و سیاستی مناسب برای بافت نهادی ایران است.

مواد و روش‌ها

جغرافیای طبیعی ایران - حوضه‌های بزرگ خشک و نیمه‌خشک که توسط رشته‌کوه‌ها محدود شده‌اند - میزبان بسیاری از دشت‌های رسوبی غیریکپارچه (رسوبات آبرفتی و دریاچه‌ای) است که در صورت کاهش فشار منفذی، مستعد تراکم هستند. مراکز اصلی جمعیت و کشاورزی (تهران، اصفهان، کرمان، یزد، اهواز) در بالای سفره‌های آب زیرزمینی پرباری قرار دارند که برای دهه‌ها به شدت پمپاژ شده‌اند. بررسی‌های InSAR در مقیاس ملی (سری زمانی Sentinel-۱) کمربندهای فرونشست متعددی را در سراسر مرکز و جنوب ایران شناسایی می‌کند، به ویژه با سیگنال‌های شدید در استان کرمان و دشت‌های تهران و اصفهان. این مقاله یک رویکرد ترکیبی را اتخاذ می‌کند که تحلیل‌های منتشر شده InSAR، سری‌های زمانی سطح آب‌های زیرزمینی محلی، لگاریتم‌های چاه‌های ژئوتکنیکی و مطالعات مدل‌سازی عددی منتشر شده را با هم ترکیب می‌کند. روش‌های پیشنهادی (و روش‌های مورد استفاده در مطالعات کلیدی مرجع) عبارتند از:

- ایستگاه‌های GPS/GNSS، ترازیابی، اکستنسومترها و اندازه‌گیری‌های سطح آب‌های زیرزمینی برای اعتبارسنجی سیگنال‌های InSAR و محدود کردن اجزای تغییر شکل الاستیک در مقابل غیرالاستیک. انتشارات AGU
- مدل‌سازی هیدرومکانیکی: مدل‌های ترکیبی آب‌های زیرزمینی-فرونشست که تراکم‌پذیری آبخوان، لایه‌بندی رسوب و تراکم برگشت‌ناپذیر را برای شبیه‌سازی سناریو و کالیبراسیون سری‌های زمانی مشتق‌شده از InSAR در نظر می‌گیرند.
- تداخل‌سنجی راداری فضایی (InSAR): تحلیل‌های سری زمانی باند C Sentinel-۱ (به عنوان مثال، SBAS / PSInSAR) با وضوح ۱۰ تا ۱۰۰ متر برای نقشه‌برداری از وسعت مکانی و تکامل زمانی فرونشست. بررسی‌های Sentinel-۱ که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ جمع‌آوری شده‌اند، مبنای ملی را ارائه می‌دهند.
- ادغام چند منبعی: ترکیب InSAR با تصاویر نوری (تغییر کاربری زمین)، سوابق استفاده از آب کشاورزی و پایگاه‌های داده مجوز چاه برای نسبت دادن محرک‌ها و شناسایی نقاط اهرمی مدیریتی.

راه‌های کاهش فرونشست

کاهش فرونشست به مهار استخراج و افزایش بهره‌وری بستگی دارد. مدل‌سازی سناریو پیش‌بینی می‌کند که کاهش ۲۵ درصدی، فرونشست را در ۴۰٪ از مناطق در عرض ۵ سال متوقف می‌کند و با کاهش ۵۰٪، از طریق بازگشت شبیه‌سازی شده توسط MODFLOW (بازیابی ۰٫۵ تا ۲ سانتی‌متر در سال) به ۷۰٪ افزایش می‌یابد. استراتژی‌های کلیدی عبارتند از:

بهینه‌سازی آبیاری: سیستم‌های تحت فشار را از پوشش کمتر از ۵٪ به ۳۰٪ افزایش دهید و تقاضا را ۲۰ تا ۳۰٪ در هکتار کاهش دهید.

برنامه‌ریزی کشت و کاربری زمین: تغییر از گندم پرمصرف (۱۵۰۰ لیتر در کیلوگرم) به جایگزین‌های مقاوم در برابر خشکسالی؛ مناطق پرخطر را با استفاده از نقشه‌های خطر MaxEnt در برابر توسعه منطقه‌بندی کنید.

رویکردهای یکپارچه پیوند: اتخاذ چارچوب‌های WEFLC برای تخصیص متعادل، احیای قنات‌ها (سیستم‌های سنتی که ۲۰٪ از عرضه را به خود اختصاص می‌دهند) و انتقال بین حوضه‌ای به طور عاقلانه.

بهبودهای نظارتی: گسترش شبکه‌های InSAR-GPS برای هشدارهای بلادرنگ، همراه با تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مداخلات اولویت‌بندی شده.

چالش‌ها در حاکمیت و بودجه همچنان ادامه دارد، و تنها ۲۲٪ از سفره‌های آب زیرزمینی حیاتی تحت برنامه‌های فعلی تثبیت شده‌اند. همکاری بین‌المللی، به عنوان مثال، از طریق UNESCAP، می‌تواند برنامه‌ریزی شهری تاب‌آور را تقویت کند.

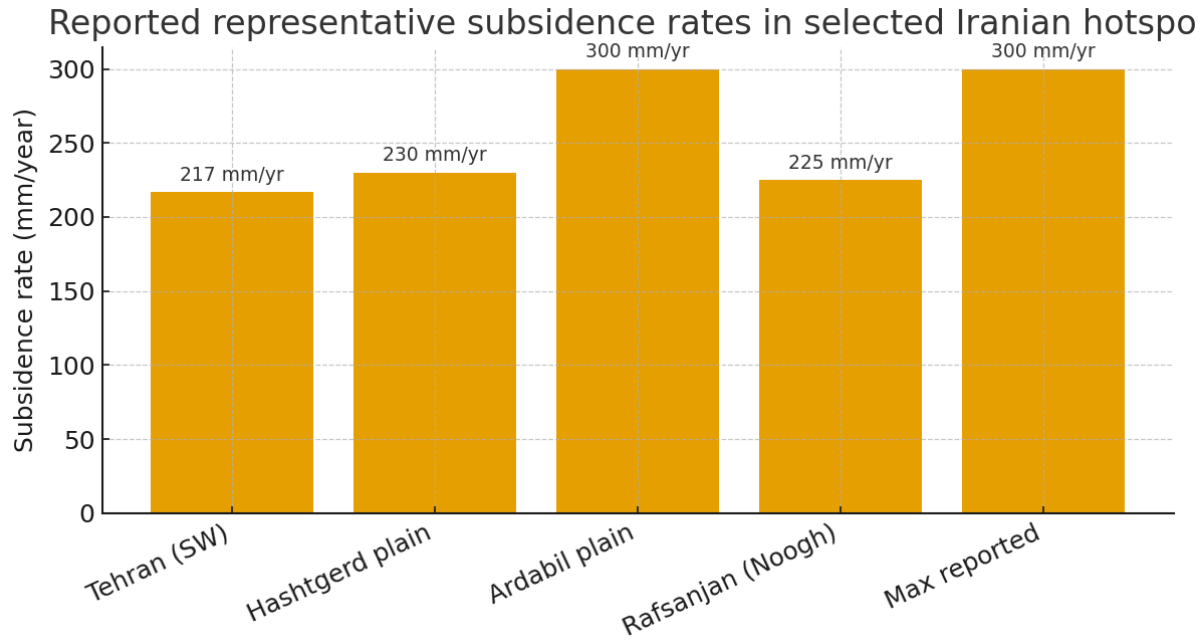
نتیجه‌گیری اصلی

فرونشست زمین در ایران، که ۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع را با نرخ تا ۳۷ سانتی‌متر در سال در بر می‌گیرد، پیامدهای سوء مدیریت آب‌های زیرزمینی را به تصویر می‌کشد و اکوسیستم‌ها و ۱۴ میلیون زندگی را به خطر می‌اندازد. مشاهدات InSAR بهره‌برداری بیش از حد در حوضه‌های آبیاری کواترنر را به عنوان عامل اصلی نشان می‌دهد و نیاز به اقدام فوری دارد. با اعمال محدودیت‌های استخراج، مدرن‌سازی آبیاری و پذیرش سیاست‌های WEFLC، ایران می‌تواند این بحران را کاهش دهد، تعادل سفره‌های آب زیرزمینی را بازگرداند و از فروپاشی زیرساخت‌ها جلوگیری کند. اصلاحات فوری و مبتنی بر علم برای تضمین توسعه پایدار در این کشورِ دچار تنش آبی ضروری است.

نتایج و بحث

یک بررسی ماهواره‌ای اخیر با وضوح ۱۰۰ متر (Sentinel-1، ۲۰۲۰-۲۰۱۴) تخمین زد که حدود ۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع (حدود ۳٫۵٪ از ایران) فرونشست قابل تشخیص را تجربه کرده است؛ حدود ۳۰۰۰ کیلومتر مربع نرخ فرونشست بیش از ۱۰ سانتی‌متر در سال را نشان داده‌اند. نقاط کلیدی شامل بخش‌های بزرگی از استان کرمان، دشت تهران و دشت اصفهان-برخوار هستند. نرخ‌های محلی گزارش شده در مقالات می‌تواند در برخی از حوضه‌های کشاورزی (به عنوان مثال، کرمان) از ۳۰ سانتی‌متر در سال فراتر رود، و تهران در دشت‌های غربی فرونشست سریع محلی را نشان می‌دهد. دشت تهران: تجزیه و تحلیل‌های سری زمانی InSAR و Landsat نشان دهنده کمربندهای فرونشست مداوم مرتبط با گسترش شهری و افت آب‌های زیرزمینی، با تغییرپذیری مکانی پیچیده در سراسر منطقه شهری است. و همچنین دشت اصفهان-برخوار: مطالعات Sentinel-1 (۲۰۲۲-۲۰۱۵) تغییرات عمودی قابل توجهی را نشان می‌دهد که با پمپاژ آبیاری و تنظیم رودخانه مرتبط است. مشاهدات محلی اخیر از ایجاد گودال‌ها و خسارات زیرساختی خبر می‌دهد که باعث تخلیه محله‌های آسیب‌دیده شده است.

نرخ‌های فرونشست گزارش‌شده از ماهواره (تحلیل‌های InSAR/Sentinel-۱ و پورتال‌های ملی) را برای نقاط داغ برجسته در ایران گردآوری کرده و نمودارهای توضیحی مختصری ارائه می‌دهد. شکل شماره ۳، خلاصه‌ای از مقادیر گزارش‌شده در مطالعات بررسی‌شده توسط همکاران و پورتال‌های اجتماعی (COMET-LiCS، Science Advances/Motagh و همکاران، Scientific Reports و مطالعات منطقه‌ای InSAR) را ارائه می‌دهند.



شکل ۳ نرخ‌های حداکثر یا میانگین فرونشست گزارش‌شده برای چندین نقطه کلیدی در ایران را نشان می‌دهد

نتیجه‌گیری

کاهش فرونشست نیازمند استراتژی‌های اصولی و مبتنی بر شواهد است که بر پایداری متمرکز بوده و از مشاهدات چندمقیاسی بهره می‌برند. رویکردهای اصلی شامل تنظیم استخراج به زیر نرخ‌های تجدید، بهبود راندمان آبیاری (بیش از ۵٪ از میزان فعلی تا ۳۵٪ کاهش بالقوه در تخلیه) و پهنه‌بندی مناطق پرخطر (بیش از ۱۰ سانتی‌متر در سال) برای توسعه محدود است. احیای قنات‌های سنتی و اجرای تغذیه مصنوعی (به عنوان مثال، تغذیه مدیریت‌شده سفره آب، MAR) می‌تواند خسارات را در حوضه‌هایی مانند فلات مرکزی جبران کند، اگرچه امکان‌سنجی اقتصادی باید ارزیابی شود. تغییر کشت به گونه‌های کم‌آب و ادغام نمک‌زدایی، امکان ماندگاری طولانی‌مدت را فراهم می‌کند و در صورت مقیاس‌بندی ملی، می‌تواند پیشرفت را در ۴۰٪ از مناطق آسیب‌دیده متوقف کند. چارچوب‌های سیاست ملی باید سنجش از دور را با داده‌های زمینی برای مدیریت تطبیقی ترکیب کنند و از راه‌حل‌های کوتاه‌مدت مانند جابجایی سرمایه اجتناب کنند. تنها راه عملی برای مبارزه با فرونشست، کاهش استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی است، همانطور که در تحلیل‌های ۲۰۲۵ تأکید شده است، همراه با نظارت در زمان واقعی برای ارزیابی اثربخشی مداخله.

برای فراتر رفتن از ارزیابی‌های فعلی، ما یک پروژه تحقیقاتی جدید پیشنهاد می‌کنیم: "ادغام حسگرهای چندمقیاسی برای مدیریت پیش‌بینی فرونشست در ایران (MSSFP-Iran). این ابتکار سه ساله، با بودجه ۵ الی ۱۰ میلیاردی، با هدف توسعه یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری در زمان واقعی با ادغام داده‌های ماهواره‌ای، سنجش از دور و سنجش از میدان نزدیک برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی کاهش فرونشست انجام می‌شود. که اهداف آن (۱) ترکیب داده‌های چندمنبعی برای مدل‌سازی فرونشست با وضوح بالا؛ (۲) شبیه‌سازی سناریوهای کاهش (به عنوان مثال، MAR، کلاهک‌های استخراج) با استفاده از یادگیری ماشین؛ (۳) اجرای آزمایشی در نقاط حساس مانند تهران و رفسنجان، ارزیابی کاهش ۲۰ تا ۵۰ درصدی نرخ فرونشست. داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-۱/۲ InSAR (برای تغییر شکل در مقیاس میلی‌متر) و GRACE-FO (تخمین‌های تخلیه مبتنی بر جاذبه) نظارت در مقیاس وسیع با وضوح ۱۰۰ متر را فراهم می‌کنند که هر دو ماه یکبار به‌روزرسانی می‌شود. سنجش از دور از طریق Landsat-۹ و LiDAR نصب شده بر روی پهپاد، تغییرات کاربری زمین و شکاف‌های سطحی را در مقیاس ۳۰ متر تا ۱ سانتی‌متر ردیابی می‌کند و امکان تشخیص بازیابی الاستیک اولیه پس از مداخله را فراهم می‌کند. سنجش از راه دور، شبکه‌ای از ۵۰ ایستگاه GNSS، اکستنسومتر و پیزومتر را برای ارزیابی زمینی زیر روزانه مستقر می‌کند و دینامیک تراکم غیرالاستیک را با دقت کمتر از ۱ میلی‌متر ثبت می‌کند.

ادغام داده‌ها از شبکه‌های عصبی کانولوشن عمیق ترکیبی (CNN) با InSAR پراکنده‌ساز پایدار، همانطور که در مطالعات درون‌یابی اخیر نشان داده شده است، برای پیش‌بینی فرونشست تحت سناریوهایی مانند کاهش ۳۰ درصدی استخراج استفاده می‌کند. مدل‌سازی هیدروژئولوژیکی (MODFLOW) این ورودی‌ها را برای پیش‌بینی پاسخ‌های آبخوان، با اعتبارسنجی در برابر مجموعه داده‌های تاریخی (۲۰۱۴-۲۰۲۵) ادغام می‌کند.

نتایج مورد انتظار: یک داشبورد مبتنی بر وب برای سیاست‌گذاران، که توقف فرونشست در مناطق آزمایشی را از طریق سری‌های زمانی InSAR قبل/بعد از مداخله نشان می‌دهد. پیامدهای پیشنهادی شامل گسترش ملی مقیاس‌پذیر، کاهش ۱۵ درصدی خسارات اقتصادی سالانه است. اخلاق اصولی، شفافیت داده‌ها و مشارکت ذینفعان را تضمین می‌کند و به ریشه‌های سوء مدیریت می‌پردازد. این پیشنهاد بر اساس پیشرفت‌های ۲۰۲۴-۲۰۲۵ بنا شده و یک طرح علمی برای مدیریت پایدار آب ارائه می‌دهد.

فهرست منابع

References

Ashraf, S., Nazemi, A., AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11, 9135. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y

Beni, F. A. (2024). Quantifying land subsidence and its nexus with groundwater in the Isfahan-Borkhar plain using Sentinel-1 (2015–2022). *Catena*, 243, 108182. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108182

Bockstiegel, M., et al. (2024). Simulation of present and future land subsidence in the ... *Hydrogeology Journal*, 32, 123-136. https://doi.org/10.1007/s10040-023-02724-2

Haghshenas Haghighi, M., et al. (2021). Land subsidence hazard in Iran revealed by Sentinel-1 time-series. *ISPRS Archives*, XLIII-B3-2021, 65-70. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-65-2021

Haghighi, M. H., Motagh, M., et al. (2024). A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10(15), eadk3056. https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3056

Khairy, H., Sarfi, M. (2024). Land subsidence in Iran: an omnipresent geohazard. *Geological Journal*, 59(10), 2473-2485. https://doi.org/10.1111/gto.12473

Panahi, M., Khosravi, K., Golkarian, A., Roostaei, M., Barzegar, R., Omidvar, E., Rezaie, F., Saco, P. M., Sharifi, A., Jun, C., Bateni, S. M., Lee, C.-W., Lee, S. (2022). A country-wide assessment of Iran's land subsidence susceptibility using satellite-based InSAR and machine learning. *Geocarto International*, 37(25), 14065–14087. https://doi.org/10.5267/j.jfs.2022.9.001

Sefati, Z., Khalilimoghadam, B., Nadian, H. (2019). Assessing urban soil quality by improving the method for soil environmental quality evaluation in a saline groundwater area of Iran. *Catena*, 173, 471-480. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.040

The Guardian. (2024). Cracks and sinkholes appear across Iran amid groundwater crisis. *The Guardian*. Retrieved from https://www.theguardian.com

Watson, A. R., et al. (2024). An InSAR–GNSS velocity field for Iran. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2023GL107892. https://doi.org/10.1029/2023GL107892

چکیده انگلیسی

Land subsidence in Iran: extent, drivers, observations, and mitigation pathways

Seyedeh Elham Elyasi
PhD.Candidate of Physics and Soil Conservation, University of Zanjan

Iran is experiencing widespread land subsidence driven primarily by intensive groundwater extraction, with severe impacts on infrastructure, heritage sites, agriculture, and water security. Recent satellite InSAR surveys indicate that ~3.5% of the country (≈56,000 km²) shows measurable subsidence between 2014–2020, including localized rates exceeding 10–30 cm/yr in hotspots such as Kerman, Tehran, and parts of Isfahan. This paper synthesizes national-scale remote-sensing observations, local field studies, and groundwater records to (1) quantify patterns and rates of subsidence, (2) link subsidence to groundwater drawdown and aquifer compaction, (3) review modeling approaches for simulating present and future subsidence, and (4) outline practical mitigation and policy measures for Iran's water–land–infrastructure nexus. Key findings emphasize the urgency of integrated groundwater governance, targeted subsidence monitoring, and adaptive urban/infrastructure planning.

Keyword: groundwater aquifers, land subsidence, remote sensing ,Water crisis