

Document Type

Review Article

مروری

نوع مقاله

A Review of Laboratory and Numerical Methods in Subsidence Modeling: Challenges and Solutions

A. Asghari^{1*}, H. Sarbaz²

1- Ph.D. Candidate in Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Civil Engineering, Geotechnical Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.

* Corresponding Author Email: a.asghari@iau.ac.ir

Received 09-04-2025

Revised 30-07-2025

Accepted 16-08-2025

Available online 16-12-2025

مروری بر روش‌های آزمایشگاهی و عددی در مدل‌سازی فرونشست: چالش‌ها و راهکارها

علی اصغری^{۱*}، حسین سرباز^۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

۲- استادیار مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.

* رایانامه نویسنده مسئول: a.asghari@iau.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

Land subsidence is one of the most serious geotechnical hazards affecting urban areas and plains that experience intensive groundwater exploitation. The phenomenon is primarily triggered by groundwater-level decline and the consequent stress redistribution within the soil profile, posing a significant threat to infrastructure. This paper presents a comprehensive literature review of recent research on laboratory techniques and numerical modeling approaches used for the analysis and prediction of subsidence. Laboratory investigations, particularly physical modeling at various scales, reproduce field conditions in a controlled environment, allowing the assessment of soil behavior under different stress states and groundwater drawdown. Numerical models, implemented through finite-element, distinct-element, and coupled methods, are capable of simulating subsidence over large spatial extents and within complex geological settings. The synthesis of the reviewed studies demonstrates that integrating laboratory data with numerical simulations markedly improves prediction accuracy and deepens the understanding of subsidence mechanisms. Key strategies include improving the quality of input data, developing more accurate constitutive models for fine-grained soils, employing remote-sensing tools for model validation, and integrating intelligent, machine learning based models. These methods provide a pathway for developing more precise approaches to managing and reducing the risk of subsidence.

Keywords: Land Subsidence, Numerical Modeling, Geotechnical Testing, Groundwater Drawdown, Soil Mechanical Behavior, Geotechnical Analysis.

چکیده

فرونشست زمین یکی از مهمترین مخاطرات ژئوتکنیکی در مناطق شهری و دشت‌هایی که بهره‌برداری شدید از منابع آب زیرزمینی میکنند است. این پدیده عمدتاً ناشی از افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات تنش در لایه‌های خاک رخ می‌دهد و تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های عمرانی محسوب می‌شود. این مقاله یک مطالعه مروری کتابخانه‌ای است که به بررسی پژوهش‌های اخیر در زمینه روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی در تحلیل و پیش‌بینی فرونشست می‌پردازد. روش‌های آزمایشگاهی شامل مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس‌های مختلف است که شرایط واقعی را در محیط کنترل شده بازسازی کرده و رفتار خاک تحت تنش‌های متفاوت و افت آب زیرزمینی را بررسی می‌کنند. مدل‌های عددی با استفاده از روش‌هایی مانند المان محدود و المان مجزا، توانایی شبیه‌سازی فرونشست در مقیاس بزرگ و شرایط زمین‌شناختی پیچیده را دارند. نتایج مرور مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی سبب افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و درک بهتر مکانیسم‌های فرونشست می‌شود. از جمله راهکارهای کلیدی می‌توان به بهبود کیفیت داده‌های ورودی، توسعه مدل‌های دقیق‌تر برای خاک‌های ریزدانه، استفاده از ابزارهای سنجش از دور برای اعتبارسنجی مدل‌ها و به‌کارگیری مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین اشاره کرد. این روش‌ها مسیر توسعه رویکردهای دقیق‌تر برای مدیریت و کاهش ریسک فرونشست را فراهم می‌آورند.

واژه‌های کلیدی: فرونشست زمین، مدل‌سازی عددی،

آزمایش‌های ژئوتکنیکی، افت آب زیرزمینی، رفتار مکانیکی خاک، تحلیل ژئوتکنیکی.

How to cite this article:

Asghari, A., & Sarbaz, H. (2025). A Review of Laboratory and Numerical Methods in Subsidence Modeling: Challenges and Solutions. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 63-79. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2504-1418>

آسیب‌های فراوانی را در بسیاری از کشورهای جهان از جمله مکزیک، استرالیا، کلمبیا، چین، آمریکا، تایلند، هند، ژاپن، ایران، ایتالیا، هلند، ونزوئلا، مصر، عربستان سعودی، انگلستان، فرانسه، فلسطین، لهستان ایجاد نموده است. به‌عنوان مثال بررسی‌ها در ایالات متحده نشان داده‌اند که فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی باعث آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های شهری در ایالت‌هایی مانند کالیفرنیا و تگزاس شده است. از طرفی راهکارهای به‌کار رفته برای جلوگیری از تداوم فرونشست زمین در این مناطق عمدتاً شامل مدیریت منابع آب و محدود کردن و کنترل برداشت از آب‌های زیرزمینی و همچنین هدایت آب‌های سطحی به سمت آبخوان‌ها می‌باشند (سرباز و آقامیری، ۱۴۰۲). برای نمونه [Herrera و همکاران \(۲۰۲۱\)](#) با تحلیل فرونشست در سطح جهانی تأثیرات این پدیده را بر امنیت محیط‌زیستی و شهری در کشورهای مختلف بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که کنترل منابع آب زیرزمینی برای کاهش خطر فرونشست ضروری است.

مطالعه فرونشست زمین به دلیل چندگانگی عوامل تأثیرگذار، از جمله تغییرات هیدرولوژیکی، نوع خاک و فعالیت‌های انسانی، بسیار چالش‌برانگیز است. در بسیاری از مناطق شهری که میزان برداشت آب از منابع زیرزمینی زیاد است، بررسی دقیق فرونشست به دلیل عدم دسترسی به داده‌های میدانی جامع و نیاز به مدل‌سازی پیچیده سختی‌های زیادی را به دنبال دارد. روش‌های آزمایشگاهی که معمولاً در مقیاس کوچک انجام می‌شوند، توانایی بررسی جزئیات رفتار مکانیکی خاک را دارند؛ اما این روش‌ها به دلیل محدودیت‌های مقیاسی و انتقال نتایج به شرایط واقعی، دقت کافی در پیش‌بینی گسترده پدیده فرونشست را ندارند. به‌عنوان مثال [Abidin و همکاران \(۲۰۰۸\)](#) در مطالعه‌ای در جاکارتا از داده‌های GPS برای تأیید مدل‌های آزمایشگاهی استفاده کردند و نشان دادند که هرچند این روش‌ها می‌توانند به پیش‌بینی فرونشست کمک کنند اما برای برآورد دقیق‌تر به داده‌های میدانی بیشتری نیاز است ([Abidin و همکاران، ۲۰۰۸](#)). از سوی دیگر، مدل‌سازی‌های عددی به‌ویژه روش اجزای محدود ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرونشست در مقیاس‌های بزرگ‌تر و تحت شرایط پیچیده‌تر هستند ([Zhu و همکاران، ۲۰۲۰](#)).

در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی با استفاده از مدل اجزای محدود، تأثیر فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک چین را بررسی کردند و نشان دادند که مدل‌های عددی در پیش‌بینی رفتار خاک تحت شرایط فرونشست عملکرد بسیار بهتری دارند. با این حال یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی‌های عددی، کالیبراسیون دقیق مدل‌ها بر اساس داده‌های تجربی است. که با مقایسه نتایج آزمایش‌های فشار خاک و

فرونشست زمین یکی از پدیده‌های ژئوتکنیکی با پیامدهای گسترده محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی است که به علت‌های مختلف از جمله کاهش حجم مواد زیرسطحی مانند آب‌های زیرزمینی، نفت و گاز و استخراج منابع معدنی اتفاق می‌افتد با این‌وجود در حال حاضر در ایران و در بسیاری از مناطق دیگر جهان اغلب فرونشست‌ها ناشی از عدم مدیریت منابع آبی و بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این نوع فرونشست پدیده‌ای تدریجی و زمان‌بر است. در این فرآیند، با افت سطح آب زیرزمینی و زهکشی آب از لایه‌های ریزدانه، تنش مؤثر افزایش می‌یابد. این افزایش تنش منجر به تراکم غیرالاستیک در خاک و در نتیجه کاهش حجم و ضخامت قائم لایه خاک و شکل‌گیری پدیده فرونشست می‌شود. در فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی، رسوبات دانه درشت تقریباً هم‌زمان با برداشت آب نشست می‌کنند، اما لایه‌های رسی و سیلتی به دلیل نفوذپذیری کمتر، ممکن است دهه‌ها برای زهکشی و تراکم کامل زمان نیاز داشته باشند. این تراکم حتی با تعادل در میزان برداشت و تغذیه آب زیرزمینی در آبخوان نیز ممکن است ادامه یابد. مناطق با پتانسیل بالای فرونشست شامل نهشته‌های جوان تحکیم نیافته، رسوبات آواری نیمه تحکیم یافته با تخلخل بالا، و آبخوان‌های بسته یا نیمه بسته ماسه‌ای یا شنی همراه با میان لایه‌های رسی هستند. این مناطق معمولاً در زیر نهشته‌های آبرفتی، دریاچه‌ای یا نهشته‌های دریایی کم عمق قرار دارند. به‌طورکلی برای وقوع پدیده فرونشست ناشی از افت تراز آب زیرزمینی، دو شرط وجود خاک مستعد فرونشست با ضخامت کافی و کاهش تراز آب زیرزمینی به صورت هم‌زمان موردنیاز است (سرباز و آقامیری، ۱۴۰۲).

فرونشست زمین پدیده‌ای پیچیده است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی متعددی قرار دارد و در دهه‌های گذشته با استفاده از رویکردهای متنوع به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. [Galloway و همکاران \(۱۹۹۹\)](#) از جمله پیشگامانی هستند که به طور سیستماتیک فرونشست ناشی از برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی را در ایالات متحده، به ویژه در دره مرکزی کالیفرنیا و منطقه هوستون-گالوستون در تگزاس، مستند کرده‌اند. مطالعات بعدی توسط [xue و همکاران \(۲۰۰۵\)](#) بر ماهیت گسترده این مشکل تأکید کرد و بیش از ۱۵۰ شهر بزرگ در سراسر جهان را تحت تأثیر فرونشست زمین شناسایی کرد.

در دهه‌های اخیر، افت تراز آب زیرزمینی بر اثر پمپاژ و برداشت، نفوذناپذیر کردن سطوح شهری، انحراف رواناب‌های سطحی یا جریان آب زیرزمینی و اجرای سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری مشکلات و

۱- ادبیات موضوع

پایش و مدل سازی فرونشست زمین در ایران و جهان

[Motagh و همکاران \(۲۰۰۷\)](#) با استفاده از فناوری InSAR به پایش فرونشست در دشت مشهد پرداختند و نرخ‌های قابل توجهی از تغییر شکل زمین را که ناشی از برداشت مداوم آب زیرزمینی بود، شناسایی کردند. به طور مشابه [لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۵](#) و [لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۶](#) و [لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۹](#) مطالعات هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی گسترده‌ای را در نیشابور، مهیار و کاشمر انجام دادند و رسوبات آبرفتی جوان و غیرمتراکم همراه با افت شدید سطح آب زیرزمینی را به عنوان عوامل اصلی وقوع فرونشست معرفی کردند. یافته‌های آن‌ها تأکید داشت که هم‌زمانی لایه‌های خاک فشرده‌پذیر با ضخامت کافی و افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی برای آغاز فرونشست زمین در این مناطق ضروری است.

[Rahnama و Moafi \(۲۰۰۹\)](#) و [Mousavi و همکاران \(۲۰۰۱\)](#) فرونشست قابل توجهی را در رفسنجان گزارش کردند و تغییر شکل زمین را به برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی با تقاضای بالای آب نسبت دادند؛ امری که منجر به آسیب به زیرساخت‌ها و کاهش بهره‌وری کشاورزی شده است. این مشاهدات با یافته‌های جهانی [Galloway و همکاران \(۱۹۹۸\)](#) و [Hu و همکاران \(۲۰۰۴\)](#) همسو است که بر ماهیت تدریجی و غیرقابل بازگشت فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی و پیامدهای اقتصادی-اجتماعی و محیط‌زیستی آن تأکید دارند.

مطالعات آزمایشگاهی

اگرچه مطالعات آزمایشگاهی در ایران نسبتاً محدود بوده‌اند، اما برای درک رفتار مکانیکی دقیق خاک‌های رسی تحت شرایط کاهش آب زیرزمینی اهمیت دارند. این مطالعات نشان می‌دهند که کاهش فشار آب منفذی باعث افزایش تنش مؤثر در خاک شده و منجر به تراکم غیرالاستیک، کاهش ضخامت لایه‌ها و در نتیجه فرونشست سطحی در بازه‌های زمانی طولانی می‌شود. نرخ زهکشی متفاوت در رسوبات دانه درشت و دانه ریز، الگوهای نشست پیچیده‌ای ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که رسوبات دانه درشت بلافاصله پس از برداشت آب نشست می‌کنند، اما لایه‌های رسی و سیلتی به دلیل نفوذپذیری پایین ممکن است دهه‌ها برای زهکشی و تحکیم کامل زمان نیاز داشته باشند.

کاربردهای InSAR و سنجش از دور

[Abidin و همکاران \(۲۰۰۸\)](#) در مطالعه‌ای در جاکارتا با استفاده از پایش GPS و کالیبراسیون داده‌های آزمایشگاهی، دقت پیش‌بینی فرونشست را بهبود دادند و ضرورت ترکیب آزمایش‌های آزمایشگاهی با مدل‌های عددی را برای افزایش

شبیه‌سازی‌های عددی آن، نشان داده شد که مدل‌های عددی می‌توانند به پیش‌بینی دقیق‌تر فرونشست کمک کنند، اما همواره به داده‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون نیاز است ([Shang و همکاران، ۲۰۲۱](#)).

همچنین علاوه بر مدل‌سازی‌های عددی، استفاده از داده‌های اینترفرومتری و تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یک ابزار کمکی برای بررسی و پیش‌بینی فرونشست مورد توجه قرار گرفته است ([Chaussard و همکاران، ۲۰۱۳](#)). در سال‌های اخیر در بسیاری از کشورهای دنیا از داده‌های راداری برای مطالعه فرونشست استفاده شده است. در مکزیکوسیتی نشان دادند این فناوری می‌تواند به شناسایی مناطق مستعد فرونشست کمک کند. همچنین، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در مکزیکوسیتی نشان دادند فرونشست ناشی از برداشت منابع آب زیرزمینی می‌تواند به‌صورت دقیق با این روش شناسایی و پایش شود ([López-Quiroz و همکاران، ۲۰۰۹](#)).

فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، پدیده‌ای جهانی است و بیش از ۱۵۰ شهر بزرگ در سراسر جهان را تحت تأثیر گسترده قرار داده است ([Hu و همکاران، ۲۰۰۴](#)). خطرات زمین‌شناسی ناشی از فرونشست زمین به دلیل پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی در شهرهایی مانند جاکارتا و سمارانگ در اندونزی ([Chaussard و همکاران، ۲۰۱۳](#))، ونیز در ایتالیا ([Teatini و همکاران، ۲۰۱۲](#))، مکزیکوسیتی در مکزیک ([Osmanoğlu و همکاران، ۲۰۱۱](#))؛ [Yan و همکاران، ۲۰۱۲](#)؛ [Chaussard و همکاران، ۲۰۱۳](#))، شانگهای در چین ([Hu و همکاران، ۲۰۰۴](#))، پکن در چین ([Ng و همکاران، ۲۰۱۲](#)) تیانجین در چین ([Lixin و همکاران، ۲۰۱۱](#))، دره آنتلپ در کالیفرنای ایالات متحده ([Galloway و همکاران، ۱۹۹۸](#))، هیوستون-گالوستون در تگزاس ایالات متحده ([Gabrysch، ۱۹۷۴](#)) دره سانتا کلارا در کالیفرنای ایالات متحده ([Poland و Ireland، ۱۹۸۸](#))، بانکوک در تایلند ([Phien-wej و همکاران، ۲۰۰۶](#)) و دره کوئته در پاکستان ([Khan و همکاران، ۲۰۱۳](#)) گزارش شده است. در ایران نیز این پدیده در رفسنجان ([Rahnama و Moafi، ۲۰۰۹](#))؛ [Mousavi و همکاران، ۲۰۰۱](#) مهیار، نیشابور و کاشمر ([لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۵](#) و [لشکری‌پور و همکاران، ۱۳۸۶](#)) و مشهد ([Motagh و همکاران، ۲۰۰۷](#)) گزارش شده است. پیامدهای شدید محیط‌زیستی و اقتصادی ناشی از توزیع جهانی فرونشست زمین نشان می‌دهد که این پدیده نیازمند تحقیقات و انتقال فناوری در سطح بین‌المللی است ([Hu و همکاران، ۲۰۰۴](#)). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح آبخوان‌ها، بخش‌های وسیعی از دشت اصفهان با نرخ‌های قابل توجهی از فرونشست زمین مواجه هستند که این موضوع تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های شهری و کشاورزی منطقه محسوب می‌شود.

دقت نشان دادند؛ رویکردی که برای چالش‌های مشابه در ایران نیز قابل استفاده است.

رویکردهای مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدود به ابزاری اساسی برای پیش‌بینی فرونشست تحت سناریوهای مختلف زمین‌شناسی و برداشت تبدیل شده است [Zhu و همکاران \(2020\)](#) و [Shang و همکاران \(2021\)](#) اثربخشی مدل‌های هیدرو-مکانیکی کوپل‌شده را در پیش‌بینی فرونشست در مناطق خشک چین نشان دادند و تأکید کردند که کالیبراسیون دقیق با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی برای نتایج قابل اعتماد ضروری است. این مدل‌ها ساختار لایه‌ای سفره‌های آب، رفتار غیرخطی خاک و اثرات نشست تدریجی و پیوسته خاک وابسته به زمان را در نظر می‌گیرند که برای شرایط ایران با سفره‌ها و آکیتاردهای ضخیم و چندلایه نیز مرتبط است.

در ایران، مدل‌سازی عددی پتانسیل بالایی برای شبیه‌سازی فرونشست در شهرهایی با چالش‌های شدید آب زیرزمینی مانند مشهد، تهران و رفسنجان دارد. با این حال، دستیابی به دقت بالا در پیش‌بینی نیازمند پایش میدانی جامع و تعیین دقیق ویژگی‌های خاک است.

استفاده از InSAR و پایش ماهواره‌ای به طور قابل توجهی درک الگوهای فرونشست را در ایران و جهان ارتقا داده است [López-Quiroz و همکاران، \(۲۰۰۹\)](#) و [Chaussard و همکاران \(۲۰۱۳\)](#) کارایی InSAR را در پایش فرونشست با وضوح بالا نشان دادند که قادر به ثبت تغییر شکل‌های مکانی و زمانی زمین است و برای شناسایی مناطق پرخطر جهت برنامه‌ریزی کاهش ریسک حیاتی است. در ایران، [Motagh و همکاران \(۲۰۰۷\)](#) با موفقیت از InSAR برای پایش توزیع مکانی فرونشست در مشهد استفاده کردند و قابلیت این روش را در مناطقی با داده‌های زمینی محدود نشان دادند.

شکاف‌های پژوهشی و نیاز به رویکردهای یکپارچه

با وجود پیشرفت در پایش و مدل‌سازی، چالش‌هایی در پیش‌بینی دقیق فرونشست به دلیل محدودیت داده‌های میدانی بلندمدت، پیچیدگی شرایط هیدروژئولوژیکی و نیاز به شناسایی دقیق خاک و سفره‌های آب وجود دارد. ادغام آزمایش‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی پیشرفته و پایش مستمر InSAR مسیر امیدوارکننده‌ای برای افزایش قابلیت اطمینان چارچوب‌های پیش‌بینی فرونشست در ایران فراهم می‌کند.

علاوه بر این فقدان یک چارچوب جامع و یکپارچه مدیریت فرونشست در ایران، نیاز به مطالعات نظام‌مند را که مدیریت منابع آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی کاربری زمین و ارزیابی‌های ژئوتکنیکی را به هم پیوند دهد، برجسته می‌کند تا بتوان به طور مؤثر پیامدهای اقتصادی-اجتماعی

فرونشست را کاهش داد. رویکردی چند رشته‌ای که نقاط قوت آزمایشگاهی، عددی و سنجش از دور را ترکیب کند، می‌تواند به مدیریت پایدار منابع آب و زمین در مناطق مستعد فرونشست کشور کمک شایانی نماید.

به‌طور کلی ادبیات اخیر نشان می‌دهد که ترکیب تکنیک‌های پیشرفته پایش با رویکردهای آزمایشگاهی و عددی می‌تواند به طور قابل توجهی درک مکانیسم‌های فرونشست زمین را بهبود بخشد، قابلیت‌های پیش‌بینی را افزایش دهد و از استراتژی‌های مدیریت پایدار آب و زمین در مناطق مستعد فرونشست پشتیبانی کند.

لذا این مقاله مروری با هدف بررسی روش‌های آزمایشگاهی و عددی در زمینه مدل‌سازی فرونشست زمین به تحقیقات صورت گرفته در کشورهای مختلف دنیا به منظور شناخت وضعیت فعلی مطالعات و چالش‌های موجود و ارائه پیشنهادهایی برای مطالعات آتی پرداخته است. در این مقاله، مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی در زمینه فرونشست بررسی شده و به مزایا، معایب و چالش‌های هر کدام پرداخته شده و تلاش شده در این بررسی‌ها ضمن شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی موجود، راهکارهایی برای بهبود روش‌های مدل‌سازی فرونشست ارائه شود.

۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی

آزمایش‌های شبیه‌سازی فشار مخزن یکی از روش‌های اساسی برای بررسی تأثیرات برداشت منابع زیرزمینی (مانند آب، نفت یا گاز) بر فرونشست زمین است. این روش‌ها معمولاً در محیط آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شوند تا تغییرات فشار مخازن زیرزمینی و تأثیر آن بر نشست سطح زمین در مقیاس‌های کوچک‌تر مطالعه شود.

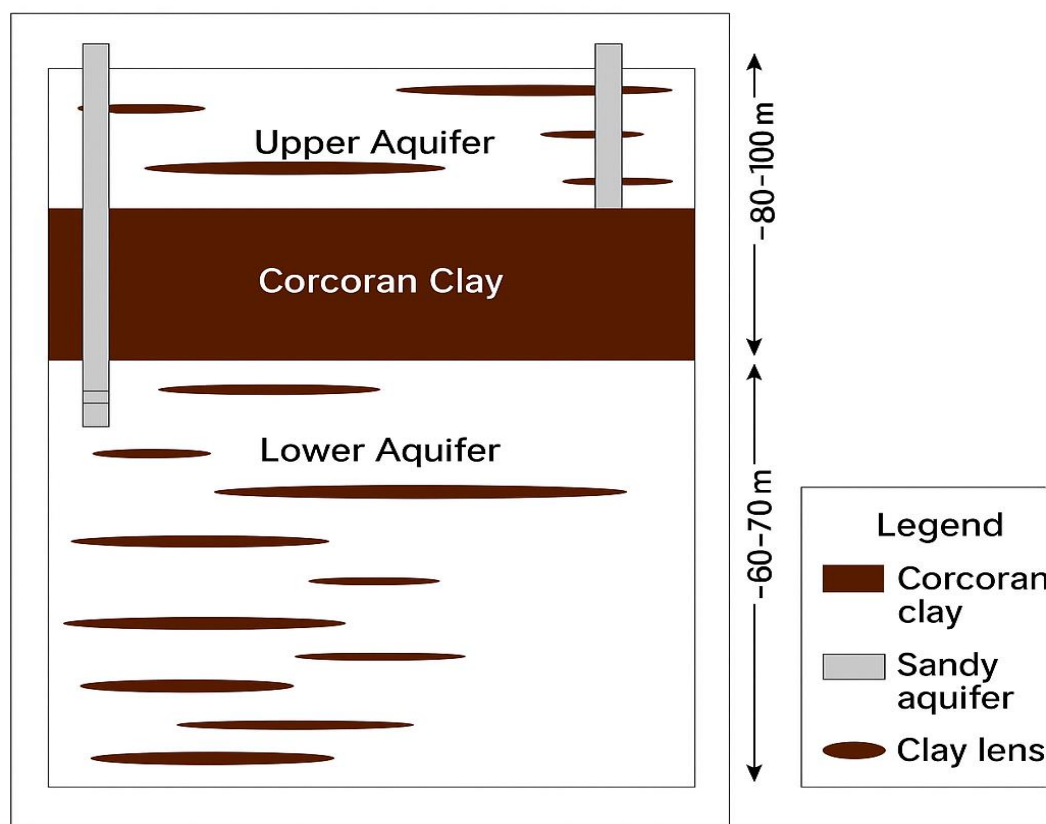
[Ireland و Poland \(۱۹۸۸\)](#) یکی از قدیمی‌ترین و جامع‌ترین مطالعات در زمینه فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در دره سن‌جواکین کالیفرنیا را انجام دادند. آن‌ها از مخازن مصنوعی و سنسورهای فشار برای شبیه‌سازی کاهش سطح آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج نشان داد که هر ۱۰ متر کاهش سطح آب زیرزمینی منجر به ۱/۵ متر نشست زمین می‌شود ([Ireland و Poland، ۱۹۸۸](#)).

[Li و Song \(۲۰۲۰\)](#) فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در مناطق ساحلی چین را بررسی کردند. آن‌ها از مخازن آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی کاهش فشار در سفره‌های آبی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد نشست زمین با نرخ برداشت آب رابطه خطی دارد. اما پس از رسیدن به نقطه بحرانی، نشست به شکل نمایی افزایش می‌یابد ([Li و Song، ۲۰۲۰](#)).

[Galloway و همکاران \(۱۹۹۸\)](#) به بررسی کاهش فشار مخازن زیرزمینی و تأثیر آن بر فرونشست زمین در کالیفرنیا پرداختند. مقطع عرضی مورد استفاده در مطالعه در شکل

در این مطالعه از ابزارهای دقیق هیدرولیکی برای اندازه‌گیری نشست استفاده شد (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

(۱) نشان داده شده است. آن‌ها مشاهده کردند کاهش فشار در مخازن زیرزمینی ناشی از برداشت منابع آبی، باعث نشست سالانه تا ۳۰ سانتی‌متر در برخی مناطق می‌شود.



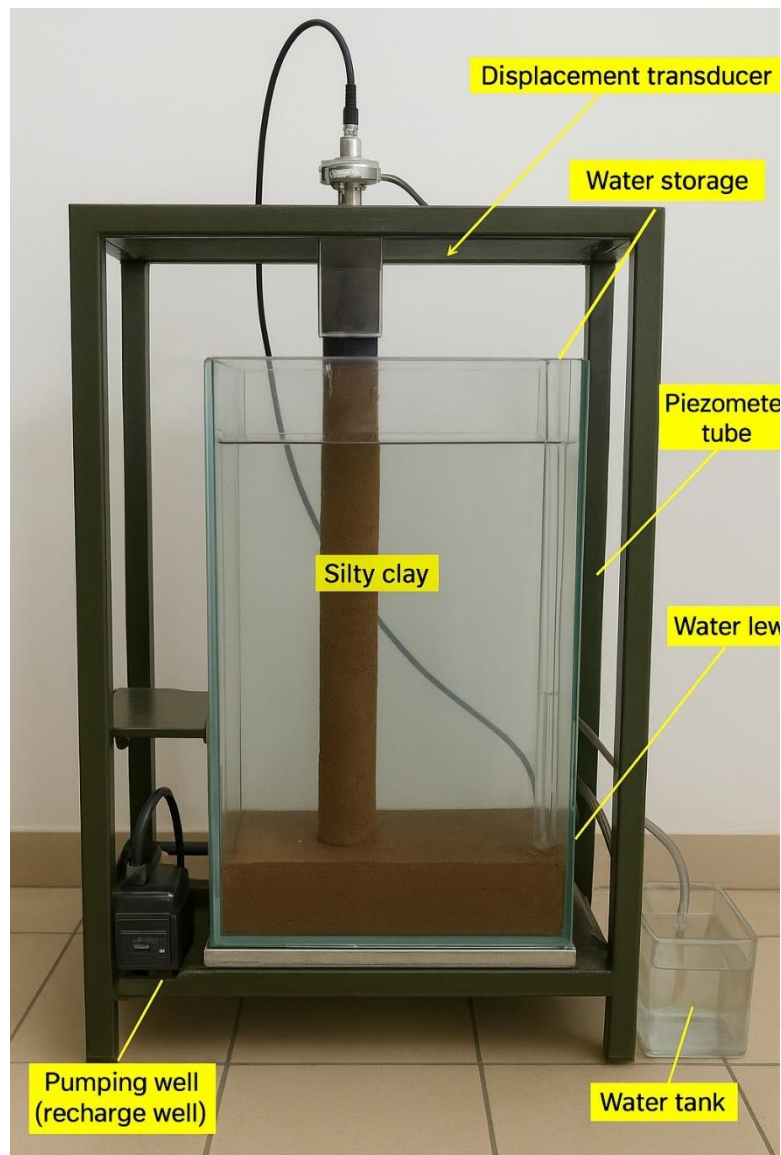
شکل ۱- مقطع عرضی ژئولوژیک مطالعه (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

پمپ شده وابسته بود. هرچه این فاصله بیشتر بود، اثر ماندل نیز بیشتر مشهود بود. نتایج کلی آزمایش نشان داد هر سه حالت پمپاژ می‌توانند فرونشست زمین را کاهش دهند، اما حالت پمپاژ و شارژ و تزریق دو چاهی مؤثرتر از دو حالت دیگر بود. در این حالت، نرخ افزایش نشست کوچکتر شده و به تدریج به حالت پایدار رسید. به‌طورکلی این سه حالت پمپاژ می‌توانستند به طور مؤثر فرونشست زمین را کنترل کنند (He و همکاران، ۲۰۲۰).

طبق مطالعه Modoni و همکاران (۲۰۱۳) ابزارهای تحلیل فضایی مانند GIS برای ترسیم الگوهای فرونشست، شناسایی مناطق در معرض خطر و همبستگی نقاط بحرانی فرونشست با مناطق برداشت شدید آب زیرزمینی مؤثر هستند (Modoni و همکاران، ۲۰۱۳). مطالعه وی و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد رابطه‌ای غیرخطی بین برداشت آب زیرزمینی و فرونشست وجود دارد که تحت تأثیر عوامل مانند ناهمگنی خاک قرار دارد. تزریق مصنوعی ممکن است تا حدی بتواند فرونشست را معکوس کند، اما روند آن به ویژگی‌های خاک بستگی دارد (Wei و همکاران، ۲۰۱۷).

Cao و همکاران (۲۰۲۰) یک آزمایش مدل‌سازی فیزیکی برای شبیه‌سازی فرآیندهای استخراج و تغذیه آب‌های زیرزمینی انجام دادند (شکل ۲). هدف اصلی این آزمایش، بررسی ویژگی‌های تغییر شکل خاک و تغییرات فشار آب منفذی در لایه‌های مختلف خاک بود. نتایج آزمایش به بررسی مکانیسم فرونشست زمین و تأثیر حالت‌های مختلف پمپاژ بر آن پرداخت. حالت‌های پمپاژ مورد بررسی شامل پمپاژ تک چاه، پمپاژ و شارژ مجدد تک چاه، و پمپاژ و شارژ مجدد دو چاه بودند (Cao و همکاران، ۲۰۲۰).

نتایج نشان داد که لایه‌های ماسه و رس رفتار متفاوتی در برابر تغییرات فشار آب منفذی و تغییر شکل از خود نشان می‌دهند. در لایه ماسه، فشار آب منفذی در حین پمپاژ کاهش یافته و با توقف پمپاژ افزایش می‌یابد. در مقابل، در لایه رس، فشار آب منفذی ابتدا به سرعت افزایش یافته، سپس در حین پمپاژ کاهش یافته و پس از توقف پمپاژ دوباره افزایش می‌یابد. این تغییرات فشار آب منفذی در لایه رس با اثر ماندل مطابقت داشت و به فاصله از لایه



شکل ۲- شماتیک مدل سازی آزمایشگاهی (Cao و همکاران، ۲۰۲۰)

- برداشت بیش از حد آب زیرزمینی باعث فشرده شدن غیرقابل بازگشت لایه های خاک می شود.

- ابزارهای تحلیل فضایی برای نظارت و پیش بینی مناطق در معرض خطر فرونشست بسیار حیاتی هستند.

- کنترل رابطه غیرخطی بین میزان برداشت آب و فرونشست زمین، نیازمند استراتژی های مدیریتی دقیق و حساب شده است.

- راه حل های مهندسی مانند دیوارهای آب بند می توانند به کاهش فرونشست کمک کنند.

- مدل های عددی پیشرفته مانند CFD درک بهتری از رفتار منابع آب زیرزمینی تحت شرایط برداشت آب ارائه می دهند.

پژوهش های آینده باید بر ادغام این یافته ها در روش های مدیریت پایدار منابع آب متمرکز شوند تا بین نیازهای آبی و اقدامات حفاظتی محیط زیست تعادل ایجاد شود. این کار

مداخلات مهندسی مانند دیوارهای آب بند می توانند جریان آب زیرزمینی را در طول فعالیت های ساختمانی کنترل کنند و به این ترتیب، فرونشست زمین را کاهش دهند.

فرونشست زمین که ناشی از برداشت بیش از حد آب از منابع زیرزمینی است، با استفاده از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی ^۲ (CFD) قابل ارزیابی است. این مدل ها کمک می کنند تا تأثیرات برداشت آب و تزریق مصنوعی منابع زیرزمینی بر فرونشست زمین بررسی شود و نقش عواملی مانند نفوذپذیری لایه های زمین نیز مورد توجه قرار گیرد. نتایج این مطالعات نشان می دهد فرونشست زمین ناشی از برداشت بیش از حد آب زیرزمینی، یک مسئله پیچیده است و برای کاهش آن نیاز به رویکردهای چند رشته ای و جامع وجود دارد. برخی از یافته های کلیدی این پژوهش ها عبارتند از:

از آسیب‌های بلند مدت ناشی از فرونشست زمین جلوگیری خواهد کرد. مطالعه‌ای توسط [Cigna و همکاران \(۲۰۱۲\)](#) به بررسی پایش نشست زمین و خطرات زمین‌شناختی مرتبط با آن در شهر موریلا، مکزیک، پرداخته است. این پژوهش با استفاده از فناوری تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر هوش مصنوعی (InSAR) انجام شد و یکی از چالش‌های مهم محیط‌زیستی در مناطق شهری را بررسی کرد.

شهر موریلا، مرکز ایالت میچوآکان در مکزیک، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. این شهر با جمعیتی نزدیک به ۸۰۰,۰۰۰ نفر، در دره‌ای با رسوبات آبرفتی قرار دارد و از دهه ۱۹۸۰ با مشکل فرونشست زمین مواجه بوده است. دلیل اصلی این پدیده، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی شناسایی شده است. پژوهشگران در این مطالعه از تکنیک پیشرفته InSAR استفاده کردند تا تغییرات سطح زمین را با دقت بالا اندازه‌گیری کنند. نتایج نشان داد استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی عامل اصلی فرونشست در این منطقه است. همچنین، رابطه مستقیمی بین ضخامت رسوبات کواترنری و میزان فرونشست زمین مشاهده شد ([Cigna و همکاران، ۲۰۱۲](#)). این مطالعه بر اهمیت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و لزوم نظارت دقیق بر تغییرات زمین‌شناختی در مناطق شهری تأکید می‌کند. [Bakr \(۲۰۱۵\)](#)

از روش‌های پیشرفته برای مطالعه فرونشست زمین در شهر جاکارتا، اندونزی، استفاده کرد. در این پژوهش، سال ۱۹۶۵ به عنوان سال مرجع در نظر گرفته شد، چرا که در آن زمان به دلیل برداشت بسیار محدود آب‌های زیرزمینی، نشست قابل توجهی برای زمین وجود نداشت. مدل ارائه شده بر اساس داده‌های فرونشست زمین در بازه زمانی ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۰، با استفاده از فرمول‌بندی MAP کالیبره شد و تطابق خوبی بین مقادیر نشست زمین اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی شده ایجاد کرد. این مدل سپس برای پیش‌بینی فرونشست زمین در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۵، ۲۰۳۰ و ۲۱۰۰ استفاده شد. نتایج نشان داد در منطقه فشردگی ناشی از نشست ثانویه نقش بسیار مهمی در محاسبه نشست زمین دارد. به‌طوری‌که در مطالعه موردی انجام شده، با استفاده از پارامترهای کالیبره شده، خزش حدود ۹۹٪ از کل نشست زمین را تا سال ۲۱۰۰ تشکیل می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد ترکیب فرآیندهای تحکیم و خزش شرایط مطلوبی ایجاد کرده‌اند که در آن، تحکیم توانسته است نشست کلی زمین را در مقایسه با حالت لایه‌های کاملاً زهکشی شده (که تنها تحکیم رخ می‌دهد) تا ۶۶٪ کاهش دهد ([Bakr، ۲۰۱۵](#)). این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان فرآیندهای تحکیم و خزش در مطالعات فرونشست زمین تأکید می‌کنند و نشان می‌دهند که مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی و در نظر گرفتن این عوامل می‌تواند به کاهش قابل توجه نشست زمین در مناطق شهری مانند جاکارتا کمک کند. دو مطالعه اخیر بینش ارزشمندی را در مورد علل و پیامدهای فرونشست زمین ارائه می‌دهند، اما

آنها در تمرکز جغرافیایی، تأکید روش شناختی، و پیامدهای سیاست‌گذاری متفاوت هستند. مطالعه موریلا بیشتر فنی است و بر پایش و ارزیابی خطر متمرکز است، درحالی‌که مطالعه جاکارتا تأکید بیشتری بر نقش مدیریت آب‌های زیرزمینی در کاهش فرونشست در یک محیط دلتای آسیب‌پذیر دارد. اما این مطالعات ماهیت جهانی فرونشست زمین و نیاز به راه‌حل‌های مناسب بر اساس زمینه‌های منطقه‌ای را برجسته می‌کنند. دینامیک طبیعی و انسانی آب‌های زیرزمینی در سفره‌های بیش از حد خشک، نقش مهمی در پدیده فرونشست ایفا می‌کند. منطقه مورد مطالعه در پژوهش [Othman و Abotalib \(۲۰۱۹\)](#)، منطقه القاسم در عربستان سعودی است که در طول دو دهه گذشته شاهد رخداد‌های متعدد تغییر شکل زمین (فرونشست زمین و شکاف‌ها) بوده است. برای شناسایی مناطق متأثر از تغییر شکل زمین و درک بهتر نقش دینامیک آب زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی در شکل‌گیری این ویژگی‌ها، یک مطالعه یکپارچه سنجش از دور و مشخصات هیدروژئولوژیک به‌کار گرفته شده است. این رویکرد مطالعاتی شامل چهار مرحله زیر است:

۱. انجام بررسی‌های میدانی برای جمع‌آوری مشاهدات و اعتبارسنجی ویژگی‌های تغییر شکل گزارش‌شده، ۲.
- استفاده از یک همبستگی فضایی در محیط GIS برای تحلیل مکان‌های آسیب‌دیده گزارش‌شده، همراه با ویژگی‌های زمین‌شناسی سطحی و زیرسطحی و داده‌های استخراج آب‌های زیرزمینی، ۳.
- استخراج نرخ‌های فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر روش SBAS و به‌کارگیری داده‌های ماهواره‌ای ENVISAT، ۴.
- ارتباط مکانی و زمانی این نرخ‌های فرونشست با داده‌های تغییرات جرمی ماهواره‌ای GRACE.

نتایج نشان می‌دهد نرخ‌های فرونشست بالای ۵ تا ۱۲ میلی‌متر در سال در امتداد جهت شمال غربی-جنوب شرقی، با مناطقی که کاهش قابل توجه سطح آب‌های زیرزمینی فسیلی (تا ۱۵۰ متر) و کاهش نرخ تغییرات جرمی (1.2 ± 1.0 میلی‌متر آب در سال) را تجربه کرده‌اند، تطابق دارد. یافته‌های این مطالعه توجه را به دینامیک آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی در شرایط بیش از حد خشک جلب می‌کند ([Othman و Abotalib، ۲۰۱۹](#)).

[Nguyen و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) نشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی در ویتنام را بررسی کردند. آنها از ۱۲ سال داده سری زمانی InSAR و ۲۲ سال داده پیرومتریک استفاده کرده تا تکامل مکانی و زمانی فرونشست زمین و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در هانوی را ردیابی کنند. نتایج نشان می‌دهد فرونشست در مرکز هانوی کاهش یافته است، درحالی‌که مناطق حومه‌ای جنوبی و غربی (ها دونگ و منطقه هوآی دوک) در سال‌های اخیر به کانون‌های جدید فرونشست تبدیل شده‌اند. حداکثر نرخ فرونشست در این مناطق به ۵۰ میلی‌متر در سال می‌رسد و حداکثر نشست

تجمعی می‌تواند تا ۵۰۰ میلی‌متر باشد و حداکثر کاهش ذخیره آب زیرزمینی در طول ۲۲ سال حدود ۲۳ متر بوده است. یکی از یافته‌های جالب این مطالعه این است که مشکل فرونشست در هانوی در مقایسه با سایر شهرهای جنوب شرق آسیا نسبتاً خفیف است. این مقاومت در برابر فرونشست ممکن است ناشی از ضریب تحکیم کوچکتر و مهمتر از آن، فشار کمتر به منابع آبی و در نتیجه تقاضای کمتر برای آب زیرزمینی باشد.

مطالعه [Nguyen و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) نشان می‌دهد در مواردی که داده‌های زمین‌یابی مطمئن در دسترس نیستند، سری‌های زمانی فرونشست حاصل از ادغام داده‌های مختلف راداری (SAR) می‌توانند به همان اندازه دقیق و مفید باشند. این روش به‌ویژه برای تعیین ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی حوضه‌های آب‌زیرزمینی کاربرد دارد. علاوه‌براین در مواجهه با پدیده تأخیر هیدرودینامیکی، داده‌های تغییر شکل با دوره‌های زمانی طولانی‌تر، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از فرونشست‌های آینده ارائه می‌دهند. چالش اصلی در تولید یک سری زمانی طولانی مدت تغییر شکل با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، نیاز به تطبیق ویژگی‌های داده‌های مختلف از هر SAR است. این تطبیق برای به‌حداکثر رساندن دقت تشخیص و پوشش فضایی ضروری است. در این مطالعه، نمونه‌ای از تنظیم تکنیک‌های پردازش داده‌ها ارائه شده است که به دستیابی به اهداف علمی نهایی کمک می‌کند ([Nguyen و همکاران، ۲۰۲۲](#)). این یافته‌ها نشان می‌دهند که ادغام داده‌های چند SAR و استفاده از روش‌های پردازشی پیشرفته می‌تواند ابزار قدرتمندی برای پایش و پیش‌بینی فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود، فراهم کند.

[Wang و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) شهرستان دچنگ در استان شان‌دونگ چین به عنوان منطقه هدف تحقیق انتخاب شد. با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه (BPNN) و روش جنگل تصادفی (RF)، تحلیل و پیش‌بینی فرونشست زمین منطقه‌ای با به‌کارگیری داده‌های پایش چند منبعی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شده است. تأثیر سطوح مختلف آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین به‌صورت کمی با استفاده از الگوریتم‌های BPNN و RF بررسی شده است. همچنین، یک مدل پیش‌بینی برای فرونشست زمین در این منطقه توسعه داده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد فرونشست زمین در منطقه تحقیقاتی عمدتاً تحت تأثیر آب‌های زیرزمینی عمیق و کم‌عمق است. همچنین این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های پیشرفته مانند SBAS-InSAR، GIS و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند ابزارهای مؤثری برای تحلیل و پیش‌بینی فرونشست زمین فراهم کند ([Wang و همکاران، ۲۰۱۹](#)).

مقاله مروری [Wang و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) بر فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی در شهر شیان، چین ارائه می‌کند. با رشد جمعیت و توسعه اقتصادی در طول فرآیند شهرنشینی و به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی شیان با خطرات جدی ناشی از فرونشست زمین مواجه شده است. براساس سوابق گذشته، توسعه فرونشست زمین در شیان را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد: ۱. مرحله مقدماتی (۱۹۵۹ تا ۱۹۷۱): آغاز فرونشست زمین، ۲. مرحله توسعه سریع (۱۹۷۲ تا ۱۹۹۰): افزایش قابل توجه نرخ فرونشست و ۳. مرحله توسعه آهسته (۱۹۹۱ تا زمان مطالعه): کاهش نسبی نرخ فرونشست. در دهه ۱۹۹۰، حجم برداشت سالانه آب‌های زیرزمینی در این منطقه به حداکثر مقدار خود، یعنی حدود $10^6 \times 1388$ مترمکعب در سال رسید و نرخ فرونشست زمین نیز به اوج خود (حدود ۱۳۰ میلی‌متر در سال) افزایش یافت. با اعلام سیاست کنترل برداشت آب‌های زیرزمینی توسط شهرداری شیان در سال ۱۹۹۶، نرخ فرونشست زمین روند نزولی معناداری را نشان داد.

[Wang و همکاران \(۲۰۱۹\)](#) در این مطالعه ضمن پرداختن به روش‌های مختلف برای پیش‌بینی فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی، شامل ۱- رویکردهای ریاضی-آمار، ۲- رویکردهای عددی و ۳- رویکردهای هوش مصنوعی و بررسی مزایا و معایب این رویکردها، سه حوزه تحقیقاتی جدید در مورد فرونشست زمین در شیان را نیز بررسی کردند. این تحقیقات بر اهداف زیر متمرکز بودند: ۱. تجزیه و تحلیل رابطه بین فرونشست و شکاف‌های زمین، ۲. جستجوی تکنیک‌های نظارتی برای جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و ۳. بررسی اثر خرد شدن ذرات ماسه تحت تنش‌های بالا بر توسعه فرونشست زمین. این مطالعه نشان داد که درک بهتر فرونشست زمین و عوامل مؤثر بر آن، به ویژه در مناطق شهری دارای رشد و گسترش سریع، برای مدیریت پایدار منابع و برنامه‌ریزی شهری ضروری است ([Wang و همکاران، ۲۰۱۹](#)).

تمامی این مقالات به‌طور مشترک نشان می‌دهند که برداشت منابع زیرزمینی و کاهش فشار در آبخوان نقش کلیدی در فرونشست زمین دارد. رابطه فشار و نشست در بیشتر این مقالات به‌طور خطی بیان شده است، اما در برخی موارد [Song و Li \(۲۰۲۰\)](#) مشاهده شد نشست پس از رسیدن به یک نقطه بحرانی، به صورت نمایی افزایش می‌یابد. این تحقیقات تأکید دارند که کنترل برداشت منابع زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق صنعتی و کشاورزی، ضروری است تا از نشست‌های شدید و غیرقابل بازگشت جلوگیری شود.

۳- مطالعات عددی

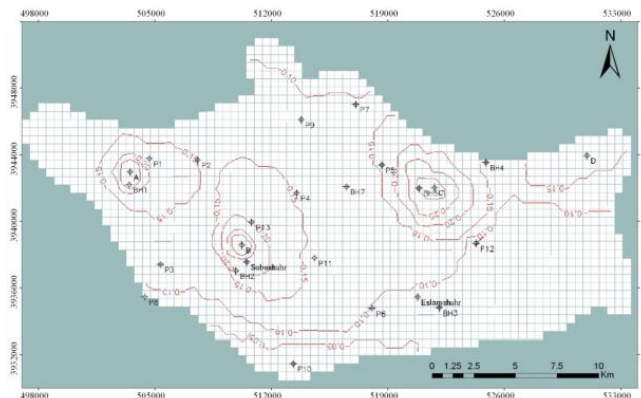
شبیه‌سازی‌های عددی به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های

زیرزمینی در مناطق مختلف استفاده شده‌اند. این مطالعات اهمیت درک مکانیسم‌های فرونشست از طریق مدل‌سازی عددی را برجسته کرده و مشخص می‌کند چگونه استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی بر تراکم و تغییر شکل خاک تأثیر می‌گذارد. از سوی دیگر مطالعات عددی می‌تواند نقش تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی را به‌عنوان یک راه‌حل بالقوه برای کنترل فرونشست زمین شبیه‌سازی نماید و اثربخشی آن در افزایش سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش فرونشست بیشتر مشخص کند (Wu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Yung و Yu، ۲۰۱۵).

مدل‌سازی عددی با استفاده از روش‌های مختلفی مانند روش المان محدود و تفاضل محدود، قابلیت شبیه‌سازی دقیق پدیده‌های پیچیده را دارد. این روش‌ها به پژوهشگران اجازه می‌دهند تا تأثیرات غیرخطی استخراج آب‌های زیرزمینی را بر روی فرونشست زمین تحلیل کنند و نتایج حاصل از این مدل‌ها می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه منابع آب زیرزمینی کمک کند (Feng و Zu، ۲۰۱۱). مدل‌های جریان آب‌های زیرزمینی با پیش‌بینی تغییرات سطح آب و فشار آبخوان‌ها برای تخمین فرونشست زمین استفاده می‌شوند (Li و همکاران، ۲۰۲۵). استفاده از روش‌های المان محدود در مطالعات موردی همانند مطالعه دشت رفسنجان و مدل‌سازی عددی فرونشست زمین مرتبط با برداشت آب‌های زیرزمینی در مناطقی مانند حوضه فلورانس-پراتو-پستویا در مرکز ایتالیا با موفقیت برای شبیه‌سازی الگوهای فرونشست به‌کار گرفته شده است. این مطالعات به‌طور کلی تأکید می‌کنند که شبیه‌سازی‌های عددی ابزارهای ضروری برای درک و کاهش فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی هستند. با ادغام داده‌های تجربی با تکنیک‌های پیشرفته مدل‌سازی، پژوهشگران می‌توانند استراتژی‌های مؤثری برای مدیریت پایدار منابع آب توسعه دهند که از آسیب‌های بلند مدت محیط‌زیستی جلوگیری کرده و در عین حال دسترسی به منابع را برای نسل‌های آینده تضمین کند (Feng و Zu، ۲۰۱۱؛ Li و همکاران، ۲۰۲۵؛ Wu و همکاران، ۲۰۰۹؛ Yung و Yu، ۲۰۱۵). به عنوان مثال Rajabi (۲۰۱۸) با استفاده از مدل عددی PLAXIS و در نظر گرفتن تغییرات فشار آبخوان، داده‌های هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی، فرونشست زمین در برخی نقاط فلات قم، به‌ویژه دشت علی‌آباد، را ارزیابی نمود. نتایج این مطالعه نشان داد از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳، میانگین کاهش سطح آب زیرزمینی ۳۵/۲۶ متر و فرونشست مربوط به آن در مناطق مختلف دشت بین ۰ تا ۷۶ سانتی‌متر بوده است. همچنین آنها بیان کردند که فرونشست زمین به ویژگی‌های مصالح زمین‌شناسی بستگی داشته و درک رفتار واحدهای زمین‌شناسی مختلف و تأثیر آنها بر فرونشست زمین برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش خطرات ناشی از این پدیده ضروری است (Rajabi، ۲۰۱۸). در مطالعه‌ای Lin و Song (۲۰۲۰) یک

رویکرد نوآورانه برای بررسی فرونشست زمین ارائه شده است. در این روش، توزیع‌های تصادفی رخساره‌های آبی (ساختارهای زمین‌شناسی مرتبط با آب) با استفاده از شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به روش المان محدود سه‌بعدی و شبیه‌سازی ژئومکانیکی ترکیب شده‌اند. این رویکرد یکپارچه در قالب یک چارچوب آماری برای تحلیل فرونشست زمین و حرکات افقی ناشی از برداشت آب زیرزمینی به‌کار گرفته شده است. این روش در دشت آبرفتی Chaobai در چین، منطقه‌ای به وسعت حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع که شامل چاه‌های اصلی تأمین‌کننده آب پکن است، اعمال شد. از دهه ۱۹۶۰، پمپاژ بی‌رویه آب زیرزمینی در این منطقه باعث فرونشست بیش از ۱ متر و نرخ فرونشست تا ۷۰ میلی‌متر در سال شده است. در این پژوهش، از شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۱۰۰ نسل از رخساره‌های آبی استفاده شد تا تأثیر ساختار ناهمگن این رخساره‌ها بر میدان‌های جابه‌جایی زمین بررسی شود. نتایج مدل نشان داد ساختار ناهمگن رخساره‌های آبی در مخروط افکنه‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر الگوهای فرونشست زمین دارد. برای اعتبارسنجی این نتایج، فرونشست زمین با استفاده از تداخل‌سنجی پراکنده مداوم (InSAR) نیز اندازه‌گیری شد. این مطالعه بر اهمیت درک ساختار ناهمگن رخساره‌های آبی و تأثیر آن بر فرونشست زمین تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که این درک برای مدیریت پایدار منابع آب و پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات سطح زمین ضروری است (Zhu و همکاران، ۲۰۲۰). این پژوهش راه‌حلی جامع برای تحلیل فرونشست زمین ارائه می‌دهد که می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها در زمینه مدیریت منابع آب و کاهش خطرات ناشی از فرونشست کمک کند.

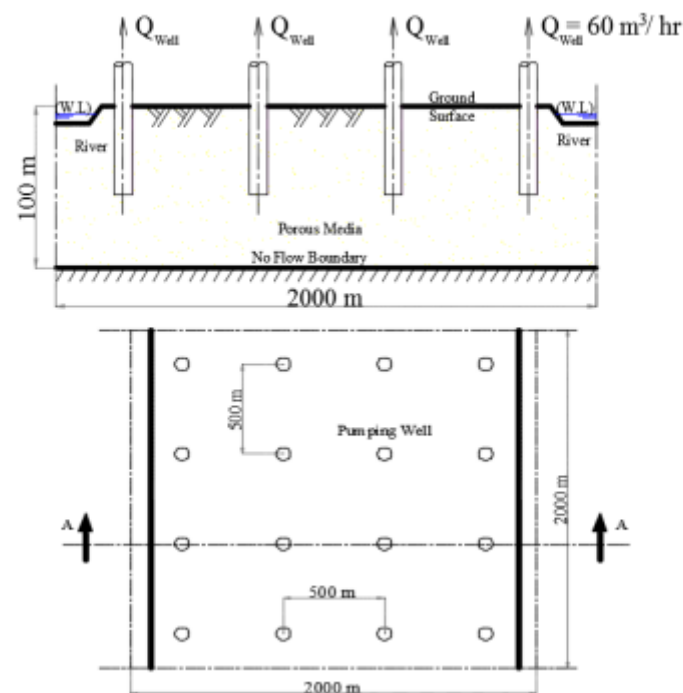
Mahmoudpour و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل‌سازی عددی، فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران را بررسی و پیش‌بینی کردند. در طول ۲۸ سال (۱۹۸۴-۲۰۱۲)، سطح آب زیرزمینی در این منطقه ۱۱/۶۵ متر کاهش یافته است. آنها برای مدل‌سازی فرونشست از نرم‌افزار PMWIN (نسخه ویندوزی MODFLOW) استفاده نمودند. مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های هد هیدرولیک و داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) کالیبره شد به‌طوری‌که پارامترهای هیدروژئولوژیکی مدل به‌صورت تکرارشونده تنظیم شد تا اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده به حداقل برسد. آنها مشاهده کردند که نتایج شبیه‌سازی تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده واقعی دارند. همچنین پس از کالیبره‌سازی و ارزیابی مدل، آنها از این مدل برای پیش‌بینی فرونشست زمین تا پایان سال ۲۰۱۸ استفاده کردند. نتایج عددی نشان داد با فرض ثابت ماندن نرخ پمپاژ در آینده، فرونشست زمین در دشت جنوب غربی تهران تا سال ۲۰۱۸ به ۳۳ سانتی‌متر خواهد رسید (شکل ۳) (Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۳- مدل سازی و پیش بینی فرونشست زمین ناشی از برداشت آب های زیرزمینی در دشت جنوب غربی تهران با استفاده از MODFLOW و داده های InSAR. (Mahmoudpour و همکاران، ۱۳۹۸، ۷۷، Environmental Earth Sciences).

جریان آب زیرزمینی با استفاده از حل تحلیلی مبتنی بر نظریه ترزاقی برای محاسبه تراکم سیستم آبخوان شبیه سازی شده است (شکل ۴).

Elhamid و همکاران (۲۰۲۲) از مدل MODFLOW برای ارزیابی تأثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی و پارامترهای آبخوان، از جمله ضریب هدایت هیدرولیکی و ذخیره سازی ویژه، بر روی فرونشست زمین استفاده شد. در این مطالعه،



شکل ۴- پلان و مقطع مطالعه موردی (Elhamid و همکاران، ۲۰۲۲)

فرونشست زمین ندارد. در این مطالعه، رابطه بین فرونشست زمین با نرخ برداشت آب (Q)، هدایت هیدرولیکی (K)، و ذخیره سازی ویژه (Ss) توسعه یافته که می تواند برای پیش بینی فرونشست زمین باتوجه به تغییرات آینده استفاده شود (Elhamid و همکاران، ۲۰۲۲).

نتایج نشان می دهد افزایش نرخ پمپاژ باعث افزایش فرونشست زمین می شود. با این حال، تغییر در خواص آبخوان اثرات متفاوتی دارد: کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی هم کاهش سطح آب زیرزمینی و هم فرونشست زمین را افزایش می دهد، درحالی که کاهش ذخیره سازی ویژه تنها باعث افزایش فرونشست زمین می شود و تأثیری بر کاهش سطح آب زیرزمینی ندارد. از سوی دیگر، تغییر تخلخل هیچ تأثیری بر کاهش سطح آب زیرزمینی یا

۴- معایب و مزایای روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی

روش‌های آزمایشگاهی

مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی محیطی کنترل شده فراهم می‌کند که در آن متغیرهایی مانند بار اعمالی، فشار منفذی، میزان رطوبت و شرایط مرزی را می‌توان با دقت تنظیم کرد. این امکان را به پژوهشگران می‌دهد تا رفتار خاک را تحت مسیرهای تنش خاص، افت سطح آب زیرزمینی و شرایط بارگذاری به طور مستقیم مشاهده و اندازه‌گیری کنند و داده‌هایی بسیار دقیق و قابل تکرار به دست آورند که برای درک مکانیک تحکیم و نشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی ضروری است (Ireland و Poland, ۱۹۸۸).

از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی، پارامترهای کلیدی خاک مانند فشار پیش‌تحکیم، شاخص‌های تراکم‌پذیری و رفتار تغییر تدریجی تحت شرایط مختلف تنش مؤثر با دقت شناسایی می‌شوند و بینش‌های تجربی ارزشمندی ارائه می‌دهند که اغلب در شرایط میدانی به‌سختی قابل دستیابی است. این مشاهدات به‌ویژه در تعیین تراکم‌پذیری و نفوذپذیری خاک‌های ریزدانه اهمیت دارند، زیرا این ویژگی‌ها به طور قابل توجهی بر نرخ و میزان فرونشست در شرایط افت سطح آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند.

با این حال روش‌های آزمایشگاهی ذاتاً با محدودیت مقیاس مواجه‌اند. آزمایش‌ها روی نمونه‌ها یا مدل‌های کوچک انجام می‌شوند که نمی‌توانند به طور کامل پیچیدگی چینه‌بندی، ناهمگنی و شرایط مرزی محیط واقعی را بازسازی کنند، به‌ویژه در مناطقی با سیستم‌های لایه‌ای آبرفت-آکیتارد یا ساختارهای زمین‌شناسی متغیر (Ireland و Poland, ۱۹۸۸). این محدودیت ممکن است هنگام تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مقیاس میدانی منجر به اختلاف شود.

علاوه‌براین آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توانند پرهزینه و زمان‌بر باشند. آزمایش‌های بلندمدت، مانند شبیه‌سازی تحکیم آهسته در لایه‌های رسی با نفوذپذیری پایین تحت شرایط افت پایدار سطح آب، ممکن است ماه‌ها یا حتی سال‌ها طول بکشند تا پدیده‌های فشرده‌گی و نشست ثانویه را به درستی ثبت کنند (Song و Li, ۲۰۲۰). نیاز به تجهیزات تخصصی، پایش دقیق و کنترل محیطی پایدار نیز پیچیدگی عملیاتی و هزینه را افزایش می‌دهد.

مدل‌سازی عددی

مدل‌های عددی، به‌ویژه روش اجزای محدود (FEM)، ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی رفتار خاک‌ها در سناریوهای پیچیده، بزرگ مقیاس و بلندمدت هستند که بازآفرینی آن‌ها در محیط آزمایشگاهی ممکن نیست. این مدل‌ها امکان تحلیل فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی تحت شرایط هیدروژئولوژیکی مختلف، پروفیل‌های خاک ناهمگن و تاریخچه‌های بارگذاری متفاوت

را فراهم می‌کنند و بینش‌هایی درباره الگوهای مکانی و زمانی تغییر شکل زمین در مناطق مورد مطالعه ارائه می‌دهند. مدل‌سازی عددی امکان تحلیل سناریوهای مختلف را فراهم می‌کند و پژوهشگران می‌توانند اثر نرخ‌های مختلف برداشت، طرح‌های تغذیه مصنوعی یا بارهای سازه‌ای را بر فرونشست ارزیابی کنند. همچنین، این مدل‌ها امکان کوپل فرآیندهای هیدرو-مکانیکی را فراهم می‌کنند، به‌طوری‌که تغییرات توزیع فشار منفذی در سفره‌های آب به طور پویا با تغییر شکل خاک مرتبط می‌شود و درک جامعی از مکانیزم‌های فرونشست در شرایط میدانی به دست می‌دهد.

با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی مدل‌های عددی، وابستگی زیاد آن‌ها به داده‌های ورودی و کالیبراسیون دقیق است (Rajabi, ۲۰۱۸؛ Elhamid و همکاران, ۲۰۲۲ و Mahmoudpour و همکاران, ۲۰۱۸). اعتبار پیش‌بینی‌های عددی به کیفیت کالیبراسیون با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و میدانی، از جمله ویژگی‌های خاک، سطح آب زیرزمینی و داده‌های مشاهده شده فرونشست بستگی دارد. کالیبراسیون ناکافی یا نادرست می‌تواند منجر به اختلاف قابل توجه بین پیش‌بینی مدل و رفتار واقعی میدان شود.

علاوه‌براین مدل‌های عددی برای امکان‌پذیری محاسباتی نیازمند فرضیات ساده‌کننده هستند، مانند فرض همگن و همسان بودن رفتار خاک یا قوانین رفتاری خطی-الاستیک یا الاستوپلاستیک، که ممکن است پیچیدگی‌های خاک‌های طبیعی را به طور کامل منعکس نکند (Rajabi, ۲۰۱۸). این فرضیات می‌تواند به‌ویژه در مناطق با شرایط زیرسطحی بسیار ناهمگن یا ناهمسان، عدم قطعیت‌هایی ایجاد کند.

نشست ناشی از برداشت نفت و گاز

نشست زمین ناشی از برداشت نفت و گاز یکی از مسائل مهم در میدانی هیدروکربنی است که می‌تواند باعث آسیب به تجهیزات سطحی، خطوط لوله و تأسیسات صنعتی شود. برداشت نفت و گاز از مخازن زیرزمینی موجب کاهش فشار درون مخزن شده و تعادل تنش‌ها را به هم می‌زند، که این موضوع باعث تراکم و نشست در لایه‌های مخزنی و لایه‌های بالایی می‌شود (Galloway و همکاران, ۱۹۹۸).

روش‌های آزمایشگاهی در این زمینه به بررسی تراکم‌پذیری سنگ‌های مخزنی و رفتار خزش و تحکیم در شرایط کاهش فشار مخزن می‌پردازند. این آزمایش‌ها امکان شبیه‌سازی شرایط فشار بالا و بررسی تغییرات حجم و تراکم سنگ‌های مخزن در طول زمان را فراهم می‌کنند. با این حال شبیه‌سازی دقیق شرایط فشار و دما در عمق زیاد و طولانی مدت بودن آزمایش‌ها، از چالش‌های این روش است.

مدل‌سازی عددی به عنوان ابزار اصلی در تحلیل نشست ناشی از برداشت نفت و گاز، امکان ارزیابی اثرات مختلف برداشت بر نشست سطح زمین را فراهم می‌کند. این مدل‌ها

با ترکیب داده‌های برداشت، فشار مخزن، خصوصیات مکانیکی سنگ و داده‌های زمین‌لرزه‌ای، امکان شبیه‌سازی نشست در میدان‌های نفتی و گازی و تحلیل سناریوهای مختلف بهره‌برداری را فراهم می‌نمایند. با این حال نیاز به داده‌های دقیق از فشار مخزن، خصوصیات سنگ و شرایط مرزی دقیق برای کالیبراسیون از چالش‌های اصلی در این زمینه است (Galloway و همکاران، ۱۹۹۸).

رویکرد یکپارچه برای افزایش قابلیت اطمینان

در مجموع، روش‌های آزمایشگاهی مزیت مشاهده مستقیم و دقت بالای اندازه‌گیری در شرایط کنترل‌شده را دارند اما با محدودیت‌هایی مانند مقیاس، هزینه و زمان مواجه‌اند؛ درحالی‌که مدل‌های عددی امکان شبیه‌سازی سناریوهای پیچیده و بزرگ مقیاس را فراهم می‌کنند اما به داده‌های کالیبراسیون باکیفیت و فرضیات ساده‌کننده وابسته‌اند.

برای رفع این محدودیت‌ها، رویکردی یکپارچه که آزمایش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی را ترکیب کند توصیه می‌شود. آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توانند پارامترهای لازم و بینش‌های رفتاری مورد نیاز برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های عددی را فراهم کنند و شبیه‌سازی‌های عددی نیز می‌توانند یافته‌های آزمایشگاهی را به سناریوهای واقعی، بزرگ مقیاس و بلندمدت تعمیم دهند که برای ارزیابی و برنامه‌ریزی کاهش فرونشست منطقه‌ای اهمیت دارد.

این روش ترکیبی به پژوهشگران و متخصصان اجازه می‌دهد تا دقت و قابلیت اطمینان داده‌های آزمایشگاهی را با مقیاس‌پذیری و توان پیش‌بینی مدل‌های عددی تلفیق کنند و دقت پیش‌بینی فرونشست را افزایش داده و از مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی و راهبردهای کاهش فرونشست زمین حمایت نمایند.

۵- چالش‌ها و جهت‌گیری‌های آینده

در زمینه مدل‌سازی فرونشست زمین، هر دو روش آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی با چالش‌های متعددی مواجه هستند. مطالعات انجام شده تاکنون اطلاعات ارزشمندی درباره عوامل مؤثر بر نشست زمین و ارتباط آن با برداشت منابع زیرزمینی ارائه کرده‌اند، اما همچنان نقاط ضعف و کمبودهایی وجود دارد که نیاز به توجه در پژوهش‌های آینده دارد. در ادامه این موارد در سه بخش مجزا شامل چالش‌های اصلی، کمبودهای موجود در تحقیقات فعلی و پیشنهادهایی برای بهبود مطالعات آینده آورده شده است.

۵-۱- چالش‌های اصلی

در سال‌های گذشته مدل‌سازی فرونشست زمین با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است، اما همچنان با چالش‌هایی روبه‌رو هستند.

برخی از این چالش‌ها شامل شبیه‌سازی دقیق نشست زمین و پیش‌بینی اثرات برداشت منابع زیرزمینی است که نیاز به توجه بیشتر در پژوهش‌های آینده دارد. در ادامه، چالش‌های اصلی روش‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی آورده شده است.

۱-۵- چالش‌های روش‌های آزمایشگاهی

• مقیاس کوچک و محدودیت‌های تجربی:

مطالعات آزمایشگاهی معمولاً در مقیاس کوچک و در شرایط کنترل شده انجام می‌شوند، که تکرار شرایط پیچیده زمین‌شناسی و رفتارهای متغیر خاک در محیط واقعی را دشوار می‌کند. به‌عنوان مثال در پژوهش‌های Galloway و همکاران (۱۹۹۸)؛ Zhu و همکاران (۲۰۲۰) مشاهده شد انتقال نتایج آزمایش‌های مخزن فشار به مقیاس‌های بزرگ‌تر، به‌ویژه در مناطق شهری و صنعتی، با چالش‌هایی مواجه می‌باشد. این محدودیت باعث می‌شود که آزمایش‌های فیزیکی نتوانند فرونشست زمین در مقیاس بزرگ و همچنین در شرایط متغیر را به‌درستی شبیه‌سازی کنند.

• هزینه و زمان بر بودن:

آزمایش‌های آزمایشگاهی به‌طور قابل توجهی زمان‌بر و هزینه‌بر هستند، به‌ویژه زمانی که نیاز به شبیه‌سازی شرایط بلندمدت و فرایندهای نشست چندساله وجود دارد. برای مثال، در پژوهش Galloway و همکاران (۱۹۹۸) انجام آزمایش‌های طولانی‌مدت برای بررسی نشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی به منابع مالی و زمانی زیادی نیاز داشت. همچنین، تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت مورد نیاز برای این آزمایش‌ها، استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند.

۲-۵- چالش‌های مدل‌سازی عددی

• وابستگی به داده‌های کالیبراسیون:

مدل‌های عددی مانند روش اجزای محدود (FEM) و مدل‌های تحلیلی برای پیش‌بینی نشست زمین نیاز به داده‌های کالیبراسیون دقیق دارند. در صورت عدم وجود داده‌های آزمایشگاهی یا میدانی کافی، نتایج مدل‌های عددی ممکن است نادرست یا غیرقابل اعتماد بوده و منجر به خطاهای بسیار بزرگ شود. پژوهش‌های Yan و همکاران (۲۰۱۲) و Song و Li (۲۰۲۰) نشان دادند که در صورت عدم وجود داده‌های کافی برای کالیبراسیون، دقت پیش‌بینی‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

• فرضیات ساده‌سازی:

مدل‌های عددی اغلب از فرضیات ساده‌سازی استفاده می‌کنند که ممکن است شرایط پیچیده زمین‌شناسی را

به طور کامل منعکس نکنند. این فرضیات می تواند منجر به بروز خطاهای قابل توجهی در پیش بینی میزان فرونشست ناشی از برداشت آب های زیرزمینی شود.

• تأثیرات غیرخطی:

بسیاری از مدل های عددی برای کاهش پیچیدگی، روابط خطی بین پارامترها را در نظر می گیرند. درحالی که تأثیرات فرونشست، به ویژه در مناطق با خاک های رسی و متغیرهای مختلف مانند برداشت آب، فشار زیرزمینی، و نوع خاک، به صورت غیرخطی است. مدل های عددی ممکن است توانایی پیش بینی دقیق این تأثیرات غیرخطی را نداشته باشند و منجر به نتایج اشتباه شوند. پژوهش [Chen و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) نشان داد که مدل های هیبریدی می توانند به حل این چالش کمک کنند، اما همچنان نیاز به داده های دقیق تر وجود دارد.

۵-۲-۵- کمبودهای موجود در تحقیقات فعلی

با وجود پیشرفت های قابل توجه در درک و پیش بینی فرونشست زمین، چندین شکاف اساسی در پژوهش های فعلی وجود دارد که دقت مدل ها و اثربخشی راهبردهای کاهش را محدود می کند.

۵-۲-۱- فقدان تحلیل تعامل چندعاملی

اکثر پژوهش های موجود درباره فرونشست زمین، عوامل منفردی مانند برداشت آب زیرزمینی ([Ireland و Poland](#)) یا بارگذاری لرزه ای را ([۱۹۸۸ و Galloway و همکاران، ۱۹۹۸](#)) یا بارگذاری لرزه ای را جداگانه بررسی می کنند و تأثیر هم زمان چندین عامل مؤثر را نادیده می گیرند. در واقعیت، فرونشست معمولاً نتیجه عوامل پیچیده و وابسته به هم است که شامل موارد زیر می شود:

- نرخ ها و الگوهای برداشت آب زیرزمینی ([Chen و همکاران، ۲۰۲۰](#))
- تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تغذیه و تبخیر و تعرق
- تغییرات کاربری زمین که بر نفوذپذیری و بارهای سطحی تأثیر می گذارد
- فعالیت های لرزه ای و حرکات گسل
- تأثیرات شهرنشینی (سطوح غیرقابل نفوذ، مدیریت آب های سطحی)

برای مثال، تعامل بین نوسانات فصلی آب زیرزمینی و بارش های شدید در شرایط اقلیمی در حال تغییر می تواند نرخ فرونشست را تشدید کند، اما به ندرت به صورت سیستماتیک در چارچوب مدل سازی یکپارچه تحلیل شده است.

[Chen و همکاران \(۲۰۲۰\)](#) تأکید کردند که مطالعات آینده باید این تعاملات چندعاملی را در نظر بگیرند تا رفتار واقعی فرونشست، به ویژه در مناطق شهری شده سریع و دارای تنش آبی، به درستی مدل سازی شود.

۵-۲-۲- پوشش ناکافی داده های بلندمدت و منطقه ای

پیش بینی قابل اعتماد فرونشست زمین نیازمند داده های پایش بلندمدت در گستره ای از شرایط زمین شناسی و اقلیمی متنوع است که اغلب در مطالعات فعلی وجود ندارد. بسیاری از تحقیقات بر موارد زیر تمرکز دارند:

- پایش کوتاه مدت (۱ تا ۳ سال)
- مطالعات موردی در یک مکان خاص
- این محدودیت ها توانایی را در موارد زیر کاهش می دهد:
- ارزیابی الگوهای زمانی و رفتارهای نشست با تأخیر (مانند فشردگی ثانویه در خاک های ریزدانه)
- ارزیابی تنوع منطقه ای تحت سیستم های مختلف سفره آب
- تعمیم یافته ها برای چارچوب های مدیریت منطقه ای یا ملی

برای مثال، مطالعات در رفسنجان ([Mousavi و همکاران، ۲۰۰۱](#) و [Moafi و Rahnama، ۲۰۰۹](#)) و مشهد ([Motagh و همکاران، ۲۰۰۷](#)) دیدگاه های محلی ارزشمندی ارائه داده اند اما تنوع هیدروژئولوژیکی گسترده تر ایران را پوشش نمی دهند. نبود داده های بلندمدت و منسجم، توسعه مدل های کالیبره و اعتبارسنجی شده را که بتوانند فرونشست را در مناطق مختلف و تحت سناریوهای آینده اقلیمی و برداشت پیش بینی کنند، دشوار می سازد.

۵-۲-۳- فقدان استانداردهای یکپارچه برای مدل سازی و روش های آزمایشی

پژوهش های کنونی از رویکردهای متنوعی استفاده می کنند:

- مدل سازی عددی مختلف (روش اجزای محدود، روش تفاضل محدود، مدل های پوروالاستیک، ویسکوپلاستیک)
- روش های کالیبراسیون (داده های میدانی در مقابل داده های آزمایشگاهی)
- پروتکل های گزارش دهی نتایج و عدم قطعیت ها که این تنوع باعث دشواری در مقایسه نتایج بین مطالعات می شود ([Minderhoud و همکاران، ۲۰۱۸](#) و [Nguyen و همکاران، ۲۰۲۲](#))، به عنوان مثال تفاوت در تعریف شرایط مرزی، انتخاب پارامترهای ماده و شبکه بندی مدل های عددی می تواند به طور قابل توجهی نرخ های پیش بینی شده فرونشست را تحت تأثیر قرار دهد، اما چنین جزئیاتی به طور یکنواخت گزارش نمی شوند.

[Nguyen و همکاران \(۲۰۲۲\)](#) تأکید کردند که نبود دستورالعمل های یکپارچه باعث اختلاف در مطالعات فرونشست شده و پتانسیل انجام مرورهای سیستماتیک، متاآنالیزها و ترکیب یافته ها در سطح منطقه ای را محدود می کند. این ناهماهنگی در تدوین راهکارهای مؤثر کاهش و سازگاری، به ویژه برای سیاست گذاران که قصد اولویت بندی

مداخلات بر اساس ارزیابی ریسک را دارند، چالش برانگیز است.

۴-۲-۵- ادغام محدود روش‌های آزمایشگاهی و عددی

آزمایش‌های آزمایشگاهی بینش‌های دقیق و با دقت بالا درباره رفتار خاک تحت شرایط کنترل شده فراهم می‌کنند (Zhou و همکاران، ۲۰۲۴). اما با محدودیت‌هایی در مقیاس و بازتولید شرایط ناهمگن میدانی مواجه‌اند. از سوی دیگر، مدل‌های عددی می‌توانند سناریوهای پیچیده در مقیاس بزرگ‌تر را شبیه‌سازی کنند (Rajabi، ۲۰۱۸ و Mahmoudpour و همکاران، ۲۰۱۸) اما دقت آن‌ها به شدت به داده‌های کالیبراسیون قابل اعتماد وابسته است که اغلب به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی یا داده‌های میدانی کافی نیست.

در حال حاضر تعداد کمی، از مطالعات به صورت سیستماتیک پارامترهای کالیبره شده آزمایشگاهی را در مدل‌های عددی وارد کرده‌اند تا دقت پیش‌بینی بهبود بخشند، به‌ویژه در شرایط پیچیده شامل سفره‌های آب لایه‌ای و رفتارهای خزش وابسته به زمان بهبود بخشند.

۵-۲-۵- تحلیل ناکافی عدم قطعیت و حساسیت

بسیاری از مدل‌های فرونشست به طور کافی به موارد زیر نمی‌پردازند:

- عدم قطعیت در پارامترهای ورودی (مانند هیدرولیکی، تراکم‌پذیری، نرخ‌های تغذیه)
 - حساسیت پیش‌بینی فرونشست به تغییرات در برداشت آب زیرزمینی یا تغییرات اقلیمی
 - کمی‌سازی بازه‌های اطمینان در پیش‌بینی‌ها
- این کمبود در کمی‌سازی عدم قطعیت، اعتماد به پیش‌بینی‌های فرونشست را کاهش داده و کاربرد آن‌ها را در مدیریت ریسک عملی محدود می‌کند.

۳-۵- پیشنهادهایی برای بهبود مطالعات آینده

۱-۳-۵- توسعه مدل‌های هیبریدی

استفاده از مدل‌های هیبریدی که ترکیبی از روش‌های آزمایشگاهی و عددی هستند، می‌تواند به کاهش محدودیت‌های هر دو روش کمک کند. این مدل‌ها می‌توانند با استفاده از داده‌های دقیق‌تر و در نظر گرفتن تأثیرات غیرخطی، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند.

۲-۳-۵- ایجاد بانک‌های داده جامع

ایجاد بانک‌های داده طولانی‌مدت و گسترده جغرافیایی می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و افزایش قابلیت تعمیم نتایج کمک کند. این بانک‌های داده باید شامل اطلاعاتی از مناطق مختلف و دوره‌های زمانی طولانی‌تر باشند. در کنار بانک داده‌های جامع، وجود سامانه‌ای یکپارچه که تمام اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای تخمین و پیش‌بینی فرونشست زمین را در هر کشور با توجه به

تقسیمات سیاسی فراهم کند بسیار موثر می‌باشد. در این سامانه تمام دستگاه‌ها و سازمان‌های مسئول اطلاعات و داده‌هایی که براساس وظایف سازمانی خود تهیه می‌کنند در آن سامانه در اختیار مسئولین ذی‌ربط قرار می‌دهند. این کار ضمن کاهش زمان و هزینه، سبب یکپارچگی در مطالعات می‌شود.

۳-۳-۵- توسعه استانداردهای یکپارچه

ایجاد استانداردهای یکپارچه برای مدل‌سازی و آزمایش‌های فرونشست می‌تواند مقایسه نتایج مطالعات مختلف را تسهیل کند. این استانداردها باید شامل روش‌های مشترک برای جمع‌آوری داده‌ها، کالیبراسیون مدل‌ها و گزارش نتایج باشند.

۴-۳-۵- توجه به تعاملات چندعاملی

در مطالعات آینده، باید به تعاملات چندعاملی مانند تغییرات اقلیمی، تغییرات ژئوتکنیکی، مشخصات ژئوهیدرولوژی، زمین‌شناسی، توپوگرافی، زمین‌لرزه‌ها، گسل‌ها، موقعیت چاه‌ها و میزان برداشت آن‌ها، پوشش گیاهی، مصارف آب شرب، کشاورزی، صنعتی، تغییرات فشار آب زیرزمینی و تغییر کاربری زمین و سایر عوامل موثر توجه بیشتری شود. این رویکرد می‌تواند به درک بهتر عوامل مؤثر بر فرونشست زمین و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کرده و از طرف دیگر برای مدیریت بحران فرونشست و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی موثر واقع شود.

باتوجه به این چالش‌ها و کمبودها، پژوهش‌های آینده باید بر توسعه روش‌های نوین، بهبود دقت داده‌ها و ایجاد استانداردهای یکپارچه تمرکز کنند تا بتوانند به شبیه‌سازی دقیق‌تر و پیش‌بینی مؤثرتر فرونشست زمین دست یابند.

نتیجه‌گیری

کاهش سطح آب‌های زیرزمینی بر اثر برداشت بی‌رویه، تغذیه ناکافی یا زهکشی‌های موضعی، یکی از مهمترین عوامل فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطق دارای خاک‌های نرم و تراکم‌پذیر است. این فرایند با افزایش تنش مؤثر و فشردگی لایه‌های زمین همراه بوده و می‌تواند به ایجاد نشست‌های قابل توجه (حتی تا ۸ متر)، آسیب جدی به زیرساخت‌های شهری، خطوط انتقال، شبکه حمل‌ونقل و ساختمان‌ها منجر شود. در سال‌های اخیر، با تسریع فرآیندهای برداشت و تغییر اقلیم، ابعاد خسارات ناشی از فرونشست در بسیاری از مناطق ایران و جهان فزونی یافته است.

روش‌های عددی و مدل‌سازی

در این مطالعه، با بهره‌گیری از روش‌های عددی پیشرفته مانند اجزای محدود (FEM)، تفاضل محدود (FDM) و مدل‌های هیدرو-ژئوتکنیک کوپل‌شده، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار خاک، افت سطح آب زیرزمینی، تحکیم و

نشست‌های تدریجی خاک فراهم شد. مدل‌سازی عددی این ظرفیت را ایجاد می‌کند که بتوان سناریوهای مختلف برداشت، تغییرات اقلیمی، ویژگی‌های لایه‌بندی خاک، رفتار غیرخطی، پدیده‌های وابسته به زمان (مانند نشست ثانویه و تغییر شکل آهسته خاک) و اثرات هم‌زمان چند عامل طبیعی و انسانی را تحلیل کرد. با این وجود، باید تاکید کرد که اعتبار و خروجی مدل‌ها به شدت به کیفیت داده‌های ورودی (ویژگی‌های ژئوتکنیکی، نتایج آزمایشگاهی، داده‌های صحرایی و برداشت‌های میدانی از سطح آبخوان‌ها) وابسته است. در بسیاری از موارد، محدودیت داده‌های میدانی، عدم یکنواختی نتایج آزمایشگاهی و نبود استانداردهای یکپارچه برای تفسیر و کالیبراسیون، دقت پیش‌بینی و کارایی مدل‌ها را کاهش می‌دهد.

از سوی دیگر، روش‌های مدل‌سازی فیزیکی (مدل‌های آزمایشگاهی و پیلوت‌های صحرایی)، امکان مشاهده مستقیم پاسخ خاک را تحت سناریوهای کنترل‌شده فراهم می‌کنند و به تحلیل مکانیسم‌های پایه‌ای نشست و تحکیم کمک شایانی می‌نمایند. هرچند، مقیاس‌پذیری محدود، هزینه بالا و دشواری بازتولید ناهمگنی‌های طبیعی از جمله نقاط ضعف این روش‌هاست.

ترکیب روش‌های عددی و مدل‌سازی (مدل‌های هیبریدی یا یکپارچه)

پیشنهاد می‌شود برای فائق آمدن بر نقاط ضعف هر رویکرد، از مدل‌های هیبریدی استفاده شود؛ بدین صورت که داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌های عددی به‌کار روند. همچنین، استفاده از داده‌برداری پیوسته (مانند GPS، سنجش از دور InSAR، و سامانه‌های IoT) می‌تواند به پایش دقیق‌تر فرآیند فرونشست کمک کند و امکان به‌روزرسانی و اصلاح مدل‌ها را بر مبنای واقعیت‌های جاری فراهم آورد.

روش کار پیشنهادی برای مطالعات آینده

۱. جمع‌آوری داده‌های جام: تلفیق داده‌های تاریخی سطح آب زیرزمینی، داده‌های ژئوتکنیکی، نتایج آزمایشگاهی خاک، داده‌های GPS و InSAR، و ثبت برداشت آب از چاه‌ها.
۲. انجام مدل‌سازی عددی پیشرفته: استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند PLAXIS، FLAC و MODFLOW جهت تحلیل تأثیر پارامترهای مختلف و سناریوهای مدیریتی.
۳. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل‌ها: با تکیه بر داده‌های مشاهداتی و آزمایشگاهی، مدل‌ها باید به‌طور مکرر اعتبارسنجی شده و تطابق نتایج پیش‌بینی با رفتار واقعی زمین سنجیده شود.

۴. تحلیل عدم قطعیت و حساسیت: بررسی تأثیر تغییرات پارامترها بر خروجی مدل و تعیین مهم‌ترین ورودی‌های مؤثر بر فرونشست.

۵. ارائه راهکارهای مدیریتی و سیاستی: بر اساس نتایج مدل‌ها و تحلیل‌ها، تدوین دستورالعمل‌های اجرایی، سناریوهای پایش و راهبردهای بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع آب.

جمع‌بندی کاربردی

باتوجه به پیچیدگی‌های سیستم‌های هیدروژئولوژیک و اثرات چندعاملی بر فرونشست، آینده مدیریت منابع آب زیرزمینی در گرو توسعه مدل‌های یکپارچه، پایش مداوم، تقویت بانک‌های داده ملی و تقویت همکاری بین نهادهای پژوهشی، اجرایی و سیاست‌گذار است. ارتقای آموزش عمومی و اطلاع‌رسانی در خصوص پیامدهای فرونشست نیز می‌تواند نقش چشمگیری در کاهش ریسک و خسارات ناشی از این پدیده داشته باشد.

منابع

سرباز، حسین، آقامیری، محمد. (۱۴۰۲). سیاست‌گذاری و مدیریت فرابخشی حل معضل پدیده فرونشست در ایران، پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. [http://epprjournal.ir/article-1-1118-۱۴۷-۱۰۶-\(۲\).۹.html](http://epprjournal.ir/article-1-1118-۱۴۷-۱۰۶-(۲).۹.html).

لشکری‌پور، غلامرضا، رستمی بارانی، حمیدرضا. کهن‌دل، اصغر، ترشیزی، حسین. (۱۳۸۵). افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت کاشمر. دهمین کنفرانس انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. <https://civilica.com/doc/28612>.

لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد، کاظمی گلیان، رمضان، دم‌شناس، مهدی. (۱۳۸۶). افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت نیشابور. پنجمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، تهران، ایران. <https://civilica.com/doc/34249>.

لشکری‌پور، غلامرضا، غفوری، محمد. (۱۳۸۹). فرونشست دشت مهبیار جنوبی و تأثیر شکاف‌های ناشی از آن بر مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی. پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط‌زیست. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران. <https://civilica.com/doc/102065>.

Abidin, H. Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D., & Gamal, M. (2008). Land subsidence characteristics of Jakarta between 1997 and 2005, as estimated using GPS surveys. *Journal of Geodesy*, 82(8), 543–556. doi:[10.1023/A:1011144602064].

Abd-Elhamid, H. F., Abd-Elkader, B. S., & Wahed, O. (2022). Assessment of changing the abstraction and recharge rates on land subsidence in the Nile Delta, Egypt. *Water*, 14(7), 1103. doi:[10.3390/w14071096].

- 1962–2030. *Applied Geography*, 122, 102247. doi: [[10.1016/j.apgeog.2020.102247](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102247)].
- Li, H., Guo, Z., Chen, K., Zhan, Y., Wang, Y., Ding, C., Lu, C., & Zheng, C. (2025). Modeling land subsidence under future water stress: The influence of groundwater exploitation, climate change, and inter-basin water diversion. doi: [[10.1029/2025WR041105](https://doi.org/10.1029/2025WR041105)].
- Lixin, Y., Fang, Z., He, X., Shijie, C., Wei, W., & Qiang, Y. (2011). Land subsidence in Tianjin, China. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1151–1161. doi: [[10.1007/s12665-010-0604-5](https://doi.org/10.1007/s12665-010-0604-5)].
- López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1–15. doi: [[10.1016/j.jappgeo.2009.02.006](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.006)].
- Minderhoud, P. S. J., Coumou, L., Erban, L. E., Middelkoop, H., Stouthamer, E., & Addink, E. (2018). The relation between land use and subsidence in the Vietnamese Mekong delta. *Science of the Total Environment*, 634, 715–726. doi: [[10.1016/j.scitotenv.2018.03.372](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.372)] Get rights and content
- Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R., Saroli, M., Russo, G., & Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology*, 167, 59–71. doi: [[10.1016/j.enggeo.2013.10.014](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.014)].
- Motagh, M., Djamour, Y., Walter, T. R., Wetzel, H. U., Zschau, J., & Arabi, S. (2007). Land subsidence in Mashhad Valley, northeast Iran: Results from InSAR, levelling and GPS. *Geophysical Journal International*, 168(2), 518–526. doi: [[0.1111/j.1365-246X.2006.03246.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03246.x)].
- Mahmoudpour, M., Hosseini, S. A., & Nazari Samani, A. A. (2018). Numerical modeling and prediction of land subsidence induced by groundwater withdrawal in the southwestern Tehran Plain using MODFLOW and InSAR data. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 18(46), 1–18. doi: [[10.1016/j.enggeo.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.004)].
- Mousavi, S. M., Shamsai, A., El Naggar, M. H., & Khamsehchiyan, M. (2001). A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 452–464. doi: [[10.1139/cjce-28-3-452](https://doi.org/10.1139/cjce-28-3-452)].
- Ng, A. H. M., Ge, L., Li, X., & Zhang, K. (2012). Monitoring ground deformation in Beijing, China with persistent scatterer SAR interferometry. *Journal of Geodesy*, 86, 375–392. doi: [[10.1007/s00190-011-0525-4](https://doi.org/10.1007/s00190-011-0525-4)].
- Nguyen, M., Lin, Y. N., Tran, Q. C., Ni, C. F., Chan, Y. C., Tseng, K. H., & Chang, C. P. (2022). Assessment of long-term ground subsidence and groundwater depletion in Hanoi, Vietnam. *Engineering Geology*, 299, 106555. doi: [[10.1016/j.enggeo.2022.106555](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106555)].
- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), 1–12. doi: [[10.1016/j.jag.2010.05.009](https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009)].
- Othman, A., & Abotalib, A. Z. (2019). Land subsidence triggered by groundwater withdrawal under hyper-arid conditions: case study from Central Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 78(7), 243. doi: [[10.1007/s12665-019-8254-8](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8254-8)].
- Phien-wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P. (2006). Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineering*
- Bakr, M. (2015). Influence of groundwater management on land subsidence in deltas: A case study of Jakarta (Indonesia). *Water Resources Management*, 29(5), 1541–1555. doi: [[10.1007/s11269-014-0893-7](https://doi.org/10.1007/s11269-014-0893-7)].
- Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H. Z., & Hong, S. H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150–161. doi: [[10.1016/j.rse.2012.10.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.015)].
- Cao, Y., Wei, Y.-n., Fan, W., Peng, M., & Bao, L. (2020). Experimental study of land subsidence in response to groundwater withdrawal and recharge in Changping District of Beijing. *PLOS ONE*, 15(5), e0232828. doi: [[10.1371/journal.pone.0232828](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232828)].
- Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Li, X., Zhou, C., Lei, K., Zhu, L., Duan, L., & Zhao, X. (2020). Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China. *Science of The Total Environment*, 735, 139111. doi: [[10.1016/j.scitotenv.2020.139111](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139111)].
- Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C., & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146–161. doi: [[10.1016/j.rse.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.005)].
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., & Rosen, P. A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34(10), 2573–2585. doi: [[10.1029/98WR01285](https://doi.org/10.1029/98WR01285)].
- Gabrysch, R. K. (1974). Land-surface subsidence in the Houston, Texas. U.S. Galveston region. Geological Survey Water-Supply Paper 2198. Galveston, Houston, Texas, United States. Link [<https://pubs.usgs.gov/of/1974/0123/report.pdf>]. <https://doi.org/10.3133/ofr74123>.
- Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1182. Link [https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/circ1182_intr_o.pdf].
- He, G., Yan, X., Zhang, Y., Yang, T., Wu, J., Bai, Y., & Gu, D. (2020). Experimental study on the vertical deformation of soils due to groundwater withdrawal. *International Journal of Geomechanics*, 20(7), 04020076. doi: [[10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001709](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001709)].
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W. C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Yi, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36. doi: [[10.1126/science.abb8549](https://doi.org/10.1126/science.abb8549)].
- Hu, R. L., Yue, Z. Q., Wang, L. C., & Wang, S. J. (2004). Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*, 76(1–2), 65–77. doi: [[10.1016/j.enggeo.2004.06.006](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.006)].
- Khan, A. S., Khan, S. D., & Kakar, D. M. (2013). Land subsidence and declining water resources in Quetta Valley, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 70, 2719–2727. doi: [[10.1007/s12665-013-2328-9](https://doi.org/10.1007/s12665-013-2328-9)].
- Li, H., & Song, W. (2020). Pattern of spatial evolution of rural settlements in the Jizhou District of China during

- Geology, 48, 713–720. doi: [[10.1007/s00254-005-0010-6](https://doi.org/10.1007/s00254-005-0010-6)]
- Yan, Y., Doin, M. P., López-Quiroz, P., Tupin, F., Fruneau, B., Pinel, V., & Trouvé, E. (2012). Mexico City subsidence measured by InSAR time series: Joint analysis using PS and SBAS approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4), 1312–1326. doi: [[10.1109/JSTARS.2012.2191146](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2191146)]
- Zhu, L., Franceschini, A., Gong, H., Ferronato, M., Dai, Z., Ke, Y., Pan, Y., Li, X., Wang, R., & Teatini, P. (2020). The 3-D facies and geomechanical modeling of land subsidence in the Chaobai Plain, Beijing. *Water Resources Research*, 56(3), e2019WR027026. doi: [[10.1029/2019WR027026](https://doi.org/10.1029/2019WR027026)]
- Zhou, X., et al. (2024). Soil–Pipeline interaction under localized soil subsidence: Experimental investigation. *Journal of Pipeline Engineering*. [in press]. doi: [[10.1016/j.measurement.2024.116175](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116175)]
- Wu, J., Zhang, R., & Yang, J. (2009). Analysis of land subsidence caused by groundwater exploitation and artificial recharge using numerical simulation. *Hydrogeology Journal*, 17(5), 1141–1152. doi: [[10.1007/s00254-008-1419-5](https://doi.org/10.1007/s00254-008-1419-5)].
- Yu, J., & Yung, C. P. (2015). Numerical simulation of groundwater extraction and land subsidence with consideration of artificial recharge. *Environmental Earth Sciences*, 73(8), 4037–4048. doi: [[10.1007/s12205-015-0505-y](https://doi.org/10.1007/s12205-015-0505-y)].
- Zu, X., & Feng, Q. (2011). Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation using finite element and finite difference methods. *Environmental Earth Sciences*, 64(7), 1879–1891. doi: [[10.1007/s10586-022-03771-4](https://doi.org/10.1007/s10586-022-03771-4)]
- Geology, 82(4), 187–201. doi: [[DOI:10.1016/j.enggeo.2005.10.004](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004)]
- Poland, J. F., & Ireland, R. L. (1988). Land subsidence in the Santa Clara Valley, California, as of 1982. U.S. Geological Survey Professional Paper 497-F.
- Rajabi, A. M. (2018). A numerical study on land subsidence due to extensive overexploitation of groundwater in Aliabad plain, Qom–Iran. *Natural Hazards*, 93(2), 1085–1103. doi: [[10.1007/s11069-018-3448-z](https://doi.org/10.1007/s11069-018-3448-z)]
- Rahnama, M., & Moafi, H. (2009). Investigation of land subsidence due to groundwater withdraw in Rafsanjan plain using GIS software. *Arabian Journal of Geosciences*, 2(3), 241–246. doi: [[10.1007/s12517-009-0034-4](https://doi.org/10.1007/s12517-009-0034-4)]
- Shang, Y., Dang, H., Huang, S., & Zhang, G. (2021). Retracted: Experimental Study on the Settlement Properties of Silt Containing Fine Particles after Liquefaction: Case of Xiong'an New Area of China. *International Journal of Geomechanics*, 21(1), 05020007. doi: [[10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001864](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001864)]
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Cecconi, G., Rosselli, R., & Libardo, S. (2012). Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. *Physics and Chemistry of the Earth*, 40–41, 72–79. doi: [[10.1016/j.pce.2010.01.002](https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.01.002)]
- Wang, Y. Q., Wang, Z. F., & Cheng, W. C. (2019). A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2851–2863. doi: [[10.1007/s10064-018-1278-6](https://doi.org/10.1007/s10064-018-1278-6)]
- Wei, Y. N., Fan, W., & Cao, Y. (2017). Experimental study on the vertical deformation of aquifer soils under conditions of withdrawing and recharging of groundwater in Tongchuan region, China. *Hydrogeology Journal*, 25(2), 441–453. doi: [[10.1007/s10040-016-1498-4](https://doi.org/10.1007/s10040-016-1498-4)]
- Xue, Y. Q., Zhang, Y., Ye, S. J., Wu, J. C., & Li, Q. F. (2005). Land subsidence in China. *Environmental*

پی‌نوشت‌ها

- 1–FEM: Finite Element Method
2–CFD: Computational Fluid Dynamics