مروری بر پدیده فرونشست زمین و پیامدهای آن

مقاله علمی – مروری

میلاد سعادت مقام*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران ژئوتکنیک، موسسه آموزش عالی عقیق شاهین شهر، اصفهان، ایران
مهران ایران‌پور مبارکه، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد لنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: miladsaadat202@gmail.com

دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۱۵– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۳
صفحه ٤۲٤-٤۱۳

چکیده

فرونشست زمین به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که در آن سطح زمین به طور عمودی و به سمت پایین حرکت می‌کند. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی یا فعالیت‌های انسانی یا ترکیبی از هر دو باشد. هدف از پژوهش پیش رو مروری بر پدیده فرونشست زمین و پیامدهای آن است. روش تحقیق در این مطالعه مروری بوده و یافته‌ها حاکی از آن است که مهم‌ترین عامل فرونشست زمین، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و تاثیر آن در عمران است. همچنین روش‌های متعددی برای پیش‌بینی فرونشست زمین ارائه شده است که یکی از آنها استفاده از یادگیری ماشین است. یادگیری ماشین می‌تواند برای تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های بزرگ از داده‌های مختلف، از جمله تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های GPS و داده‌های ژئوفیزیکی استفاده شود. این امر می‌تواند به ایجاد مدل‌های دقیق‌تری از فرونشست زمین منجر شود که می‌توان از آنها برای پیش‌بینی بهتر این پدیده مخرب در عمران استفاده کرد. اکنون این اتفاق معضلی جهانی است که در بخش‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیشتر نمایان می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، آبخوان، پیش‌بینی، فرونشست، یادگیری ماشین

۱- مقدمه

مقوله فرونشست زمین شامل فروریزش و یا نشست به سمت پایین سطح زمین است که ممکن است بردار جابجایی افقی تا میزانی ایجاد گردد. نشست زمین از حیث مقدار و پهنای مناطق تحت تاثیر خود، به یک نقطه محدود نمی‌شود، در حالت کلی نشست زمین به دلایل گوناگونی مانند تراکم رسوبات تحت تاثیر استخراج سیالات و ذخیره‌های زیرزمینی، انحلال ساختارهای زیرسطحی و ریزش کارست، زهکشی خاک‌های از جنس رس، تغییر کاربری زمین، پایه‌گذاری سازه‌های مهندسی و همچنین دگرشکلی زمین ساختی است (بیوت، ۲۰۱۹)، این رخداد سبب ایجاد مسائل و مشکلاتی مانند تغییر ناهمسان در ارتفاعات و نیز شیب رودخانه‌ها و آبراهه‌ها و همچنین سازه‌های انتقال آب، شکستگی و یا برون آمدن لوله جدار چاه‌ها، کم شدن برگشت‌ناپذیر همه یا قسمتی از مخازن آب زیرزمینی در اثر نابودی یا کاهش تخلخل مفید در رسوبات، کم شدن بازدهی یا بوجود آمدن تخریب در سازه‌ها می‌شود. یکی از با اهمیت‌ترین عامل‌های ایجاد این رخداد فقصان سطح تزار آب زیرزمینی است. به این ترتیب ایجاد خشکسالی‌های پی در پی و مازاد برداشت‌های طولانی مدت از آبخوان می‌تواند سبب افت سطح ایستابی و بوجود آمدن فرونشست شود. عکس العمل زمین در برابر این افت سطح ایستابی می‌تواند خیلی پیچیده و دارای شرایط به خصوص باشد؛ به طوری که مدلسازی رفتاری آن به بهره‌گیری از شیوه‌های دقیق مدلسازی ریاضی و عددی نیازمند باشد (حسیه، ۲۰۱۸).

در حالت کلی می‌توان اذعان داشت در صورتی که نرخ برداشت منابع آب‌های زیرزمینی افزایش یابد؛ اما تحولات جابه‌جایی سطح زمین اندک باشد، می‌توان رفتار زمین را از نظر ژئومکانیکی الاستیک در نظر گرفت، به بیانی دیگر تغییر اشکال

برگشت‌پذیر است؛ ولی اگر این تغییر شکل زمین بالا باشد از حدود رفتار الاستیک بیرون می‌رود و تغییر شکل‌ها کاملاً برگشت‌ناپذیر می‌شوند. تعیین نرخ فرونشست که از کوپل نمودن دو ماژول مکانیک سیالات و همچنین جامدات می‌باشد بر اساس نظریه Biot Poroelasticity قابل حساب کردن می‌باشد (گیو، ۲۰۱۹). اکنون این اتفاق معضلی جهانی است که در بخش‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیشتر نمایان می‌شود. خیلی از شهرهای بزرگ دنیا که در این مناطق واقع هستند؛ به گونه‌ای با این رخداد درگیر هستند. در ایران نیز این قاعده وجود دارد، در بخش‌های شهری و نیز در دشت‌هایی که بیش از حد مجاز از آبخوان‌های آب زیرزمینی برداشت می‌شود این اتفاق دیده می‌شود. قدیمی‌ترین کارگروه فرونشست در یونسکو در سال ۱۹۰۰ میلادی ایجاد شد، پایه و اساس تحقیقات آن ارزیابی‌های تفضیلی روی ٤۲ نمونه فرونشست در پانزده کشور دنیا بوده است. از سال ۱۹٦۵ یونسکو نخستین برنامه جهانی خویش را برای سیکل آب شناختی تحت عنوان دهه جهانی آبشناسی شروع کرد که در سال‌های پس از مطالعه فرونشست‌ها به یکی از موارد اساسی آن مبدل شد. در سال ۱۹۷۵ کارگروهی در پاریس ایجاد شد، که کار آن ارزیابی رابطه این اتفاق با تغییرات آب زیرزمینی بوده است (باگالکوتی، ۲۰۲٤). همه ارزیابی‌های انجام شده در کشورهای جهان حاکی از آن است که کنترل و مدیریت مصرف آب و تغییر در الگوی مصرف آب می‌تواند باعث توقف فرونشست زمین شود. در کشور ایران ارزیابی و مطالعه فرونشست، نزدیک به ٤۰ سال پیشینه دارد، در سال‌های اول بر پایه مشاهدات محلی و بریدگی‌های جداره چاه فرونشست گزارش گردیده است. نخستین ارزیابی‌های علمی فرونشست واقع در دشت رفسنجان رخ داده است که فرونشست عظیمی بوده است (چایی، ۲۰۱٤) بعد از آن در بقیه دشت‌های ایران مانند، تهران، هشتگرد، اردکان، یزد، مشهد، اردبیل و کاشمر نیز فرونشست گزارش شد.

بر اساس تحقیقات انجام شده در اکثر فرونشست‌هایی که در کشور ایران اتفاق افتاده است، استخراج بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی با اهمیت‌ترین علت فرونشست می‌باشد. از تحقیقاتی که در این مورد انجام شده است، مدلسازی فرونشست در دشت ایذه با کمک کد ریاضی MODFLOW بوسیله رجبی و همکاران بوده است که در این تحقیق بارش سالانه حوزه در سیکل‌های آینده تحت سناریوهای گوناگون با درصدهای مختلف کاهش روبه رو بوده که به صورت کاهش تغذیه سطحی آبخوان دیده شده است. جریان آب‌های زیرزمینی نیز در نهایت مورد واسنجی و تحلیل حساسیت قرار گرفت. در نهایت یافته‌ها حاکی از آن است که مدل ریاضی مورد استفاده برای شبیه‌سازی آبخوان ایذه ۱٦٪ خطا داشته است. ارزیابی تغییرات ساختار زمین حاکی از آن است که در طول بلند مدت ۲۰ساله سطح آبخوان حداکثر تا میزان ۱,۵ و حداقل تا میزان ۰,۹ متر کم می‌شود (چانگ، ۲۰۱۵) با توجه به اهمیت این موضوع در مقاله پیش رو برآن شدیم به مروری بر عوامل و پارامترهای موثر در فرونشست زمین و روش‌های پیش‌بینی آن بپردازیم.

۲- روش تحقیق

در مقاله پیش رو به بررسی عوامل و پارامترهای موثر در فرونشست زمین و روش‌های پیش‌بینی آن پرداخته شد، هدف از این تحقیق مروری، بررسی عوامل موثر در فرونشست زمین و روش‌های پیش‌بینی آن است. برای رسیدن به این هدف، مطالعات منتشر شده در پایگاه‌های اطلاعاتی علمی مانند Web of Science، Scopus و Google Scholar مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق مروری، ابتدا کلمات کلیدی مرتبط با موضوع تحقیق، مانند "فرونشست زمین"، "عوامل موثر در فرونشست زمین"، "روش‌های پیش بینی فرونشست زمین" و "پیامدهای فرونشست زمین" تعیین شد. سپس از کلمات کلیدی تعیین شده برای جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی علمی استفاده شد و مقالات بر اساس معیارهایی مانند عنوان، چکیده و کلیدواژه‌ها غربالگری شد. در نهایت مطالب منتخب به طور کامل مطالعه و تجزیه و تحلیل شد و یافته‌های مقالات منتخب سنتز و خلاصه شد، در نهایت یافته‌های این تحقیق مروری در مورد عوامل موثر در فرونشست زمین و روش‌های پیش بینی آن ارائه شد و نتایج این تحقیق مروری در بخش "نتیجه‌گیری" ارائه شد. در این بخش، خلاصه‌ای از یافته‌های کلیدی و پیامدهای آنها برای تحقیقات و اقدامات آتی ارائه خواهد شد.

۳- عوامل و پارامترهای موثر در فرونشست زمین

فرونشست زمین پدیده‌ای است که در آن سطح زمین به تدریج فرو می‌ریزد. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی یا فعالیت‌های انسانی باشد. عوامل طبیعی موثر در فرونشست زمین عبارتند از: (سازمان زمین شناسی آمریکا، ۲۰۲۳)

افت سطح آب‌های زیرزمینی: افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین دو پدیده‌ی به هم مرتبط هستند که می‌توانند پیامدهای زیانباری برای محیط زیست و انسان‌ها داشته باشند. افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به فرونشست زمین شود؛ زیرا زمانی که آب از سفره‌های زیرزمینی برداشت می‌شود، حفره‌هایی در زمین ایجاد می‌شود که می‌تواند باعث فروریختن خاک overlying شود. فرونشست زمین می‌تواند پیامدهای مختلفی از جمله ترک خوردن زمین، آسیب به ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، مختل شدن زهکشی و افزایش خطر سیل داشته باشد. در ایران، افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین به ویژه در دشت‌های مرکزی و شرقی کشور که منابع آب زیرزمینی به شدت مورد بهره برداری قرار می‌گیرند، به یک مشکل جدی تبدیل شده است. طبق گزارش سازمان زمین شناسی ایران، در برخی از مناطق ایران، سطح زمین سالانه تا ۵۰ سانتی‌متر فرو نشست می‌کند. افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به خشکسالی شود؛ زیرا آب‌های زیرزمینی منبع مهمی برای تامین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت هستند (دجلالینیا، ۲۰۱۲). افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به افزایش شوری و آلودگی آب‌های زیرزمینی شود. فرونشست زمین می‌تواند منجر به ترک خوردن زمین، آسیب به ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، مختل شدن زهکشی و افزایش خطر سیل شود؛ همچنین افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به از دست دادن تنوع زیستی شود؛ زیرا بسیاری از گیاهان و جانوران برای زنده ماندن به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند. مهمترین راه حل برای مقابله با افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین، کاهش برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی است. این امر را می‌توان با استفاده از روش‌های آبیاری کارآمدتر، اصلاح الگوهای مصرف آب و استفاده از آب‌های جایگزین مانند آب تصفیه شده فاضلاب انجام داد (گال، ۲۰۲۰). برای مقابله با افت سطح آب‌های زیرزمینی، باید اقداماتی برای دوباره پر کردن سفره‌های آب زیرزمینی انجام شود. این امر را می‌توان با احیای آبخیزداری، تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی و استفاده از آب‌های تصفیه شده فاضلاب انجام داد. افزایش آگاهی عمومی در مورد خطرات افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین ضروری است. این امر را می‌توان از طریق برنامه‌های آموزشی، کمپین‌های اطلاع‌رسانی و مشارکت عمومی انجام داد (هس، ۲۰۲۱).

انحلال سنگ‌ها و رسوبات: انحلال سنگ‌ها و رسوبات توسط آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به ایجاد حفره‌ها و غارها در زیرزمین شود. این حفره‌ها می‌توانند به مرور زمان بزرگتر شوند و به طور قابل توجهی وزن لایه‌های بالایی زمین را کاهش دهند. اگر حفره‌ها و غارهای ایجاد شده در اثر انحلال به اندازه کافی بزرگ شوند، می‌توانند باعث ناپایداری لایه‌های زیرزمینی شوند. این امر می‌تواند منجر به ریزش ناگهانی سقف حفره‌ها و فرونشست زمین در سطح شود. در برخی موارد، انحلال سنگ‌ها و رسوبات می‌تواند منجر به ایجاد فروچاله‌ها شود. فروچاله‌ها حفره‌های بزرگ و عمیقی هستند که در اثر ریزش ناگهانی سقف غارهای زیرزمینی ایجاد می‌شوند. فروچاله‌ها می‌توانند خطرناک باشند و به طور ناگهانی به زمین فرو بریزند و هر چیزی را که در مسیرشان است با خود به پایین بکشند. برخی از سنگ‌ها مانند سنگ آهک و دولومیت در برابر اسید موجود در آب‌های زیرزمینی بیشتر محلول هستند. از سوی دیگر آب‌های اسیدی سنگ‌ها و رسوبات را سریعتر حل می‌کنند. همچنین فعالیت‌هایی مانند کشاورزی و صنعتی می‌تواند منجر به افزایش اسیدیته آب‌های زیرزمینی و افزایش سرعت انحلال سنگ‌ها و رسوبات شود (لارو، ۲۰۱۹). مناطق دارای سنگ‌های آهکی و دولومیت در برابر اسید موجود در آب‌های زیرزمینی بیشتر محلول هستند و بنابراین بیشتر در معرض خطر انحلال و فرونشست زمین هستند. همچنین در مناطق دارای آب‌های زیرزمینی اسیدی سنگ‌ها و رسوبات را سریعتر حل می‌کنند و بنابراین می‌توانند منجر به فرونشست سریعتر زمین شوند. در مناطقی که فعالیت‌های انسانی زیاد وجود دارد، مانند کشاورزی و صنعتی می‌تواند منجر به افزایش اسیدیته آب‌های زیرزمینی و افزایش سرعت انحلال سنگ‌ها و رسوبات و در نتیجه افزایش خطر فرونشست زمین شود (لیو، ۲۰۲۰)

برای پیشگیری از خطر فرونشست در این حوزه باید برداشت آب‌های زیرزمینی کاهش یابد؛ زیرا برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی می‌تواند منجر به کاهش سطح آب و افزایش سرعت انحلال سنگ‌ها و رسوبات شود. همچنین باید اسیدیته آب‌های زیرزمینی کنترل شود، می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند تصفیه فاضلاب و آهک‌زنی اسیدیته آب‌های زیرزمینی را کنترل کرد. یکی دیگر از راه‌ها نقشه‌برداری از مناطق مستعد فرونشست است، شناسایی و نقشه‌برداری از مناطق مستعد فرونشست می‌تواند به برنامه‌ریزی برای توسعه و کاهش خطرات کمک کند و در نهایت می‌توان با ایجاد قوانین و مقرراتی برای کنترل

فعالیت‌هایی مانند کشاورزی و صنعتی، از انحلال بیش از حد سنگ‌ها و رسوبات و فرونشست زمین جلوگیری کرد (لیو اچ ام، ۲۰۲۰).

فعالیت‌های آتشفشانی: فعالیت‌های آتش فشانی به مجموعه فرآیندهایی گفته می‌شود که در اثر فوران مواد مذاب، گازها و خاکستر از اعماق زمین به سطح زمین رخ می‌دهد. این فعالیت‌ها می‌توانند اشکال مختلفی از جمله فوران‌های انفجاری، فوران‌های گدازه‌ای و تشکیل گنبدهای آتشفشانی داشته باشند. فعالیت‌های آتش‌فشانی می‌توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر فرونشست زمین تاثیر بگذارند (ماگو، ۲۰۱۸).

تاثیرات مستقیم

خروج ماگما: هنگامی که ماگما از اعماق زمین به سطح زمین فوران می‌کند، می‌تواند حفره‌هایی در پوسته زمین ایجاد کند. این حفره‌ها می‌توانند به مرور زمان بزرگتر شوند و باعث فرونشست زمین در سطح شوند.

فعالیت‌های هیدروترمال: فعالیت‌های هیدروترمال مرتبط با آتشفشان‌ها می‌تواند منجر به حل شدن سنگ‌ها و رسوبات در زیرزمین شود. این امر می‌تواند به ایجاد حفره‌ها و غارها و در نهایت فرونشست زمین شود (مریگو، ۲۰۱۷).

تاثیرات غیرمستقیم

تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی: فعالیت‌های آتش‌فشانی می‌تواند منجر به تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی شود؛ به عنوان مثال، فوران‌های آتشفشانی می‌توانند باعث ذوب شدن یخ‌ها و برف ها و افزایش حجم آب‌های زیرزمینی شوند. این امر می‌تواند منجر به افزایش برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی و در نتیجه افزایش خطر فرونشست زمین شود.

لرزه خیزی: فعالیت‌های آتش فشانی می‌تواند منجر به لرزه خیزی شود. لرزه‌ها می‌توانند باعث فشرده شدن خاک و در نهایت فرونشست زمین شوند (مینگرز، ۲۰۱۹).

مناطق مستعد فرونشست زمین در اثر فعالیت‌های آتش‌فشانی را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد: مناطق دارای آتشفشان‌های فعال، این مناطق بیشتر در معرض خطر فرونشست زمین ناشی از فعالیت‌های آتش‌فشانی هستند، زیرا احتمال ایجاد حفره‌ها و غارها در اثر خروج ماگما و فعالیت‌های هیدروترمال در آنها بیشتر است. همچنین مناطق دارای آب‌های زیرزمینی کم عمق که در آنها، تغییرات در سطح آب‌های زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های آتش‌فشانی می‌تواند تاثیر بیشتری بر پایداری زمین داشته باشد و خطر فرونشست را افزایش دهد؛ مناطق دارای خاک‌های سست، به صورتی که خاک‌های سست بیشتر در معرض فشرده شدن و فرونشست در اثر لرزه‌ها هستند (کیو، ۲۰۲۴).

در این زمینه برای کاهش خطرات فرونشست می‌توان نظارت بر فعالیت‌های آتش فشانی را انجام داد، نظارت بر فعالیت‌های آتش فشانی می‌تواند به شناسایی و پیش‌بینی خطرات مرتبط با فرونشست زمین کمک کند. همچنین مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی می‌تواند به کاهش خطر فرونشست زمین ناشی از تغییرات در سطح آب های زیرزمینی کمک کند و در نهایت استفاده از مصالح ساختمانی مقاوم در برابر لرزه می‌تواند به کاهش خطر آسیب به ساختمان ها و زیرساخت‌ها در اثر لرزه‌ها و در نتیجه کاهش خطر فرونشست زمین کمک کند (سرنکو، ۲۰۲۳).

استخراج نفت، گاز و مواد معدنی: استخراج نفت، گاز و مواد معدنی می‌تواند یکی از عوامل مهم فرونشست زمین باشد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که سطح زمین در اثر برداشت مواد از زیر زمین به مرور زمان پایین می‌آید. هنگامی که نفت، گاز یا مواد معدنی از زیرزمین استخراج می‌شوند، حجم مخازن زیرزمینی کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند باعث ایجاد حفره‌ها و شکاف‌هایی در زمین شود که به مرور زمان بزرگتر می‌شوند و در نهایت منجر به فرونشست سطح زمین می‌شوند. برداشت مواد از زیرزمین می‌تواند منجر به فشرده شدن لایه‌های بالایی زمین شود. این امر به خصوص در مناطقی که خاک‌ها سست یا آب‌های زیرزمینی کم عمق هستند، می‌تواند خطرناک باشد و به فرونشست زمین منجر شود. از سوی دیگر فعالیت‌های استخراج می‌تواند منجر به لرزه‌خیزی شود. لرزه‌ها می‌توانند باعث فشرده شدن خاک و در نهایت فرونشست زمین شوند (سویله، ۲۰۱۹).

در این میان، هر چه عمق معدن بیشتر باشد، احتمال فرونشست زمین بیشتر است. همچنین مواد معدنی با چگالی بالا مانند سنگ آهن می‌توانند منجر به فرونشست بیشتری نسبت به مواد با چگالی کم مانند نفت و گاز شوند. برخی از روش‌های استخراج مانند استخراج در محل می‌توانند منجر به فرونشست بیشتری نسبت به روش‌های دیگر مانند استخراج حفاری شوند. در نهایت نوع خاک، وجود آب‌های زیرزمینی و سایر شرایط زمین‌شناسی می‌تواند بر میزان فرونشست ناشی از استخراج تاثیر بگذارد (تیتینی، ۲۰۱۸)

مناطق مستعد فرونشست زمین ناشی از استخراج را می‌توان به صورت زیر معرفی کرد.

مناطق دارای معادن فعال: این مناطق در معرض خطر بیشتری برای فرونشست زمین ناشی از استخراج هستند.

مناطق دارای خاک‌های سست: خاک‌های سست بیشتر در معرض فشرده شدن و فرونشست در اثر فعالیت‌های استخراج هستند (گال، ۲۰۲۰).

مناطق دارای آب‌های زیرزمینی کم عمق: در مناطقی که آب‌های زیرزمینی کم عمق هستند، برداشت مواد از زیرزمین می‌تواند به طور قابل توجهی بر پایداری زمین تاثیر بگذارد و خطر فرونشست را افزایش دهد.

برخی از اقدامات پیشگیرانه برای کاهش خطر فرونشست زمین تحت تاثیر استخراج، عبارتند از: استفاده از روش‌های استخراج پایدار مانند استخراج در محل با تزریق آب یا گاز می‌تواند به کاهش حجم حفره‌ها و شکاف‌های ایجاد شده در زیرزمین و در نتیجه کاهش خطر فرونشست کمک کند. از سوی دیگر وجود قوانین و مقرراتی که روش‌های استخراج و میزان برداشت مواد از معادن را کنترل می‌کند، می‌تواند به کاهش خطر فرونشست زمین کمک کند. همچنین نظارت بر فعالیت‌های استخراج و اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین می‌تواند به شناسایی مناطق در معرض خطر و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه کمک کند. در مناطقی که فرونشست زمین در اثر استخراج رخ داده است، می‌توان اقداماتی برای جبران خسارات مانند بالا بردن سطح زمین یا مقاوم سازی ساختمان‌ها در برابر فرونشست انجام داد (علیزاده، ۱۴۰۱).

کشاورزی: کشاورزی یکی از فعالیت‌های بشری است که می‌تواند به طور مستقیم و غیرمستقیم بر فرونشست زمین تاثیر بگذارد (حسیه ، ۲۰۱۸).

تاثیرات مستقیم

برداشت آب‌های زیرزمینی: کشاورزی یکی از بزرگترین مصرف کنندگان آب‌های زیرزمینی است. برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی برای آبیاری مزارع می‌تواند منجر به خالی شدن سفره‌های زیرزمینی و در نتیجه ایجاد حفره‌ها و شکاف‌ها در زمین شود. این امر به مرور زمان می‌تواند منجر به فرونشست سطح زمین شود.

کاهش سطح آب: آبیاری مزارع می‌تواند منجر به افزایش سطح آب در خاک شود. این امر می‌تواند باعث فشرده شدن خاک و در نهایت فرونشست سطح زمین شود (باگالکوتی، ۲۰۲۴).

استفاده از مواد شیمیایی: استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها در کشاورزی می‌تواند به آلودگی آب‌های زیرزمینی منجر شود. آب‌های آلوده می‌توانند باعث حل شدن سنگ‌ها و رسوبات در زیر زمین و ایجاد حفره‌ها و غارها شوند. این امر به مرور زمان می‌تواند منجر به فرونشست سطح زمین شود (هس، ۲۰۲۱).

تاثیرات غیرمستقیم

شور شدن خاک: آبیاری مزارع با آب شور می‌تواند منجر به شور شدن خاک شود. خاک شور شده نفوذپذیری کمتری دارد و بنابراین آب را به طور موثری ذخیره نمی‌کند. این امر می‌تواند منجر به افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی برای آبیاری و در نتیجه افزایش خطر فرونشست زمین شود (بیوت، ۲۰۱۹).

تخریب پوشش گیاهی: تخریب پوشش گیاهی طبیعی می‌تواند منجر به افزایش فرسایش خاک و کاهش نفوذ آب در زمین شود. این امر می‌تواند منجر به افزایش روان آب و کاهش ذخیره آب در سفره‌های زیرزمینی شود. در نتیجه، برداشت آب‌های زیرزمینی برای کشاورزی افزایش می‌یابد و خطر فرونشست زمین نیز افزایش می‌یابد.

مناطق مستعد فرونشست زمین در اثر کشاورزی عبارتنداز:

مناطق دارای آب های زیرزمینی کم عمق: در مناطقی که آب‌های زیرزمینی کم عمق هستند، برداشت آب برای کشاورزی می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر سطح آب‌های زیرزمینی و پایداری زمین داشته باشد و خطر فرونشست را افزایش دهد (چانگ، ۲۰۱۵).

مناطق دارای خاک‌های سست: خاک‌های سست بیشتر در معرض فشرده شدن و فرونشست در اثر آبیاری و سایر فعالیت‌های کشاورزی هستند.

مناطق با آب و هوای خشک و گرم: در مناطقی با آب و هوای خشک و گرم، تبخیر و تعرق آب از خاک بیشتر است و بنابراین نیاز به آبیاری برای کشاورزی نیز بیشتر است. این امر می‌تواند منجر به افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی و در نتیجه افزایش خطر فرونشست زمین شود. به این ترتیب برای کاهش خطر فرونشست زمین ناشی از کشاورزی می‌توان اقدامات زیر را عملی

کرد: استفاده از روش‌های آبیاری کارآمدتر مانند آبیاری قطره‌ای می‌تواند به کاهش مصرف آب در کشاورزی و در نتیجه کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی کمک کند، استفاده از آب‌های تصفیه شده فاضلاب یا آب‌های سطحی برای آبیاری به جای آب‌های زیرزمینی می‌تواند به حفظ سفره‌های زیرزمینی و کاهش خطر فرونشست زمین کمک کند، کاشت گیاهانی که به آب کمتری نیاز دارند می‌تواند به کاهش نیاز به آبیاری و در نتیجه کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی کمک کند، حفاظت از خاک با استفاده از مالچ‌پاشی و سایر روش‌ها می‌تواند به حفظ رطوبت خاک و کاهش نیاز به آبیاری کمک کند، مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی با استفاده از قوانین و مقررات مناسب می‌تواند به جلوگیری از برداشت بیش از حد آب و حفظ سطح آب‌های زیرزمینی کمک کند (وانگ، ۲۰۲٤).

ساخت و ساز: ساخت و ساز می‌تواند یکی از عوامل موثر در فرونشست زمین باشد، به خصوص در مناطقی که مستعد این پدیده هستند. تاثیرات ساخت و ساز بر فرونشست زمین از طریق دو مکانیزم اصلی رخ می‌دهد.

برداشت آب‌های زیرزمینی

آبیاری فضای سبز: آبیاری فضای سبز، به ویژه در مناطق خشک و کم آب، می‌تواند منجر به برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی شود. این امر می‌تواند به خالی شدن سفره‌های زیرزمینی و ایجاد حفره ها و شکاف‌ها در زمین منجر شود که در نهایت به فرونشست سطح زمین می‌انجامد.

افزایش روان آب: پوشش دادن زمین با مصالح غیرقابل نفوذ مانند آسفالت و بتن در اثر ساخت و ساز، می‌تواند منجر به افزایش روان آب و کاهش نفوذ آب در خاک شود. این امر می‌تواند به کاهش ذخیره آب در سفره‌های زیرزمینی و افزایش نیاز به برداشت آب برای مصارف مختلف از جمله آبیاری فضای سبز، نیز منجر شود (یانگ، ۲۰۲۰).

بارگذاری زمین

وزن ساختمان‌ها: وزن ساختمان‌ها، به خصوص ساختمان‌های بلند و سنگین، می‌تواند فشار زیادی به زمین وارد کند. این فشار می‌تواند باعث فشرده شدن خاک و در نهایت فرونشست سطح زمین شود.

لرزش‌ها: فعالیت‌های ساخت و ساز، مانند حفاری و انفجار، می‌تواند منجر به لرزش در زمین شود. لرزش‌ها می‌توانند باعث فشرده شدن خاک و در نهایت فرونشست سطح زمین شوند (یه، ۲۰۱٦).

در مناطقی که آب‌های زیرزمینی کم عمق هستند، برداشت آب برای مصارف ساختمانی و آبیاری فضای سبز می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر سطح آب‌های زیرزمینی و پایداری زمین داشته باشد و خطر فرونشست را افزایش دهد. از سوی دیگر خاک‌های سست بیشتر در معرض فشرده شدن و فرونشست در اثر بارگذاری ساختمان‌ها و لرزش‌های ناشی از فعالیت‌های ساخت و ساز هستند. مناطقی که در گذشته سابقه فرونشست زمین داشته‌اند، در معرض خطر بیشتری برای فرونشست در اثر ساخت و سازهای جدید هستند.

استفاده از روش‌های آبیاری کارآمدتر مانند آبیاری قطره ای برای فضای سبز و استفاده از مصالح با نفوذپذیری بالا در ساخت و ساز می‌تواند به کاهش نیاز به برداشت آب و در نتیجه کاهش خطر فرونشست زمین کمک کند. همچنین استفاده از مصالح سبک‌تر در ساخت و ساز می‌تواند به کاهش بارگذاری بر روی زمین و در نتیجه کاهش خطر فرونشست کمک کند. همچنین استفاده از اصول طراحی و ساخت پایدار مانند پی‌های عمیق و فونداسیون‌های مقاوم می‌تواند به توزیع بهتر وزن ساختمان‌ها و کاهش فشار بر روی زمین کمک کند. مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی با استفاده از قوانین و مقررات مناسب می‌تواند به جلوگیری از برداشت بیش از حد آب و حفظ سطح آب‌های زیرزمینی کمک کند. نظارت بر فعالیت‌های ساخت و ساز و اعمال قوانین و مقررات مربوط به حفاری، انفجار و لرزش می‌تواند به کاهش خطر فرونشست ناشی از این فعالیت‌ها کمک کند (زوکاراتو، ۲۰۱۸).

پیش‌بینی فرونشست زمین

روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی فرونشست زمین وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خود را دارند. به طور کلی، این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: (بافویی، ۲۰۲۰)

روش‌های مستقیم

اندازه گیری تداخل‌سنجی زمین مصنوعی: تداخل‌سنجی زمین مصنوعی یک تکنیک سنجش از دور قدرتمند است که برای اندازه‌گیری و پایش تغییرات جزئی سطح زمین با دقت بالا و در مقیاس وسیع به کار می‌رود. این تکنیک به طور خاص برای

پیش‌بینی فرونشست زمین بسیار مفید است؛ زیرا می‌تواند تغییرات ارتفاعی بسیار کوچک را در طول زمان به طور دقیق آشکار کند.

تداخل‌سنجی زمین مصنوعی با استفاده از تصاویر راداری گرفته شده از ماهواره در زمان‌های مختلف، تغییرات ارتفاع سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کند. این تصاویر با مقایسه فاز امواج راداری بازگشتی از زمین در دو زمان مختلف، اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف را بدست می‌آورند.

تداخل‌سنجی زمین مصنوعی می‌تواند تغییرات ارتفاعی به کوچکی چند میلی‌متر را با دقت بالا اندازه‌گیری کند. همچنین تصاویر ماهواره‌ای راداری می‌توانند مناطق وسیعی را در یک تصویر واحد پوشش دهند و این امر تداخل‌سنجی زمین مصنوعی را به ابزاری مناسب برای پایش فرونشست در مقیاس‌های منطقه‌ای و ملی تبدیل می‌کند. تداخل‌سنجی زمین مصنوعی در مقایسه با سایر روش‌های پایش فرونشست زمین مانند GPS، روشی نسبتاً ارزان است. اندازه‌گیری تداخل‌سنجی زمین مصنوعی قابلیت دسترسی ساده‌ای دارد به نحوی که تصاویر ماهواره‌ای راداری به طور آزادانه در دسترس هستند، که تداخل‌سنجی زمین مصنوعی را به ابزاری مناسب برای تحقیقات علمی و پایش عملی فرونشست زمین در سراسر جهان تبدیل می‌کند.

تداخل‌سنجی زمین مصنوعی دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد، که عبارتند از: (https://nisar.jpl.nasa.gov)

پوشش ابری: پوشش ابری می‌تواند مانع از دریافت تصاویر راداری شود و تداخل‌سنجی زمین مصنوعی را برای پایش فرونشست در این مناطق غیرقابل استفاده کند.

پوشش گیاهی: پوشش گیاهی انبوه می‌تواند سیگنال راداری را مختل کند و دقت تداخل‌سنجی زمین مصنوعی را در مناطق با پوشش گیاهی انبوه کاهش دهد.

توپوگرافی: توپوگرافی ناهموار می‌تواند تفسیر نتایج تداخل‌سنجی زمین مصنوعی را دشوارتر کند.

موارد استفاده از تداخل‌سنجی زمین مصنوعی برای پیش‌بینی فرونشست زمین به صورت زیر است:

شناسایی مناطق مستعد فرونشست: تداخل‌سنجی زمین مصنوعی می‌تواند برای شناسایی مناطقی که در معرض خطر فرونشست زمین ناشی از عواملی مانند برداشت آب‌های زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، و فعالیت‌های آتشفشانی هستند، استفاده شود.

پایش نرخ فرونشست: تداخل سنجی زمین مصنوعی می‌تواند برای پایش نرخ فرونشست در طول زمان و مشاهده اثرات فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی بر روی سطح زمین استفاده شود.

مدل‌سازی فرونشست: تداخل‌سنجی زمین مصنوعی می‌تواند برای مدل‌سازی فرونشست زمین و پیش‌بینی تغییرات ارتفاعی در آینده استفاده شود.

مطالعات علمی: تداخل‌سنجی زمین مصنوعی می‌تواند برای مطالعه فرآیندهای زمین‌شناسی مانند حرکات پوسته‌ای، لرزه خیزی و تغییرات آب و هوایی استفاده شود.

به عنوان مثال از تداخل‌سنجی زمین مصنوعی برای پایش فرونشست زمین در دشت مرکزی ایران، که یکی از مناطق مستعد فرونشست در جهان است، استفاده شده است. مطالعات تداخل‌سنجی زمین مصنوعی نشان داده است که نرخ فرونشست در این منطقه در حال افزایش است و این امر خطرات قابل توجهی را برای زیرساخت‌ها، سکونتگاه‌ها و منابع آب به وجود آورده است. نتایج تداخل‌سنجی زمین مصنوعی به مقامات محلی در شناسایی مناطق در معرض خطر و اتخاذ اقدامات پیشگیرانه برای کاهش خطر فرونشست کمک کرده است. در حال حاضر، تداخل‌سنجی زمین مصنوعی به عنوان ابزاری ضروری برای پیش‌بینی و پایش فرونشست زمین در سراسر جهان شناخته شده است. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش دسترسی به تصاویر راداری، انتظار می‌رود که تداخل‌سنجی زمین مصنوعی در آینده نقشی حیاتی در درک و مدیریت این پدیده خطرناک ایفا کند (پلوتارخوس تزامپوگلو، ۲۰۲۳).

سطح بندی: این روش شامل اندازه‌گیری ارتفاع نقاط ثابت در طول زمان است. ترازبندی یک روش نسبتاً ساده و ارزان است، اما دقت آن به اندازه تداخل‌سنجی زمین مصنوعی نیست.

GPS: شبکه‌های دائمی GPS می‌توانند برای اندازه‌گیری حرکات عمودی زمین با دقت بالا استفاده شوند. GPS روشی نسبتاً جدید است، اما پتانسیل تبدیل شدن به یک ابزار ارزشمند برای پیش‌بینی فرونشست زمین را دارد (دینار، ۲۰۲۱).

روش‌های غیرمستقیم

مدل‌سازی ریاضی: از مدل‌های ریاضی می‌توان برای شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی که باعث فرونشست زمین می‌شوند استفاده کرد. این مدل‌ها می‌توانند برای پیش‌بینی میزان و سرعت فرونشست در مناطق مختلف استفاده شوند. چندین مدل ریاضی

مختلف برای پیش بینی فرونشست زمین وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند.

برخی از رایج ترین مدل‌ها عبارتنداز:

مدل‌های الاستیک: این مدل‌ها از نظریه الاستیسیته برای محاسبه تغییر شکل زمین در پاسخ به تنش‌های زیرزمینی استفاده می‌کنند. آنها ساده‌ترین مدل‌ها برای استفاده هستند، اما ممکن است در مناطق با زمین شناسی پیچیده دقیق نباشند.

مدل‌های تراکم: این مدل‌ها تراکم لایه‌های رسوبی زیرزمینی را در پاسخ به برداشت آب زیرزمینی محاسبه می‌کنند. آنها دقیق‌تر از مدل‌های الاستیک هستند، اما نیاز به داده‌های بیشتری در مورد خواص زمین شناسی زیرزمین دارند.

مدل‌های جریان آب زیرزمینی: این مدل‌ها جریان آب زیرزمینی را در یک آبخوان شبیه‌سازی می‌کنند و می‌توان از آنها برای پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی که می‌تواند منجر به فرونشست شود، استفاده کرد. آنها پیچیده‌ترین مدل‌ها برای استفاده هستند، اما دقیق‌ترین نتایج را نیز ارائه می‌دهند. انتخاب مدل مناسب برای یک موقعیت خاص به عوامل مختلفی از جمله دقت مورد نیاز، داده‌های موجود و منابع محاسباتی در دسترس بستگی دارد (انجمن زمین شناسی امریکا، ۲۰۲۳).

تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی: از داده‌های ژئوفیزیکی، مانند داده‌های لرزه‌نگاری و صوتی، می‌توان برای ایجاد تصاویر زیرزمینی از ساختار زمین استفاده کرد. این اطلاعات می‌تواند برای شناسایی مناطقی که در معرض خطر فرونشست هستند استفاده شود. از جمله روش‌های ژئوفیزیکی عبارتنداز:

توپوگرافی ثقلی: توپوگرافی ثقلی روشی برای اندازه‌گیری میدان گرانشی زمین است. تغییرات میدان گرانشی را می‌توان برای استنباط تغییرات تراکم زیرسطحی استفاده کرد که می‌تواند نشان‌دهنده فرونشست باشد.

لرزه‌نگاری: لرزه‌نگاری مطالعه امواج لرزه‌ای است که از زمین عبور می‌کنند. می‌توان از امواج لرزه‌ای برای تصویربرداری از ساختار زیرسطحی زمین و شناسایی مناطقی که احتمال فرونشست در آنها وجود دارد، استفاده کرد.

مقاومت الکتریکی: مقاومت الکتریکی یک روش ژئوفیزیکی است که می‌توان از آن برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی زمین استفاده کرد. تغییرات هدایت الکتریکی را می‌توان برای استنباط تغییرات محتوای آب زیرزمینی که می‌تواند منجر به فرونشست شود، استفاده کرد (هس، ۲۰۲۱).

تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی می‌تواند ابزاری ارزشمند برای پیش بینی فرونشست زمین باشد. با این حال مهم است که توجه داشته باشید که هیچ روش واحدی وجود ندارد که برای همه موقعیت‌ها مناسب باشد. بهترین روش برای یک موقعیت خاص به عوامل مختلفی از جمله نوع داده‌های ژئوفیزیکی موجود، زمین شناسی زیرسطحی و دقت مورد نیاز بستگی دارد. در نهایت باید گفت، انتخاب بهترین روش برای پیش بینی فرونشست زمین به عوامل مختلفی از جمله مقیاس مطالعه، دقت مورد نیاز و بودجه موجود بستگی دارد (هررا، ۲۰۲۱).

۵-نتیجه‌گیری

در حالت کلی می‌توان اذعان داشت، فرونشست زمین سبب نابودی فضاهای خالی و از بین رفتن آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود؛ به این ترتیب سقوط سالانه تراز آب زیرزمینی سبب نابودی قسمتی از ظرفیت سفره آب زیرزمینی شده که امکان احیای آن وجود ندارد؛ یا ممکن است زمان زیادی نیاز داشته باشد، به این ترتیب حد پایداری سفره آب زیرزمینی برای حال حاضر حداقل حفظ تراز آب در شرایط فعلی و ممانعت از هر گونه کاهش بیشتر از تراز آن می‌باشد، این مورد سبب می‌گردد بعد از گذشت مدت زمان معین فرونشست زمین متوقف گردیده و امکان احیای حداقل قسمت‌هایی از آن که کاملاً تحت فرونشست قرار نگرفته است، وجود داشته باشد، از این رو برای جلوگیری از بیشتر شدن شدت فرونشست زمین در این بخش‌ها لازم است، تراز آبخوان در این بخش‌ها ثابت شده و از هر گونه مازاد برداشت که باعث کاهش بیشتر آن شود ممانعت به عمل آید. در این حالت می‌توان انتظار داشت به مرور زمان نرخ فرونشست در این مناطق کاهش یافته و متوقف گردد، در این میان پیش‌بینی نرخ فرونشست زمین می‌تواند در برنامه‌ریزی برای متوقف کردن فرونشست بسیار تاثیرگذار باشد، بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که برای پیش بینی فرایند فرونشست و کمی کردن آن شیوه‌های گوناگونی وجود دارد، در حال حاضر، محققان در حال توسعه روش‌های جدیدی برای پیش بینی فرونشست زمین هستند که دقیق‌تر، ارزان‌تر و کارآمدتر هستند. یکی از امیدوارکننده‌ترین این روش‌ها، استفاده از یادگیری ماشین است. یادگیری ماشین می‌تواند برای تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های بزرگ از داده‌های مختلف، از جمله تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های GPS و داده‌های ژئوفیزیکی استفاده شود. این امر می‌تواند به ایجاد مدل‌های دقیق

تری از فرونشست زمین منجر شود که می‌توان از آنها برای پیش‌بینی بهتر این پدیده مخرب استفاده کرد (نصری زارع و کرم، ۱٤۰۱). علاوه بر روش‌های ذکر شده در بالا، تعدادی روش دیگر نیز برای پیش بینی فرونشست زمین وجود دارد.

این روش‌ها عبارتنداز:

مطالعات ژئومورفولوژیکی: این مطالعات می‌توانند برای شناسایی مناطقی که در گذشته دچار فرونشست شده‌اند استفاده شوند.

مطالعات هیدروژئولوژیکی: این مطالعات می‌توانند برای درک تأثیر برداشت آب زیرزمینی بر فرونشست زمین استفاده شوند.

مطالعات ژئوتکنیکی: این مطالعات می‌توانند برای ارزیابی پایداری خاک و سنگ در مناطق مستعد فرونشست استفاده شوند.

پیش بینی فرونشست زمین یک فرآیند پیچیده است که نیاز به درک عمیقی از عوامل زمین شناسی، هیدروژئولوژیکی و مهندسی دارد. با استفاده از طیف گسترده‌ای از روش‌ها، می‌توان فرونشست زمین را با دقت بیشتری پیش بینی کرد و اقدامات لازم را برای کاهش خطرات آن انجام داد (داداشی، ۱۳۹۹)، در زمینه فرونشست زمین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌های زیر انجام شود.

توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر برای پیش‌بینی میزان و محل فرونشست زمین.

شناسایی روش‌های جدید و مؤثر برای مدیریت فرونشست زمین.

افزایش آگاهی از خطرات فرونشست زمین در بین سیاستگذاران، برنامه‌ریزان و عموم مردم.

تحقیقات بیشتر در مورد فرونشست زمین برای توسعه راه‌حل‌های مؤثر برای مدیریت این پدیده و کاهش اثرات آن بر جوامع ضروری است.

٦-مراجع

-داداشی، ثریا و صادق فام، سینا (۱۳۹۹). تحلیل آسیب پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی.

-علیزاده، زهرا و عبادی، حمید (۱٤۰۱). امکان سنجی استفاده از تداخل سنجی راداری به منظور اندازه گیری فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی، *کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت نوآوری و فناوری*، ٤(۱)، ۲۲-۲.

-نصیری زارع، سعید و کرم، امیر (۱٤۰۱). فرا روشی برای شناسایی موضوع تحقیقات علمی در فرونشست زمین (یک تحقیق با رویکرد علم سنجی)، *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(٤٤)، ۱۹-۱.

-Baffoe G., (2020). Rural-urban studies, A macro analyses of the scholarship terrain. Habitat International, 98, 102156. **doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102156**

-Bagalkoti VT, & Hosamani SC. (2024). Mapping of the Indian Research Productivity of Biochemistry and Molecular Biology: A Scientometric Analysis. *Journal of Advances in Library and Information Science*, 3 (3), 249–256.

-Biot, M.A. (2019). General theory of three-dimensional consolidation. *Appl. Phys.* 12,155

-Chai JC, Shen SL, Zhu HH, & Zhang XL. (2014). Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. *Geotechnique*, 54 (2), 143-147.

Doi.org/ 10.1680/ geot. 2004. 54.2.143.

-Chang Y-W, Huang M-H, & Lin C-W., (2015). Evolution of research subjects in library and information science based on keyword, bibliographical coupling, and co-citation analyses. *Scientometrics*, 105 (3), 2071–2087. **doi.org/10.1007/s11192-015-1762-8**

-Dinar A, Encarna E, Elena C, Gerardo H, Pietro T, Roberto T, Yang L, Pablo E, & Jose A., (2021). We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent. *Science of the Total Environment 786*, 147415. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147415**

-Djalalinia, SHP, Owlia A, Setareh Forouzan E, Habibi M, Dejman M, Baradaran Eftekhari M, Ghanei HOSSEIN, Malekafzali, & N. Peykari., (2012). Health research evaluation and its role on knowledge production. *Iranian Journal of Public Health 41*, No. 2: 39. https:// www. ncbi. nlm.nih.gov/ pmc/articles/PMC3481679/.

-Gall M, Nguyen KH, & Cutter SL., (2020). Integrated research on disaster risk: Is it really integrated? *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 12, 255–267.

doi.org/ 10.1016/j.ijdrr.2015.01.010

-Hess DJ. (2021). Science studies: An advanced introduction. NYU press. https:// books. google. com/ books.

-Herrera-García G, Ezquerro P. Tomás R, Béjar-Pizarro M, López-Vinielles J, Rossi M, Mateos RM, Carreón-Freyre D, Lambert J, Teatini P, & Cabral-Cano E., 2021. Mapping the global threat

-Serenko A., (2023). Meta-analysis of scientometric research of knowledge management: discovering the identity of the discipline damaging Jocotepec city in. *Journal of Knowledge Management*, 17 (5), 773– 812. **doi.org/10.1108/JKM-05-2013-0166**

-Sweileh WM., (2019). A bibliometric analysis of health-related literature on natural disasters from 1900 to 2017. *Health Research Policy and Systems*, 17 (1), 1–11. **doi.org/ 10.1186/ s12961-019-0418-1**

-Teatini P, Carreón-Freyre D, Ochoa-González G, Ye S, Galloway D, & Hernández-Marin M., (2018). Ground groundwater overexploitation damaging Jocotepec city in Jalisco, Mexico: 2016 field excursion of IGCP-641. *Episodes*, 41 (1), 69-73. https:// www.episodes.org.

-Wang B, Pan SY, Ke RY, Wang K, & Wei YM., (2024). An overview of climate change vulnerability: a bibliometric analysis based on Web of Science database. *Natural Hazards*, 74 (3), 1649-1666. **doi.org/10.1007/s11069-014-1260-y**

-Yang S, Yuan Q, & Dong J., (2020). Are Scientometrics, Informetrics, and Bibliometrics Different? Data Science and Informetrics, 1 (01), 50. http:// creativecommons.org/ licenses /by/4.0/. Arizona. *Journal of Environmental Economics and Policy*.

-Ye S, Xue Y, Wu J, Yan X, & Yu J., (2016). Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24 (3), 685-693. https://autherrorpage

-Yoo J, & Perrings C., (2017). An externality of groundwater depletion: land subsidence and residential property prices in Phoenix, Arizona. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 6 (2), 121–133. **doi.org/10.1080/21606544.2016.1226198**

-Zoccarato C, Minderhoud PSJ, & Teatini P., (2018). The role of sedimentation and natural compaction in a prograding delta: insights from the mega Mekong delta. Vietnam. *Scientific Reports*, 8 (1), 1–12. https://link.springer.com.

of land subsidence. *Science*, 371 (6524), 34-36. **doi: 10.1126/science.abb8549**

-H.Guo, (2019). Abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain, *Piahs*, 372-380.

-Ploutarchos, Tzampoglou. (2023). Selected Worldwide Cases of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. *Water* 2023, *15*(6), 1094. **doi.org/10.3390/w15061094**

-Kok S & Costa AL. (2021). Framework for economic cost assessment of land subsidence. Natural Hazards, 106 (3), 1931–1949. **doi.org/10.1007/s11069-021-04520-3**

-LaRowe G, Ambre S, Burgoon J, Ke W, & Börner K., (2019). The Scholarly Database and its utility for scientometrics research. *Scientometrics*, 79 (2), 219-234. **doi.org/ 10.1007/ s11192-009-0414-2**

-Liu J, Li J & Fan C., (2020). A bibliometric study of pool fire related publications'. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 104030. **doi.org/ 10.1016/ j.jlp. 2019. 104030**

-Lyu HM, Shen SL, Zhou A, & Yang J. (2020). Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP. *Science of the Total Environment*, 717, 135310. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135310**

Mao G, Huang N, Chen L, & Wang H., (2018). Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. *Science of the Total Environment*, 635, 1081- 1090. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.173**

-Merigó JM, & Yang J-B., (2017). A bibliometric analysis of operations research and management science, *Omega*, 73, 37–48. **doi.org/10.1016/j.omega.2016.12.004.**

-Mingers J, & Leydesdorff L., (2019). A review of theory and practice in scientometrics. *European Journal of Operational Research*, 246 (1), 1–19. **doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.002.**

-Qiu J.P., Dong K, & Yu H-Q., (2024). Comparative study on structure and correlation among author co-occurrence networks in bibliometrics. *Scientometrics*, 101 (2), 1345–1360. **doi.org/ 10.1007/ s11192-014-1315-6**

An Overview of the Phenomenon of Land Subsidence and Its Consequences

Milad Saadatmagham, Omran Geotechnics, Agiq Shahinshahr Institute of Higher Education, Isfahan, Iran.
Mehran Iranpour Mobarakeh, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lanjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

E-mail: miladsaadat202@gmail.com

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT
Land subsidence refers to phenomena in which the surface of the earth moves vertically and downwards. This phenomenon can be natural factors or human activities or a combination of both. While some of the vertical movements of the earth, such as the movement of the earth's plates, are natural and at a very small speed (a few millimeters per year), the subsidence of the earth, which occurs due to human activities, at a much higher speed. Meters per year) and destructive consequences can be observed. The purpose of the upcoming research is to review the factors and research in land subsidence and its prediction methods. The research method in this study was a review, and the findings indicate that the most important factor of land subsidence is excessive use of underground water. When underground aquifers seep faster than normal, an empty space is created under the ground, which causes the roof of these aquifers to collapse and eventually the ground level. There are also several methods for predicting land subsidence, one of which uses a machine. Machines can be used to analyze and analyze large datasets of various data, including satellite images, geophysical data. This can lead to more accurate models of land subsidence that can be used to better predict this destructive phenomenon.

Keywords: Groundwater, Aquifer, Prediction, Subsidence, Machine Learning