چهارمین کنفرانس بین‌المللی
دانشجویان جغرافیا و علوم زمین ایران
4th International Conference for
Iranian Geography and Earth Sciences Students
www.geoe.cdsts.ir

فرونشست زمین در ایران ، مهمترین بحران زمین شناسی معاصر

عبدالحمید انصاری [۱]

[۱] استادیار، گروه مهندسی نفت، واحد لامرد، دانشگاه آزاد اسلامی، لامرد، ایران؛ **ab.ansari@iau.ac.ir**

خلاصه

فرونشست زمین به‌عنوان یکی از جدی‌ترین بحران‌های زمین‌شناسی و زیست‌محیطی معاصر ایران، در دهه‌های اخیر ابعادی گسترده و نگران‌کننده یافته است. این پدیده عمدتاً در نتیجه‌ی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و کاهش تخلخل لایه‌های آبرفتی رخ می‌دهد و به تخریب غیرقابل‌بازگشت ساختارهای زیرسطحی و سطحی منجر می‌شود. بررسی داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که نرخ فرونشست در برخی دشت‌های کشور از جمله جنوب‌غرب تهران، اصفهان و ورامین به بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال رسیده است؛ مقداری چندین برابر میانگین جهانی. نتایج مطالعات بیانگر آن است که ترکیب سه عامل اصلی—برداشت بیش‌ازحد از آبخوان‌ها، تغییرات اقلیمی (کاهش بارش و افزایش دما)، و ویژگی‌های زمین‌شناسی ریزدانه—عامل اصلی تشدید این پدیده است. فرونشست زمین پیامدهای گسترده‌ای از جمله تخریب زیرساخت‌های شهری و روستایی، کاهش دائمی ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها، نابودی اراضی کشاورزی، تهدید بناهای تاریخی و مهاجرت روستاییان را در پی دارد. راهکارهای مقابله شامل مدیریت یکپارچه منابع آب، کنترل برداشت از چاه‌ها، تغییر الگوی کشت، تغذیه مصنوعی سفره‌ها، و پایش مستمر با فناوری‌های سنجش‌ازدور است. در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که فرونشست زمین در ایران صرفاً یک مسئله زمین‌شناسی نیست، بلکه بحرانی ملی با ابعاد اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی است که تنها از طریق مدیریت داده‌محور، آموزش عمومی و سیاست‌گذاری علمی قابل مهار خواهد بود.

کلمات کلیدی: فرونشست زمین، آب زیرزمینی، InSAR، تغییر اقلیم، نشست دشت‌ها، مدیریت منابع آب

۱. مقدمه

فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌ساختی و هیدرولوژیکی است که در دهه‌های اخیر به یکی از بحران‌های زیست‌محیطی و زمین‌شناسی اصلی در ایران تبدیل شده است. این پدیده در اثر کاهش تخلخل لایه‌های زیرسطحی و فشردگی دائمی رسوبات ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی رخ می‌دهد.[۱] در واقع، زمانی‌که سطح ایستابی آب کاهش می‌یابد، فشار مؤثر بر دانه‌های رس و ماسه افزایش یافته و در نتیجه حجم منافذ کاهش پیدا می‌کند؛ این فرایند منجر به نشست تدریجی و غیرقابل‌بازگشت سطح زمین می‌شود .[۲]

در ایران، مطالعات ژئودزی و داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نشان می‌دهد که بخش وسیعی از دشت‌های کشور دچار نرخ‌های نگران‌کننده فرونشست هستند. داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ حاکی از آن است که در برخی مناطق از جمله جنوب غرب تهران، اصفهان و ورامین، میزان فرونشست سالانه به بیش از ۳۰ سانتی‌متر رسیده است.[۲و۳] چنین نرخ‌هایی چندین برابر میانگین جهانی بوده و از منظر ژئومکانیکی در سطح بحرانی قرار دارند.[۴]

عامل اصلی این پدیده در ایران برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی است. بخش کشاورزی بیش از ۸۵ درصد مصرف آب کشور را به خود اختصاص می‌دهد، و در بسیاری از دشت‌ها، میزان برداشت از آبخوان‌ها بسیار فراتر از نرخ تغذیه طبیعی است.[۳] به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی، کاهش بارندگی، افزایش دمای میانگین سالانه و افزایش تبخیر، منجر به افت قابل‌توجه سطح آب‌های زیرزمینی و تسریع در نرخ فرونشست شده است.[۴و۵]

فرونشست زمین در ایران تنها یک پدیده زمین‌شناسی نیست، بلکه بحرانی چندوجهی با پیامدهای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و امنیتی است. این پدیده می‌تواند موجب تخریب زیرساخت‌های شهری و روستایی، خطوط لوله، جاده‌ها، پل‌ها و شبکه‌های ریلی شود.[۶] در شهر اصفهان، فرونشست علاوه بر آسیب به زیرساخت‌ها، تهدیدی جدی برای آثار تاریخی از جمله مسجد جامع و پل خواجو محسوب می‌شود.[۶] در سطح ملی، خسارت ناشی از نشست زمین می‌تواند میلیاردها تومان هزینه سالانه به بخش‌های عمرانی و کشاورزی تحمیل کند .[۴]

از سوی دیگر، فرونشست تأثیر مستقیمی بر امنیت آبی و زیست‌پذیری مناطق دارد. نشست لایه‌های آبرفتی موجب کاهش دائمی ظرفیت ذخیره‌سازی آب زیرزمینی می‌شود و این مسئله تاب‌آوری کشور در برابر خشکسالی‌های آینده را کاهش می‌دهد.[۱و۳] ترکیب این شرایط با ضعف در مدیریت منابع آب، رشد جمعیت، توسعه بی‌رویه شهری و حفر صدها هزار چاه غیرمجاز، شرایط را به مرحله‌ای بحرانی رسانده است.[۱و۴]

پیشرفت فناوری‌های سنجش‌ازدور و تحلیل‌های ماهواره‌ای مانند تداخل‌سنجی راداری با توان تفکیک بالا(InSAR) ، امکان مطالعه دقیق‌تر روند و مکانیزم فرونشست در ایران را فراهم کرده است.[۵] امروزه با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های هیدروژئولوژیکی و تحلیل‌های یادگیری ماشین، پژوهشگران قادرند الگوهای زمانی و مکانی فرونشست را با دقت بالا پیش‌بینی کنند و نقش مؤلفه‌های اقلیمی و انسانی را کمی‌سازی نمایند.[۲و۵]

با توجه به گستردگی و شدت این پدیده، فرونشست زمین در ایران اکنون به‌عنوان جدی‌ترین بحران زمین‌شناسی معاصر کشور شناخته می‌شود .هدف این مقاله، بررسی علمی و تحلیلی این پدیده از منظر زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و مدیریتی است تا با تحلیل علل، پیامدها و راهکارهای ممکن، چشم‌اندازی برای کنترل و کاهش اثرات آن فراهم گردد .[۴]

۲. مبانی نظری و علل بروز فرونشست زمین

فرونشست زمین (Land Subsidence) یکی از پیامدهای مهم تعامل میان فرآیندهای زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و فعالیت‌های انسانی است. این پدیده معمولاً در نواحی آبرفتی و مناطق خشک و نیمه‌خشک رخ می‌دهد که در آن‌ها، برداشت آب زیرزمینی فراتر از میزان تغذیه طبیعی سفره‌ها است.[۱] فرونشست در حقیقت، نشان‌دهنده از بین رفتن تعادل دینامیکی میان تغذیه و تخلیه آبخوان‌ها و فشردگی سازندهای آبرفتی در اثر کاهش فشار تخلخل است.[۲]

۲.۱ علل زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی

از دید زمین‌شناسی، فرونشست عمدتاً در مناطق با رسوبات ریزدانه (سیلت و رس)، که دارای خاصیت فشردگی بالا هستند، رخ می‌دهد. در این لایه‌ها، ساختار دانه‌ای در حالت طبیعی توسط فشار آب منفذی پشتیبانی می‌شود. با برداشت آب، فشار منفذی کاهش یافته و وزن مؤثر بر دانه‌ها افزایش می‌یابد؛ در نتیجه، ساختار خاک دچار تراکم می‌شود و سطح زمین نشست می‌کند.[۱و۵]

این فرایند به‌طور معمول غیرقابل بازگشت است، زیرا پس از فشرده شدن ذرات رس و بسته‌شدن منافذ، فضای تخلخلی دیگر قادر به پذیرش آب نیست. در نتیجه، ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی در آن ناحیه برای همیشه کاهش می‌یابد.[۲]

از نظر هیدرولوژیکی، سرعت و شدت فرونشست به عوامل زیر بستگی دارد:

۱. نوع رسوبات و عمق لایه‌های آبرفتی –خاک‌های رسی و سیلتی بیشترین فشردگی را دارند.
۲. میزان و مدت افت سطح ایستابی –هر چه افت شدیدتر و طولانی‌تر باشد، نرخ نشست افزایش می‌یابد.
۳. سرعت برداشت و دوره‌های خشک‌سالی –دوره‌های خشک‌طولانی موجب تسریع در فشردگی سازندها می‌شوند.
٤. توزیع مکانی چاه‌ها و تراکم بهره‌برداری –تمرکز برداشت در یک منطقه می‌تواند باعث نشست ناهمگون (Differential Subsidence) و ایجاد شکاف‌های سطحی شود.[۴]

داده‌های ماهواره‌ای نشان داد که در دشت‌های اصفهان، تهران و کرمان، افت تراز آب زیرزمینی تا بیش از ۲۵ متر در دو دهه اخیر با نرخ نشست بالاتر از ۳۰ سانتی‌متر در سال همبستگی مستقیم دارد. در پژوهش‌های تداخل‌سنجی راداری، نشان دادند که دشت‌های مرکزی ایران به دلیل لایه‌های ضخیم رسی و برداشت شدید آب، بیشترین نرخ فشردگی را در خاورمیانه دارند.[۲]

۲.۲نقش تغییر اقلیم

تغییر اقلیم یکی از عوامل تشدیدکننده بحران فرونشست در ایران است. افزایش دمای میانگین سالانه، تغییر الگوی بارش و تکرار خشکسالی‌های طولانی، موجب کاهش تغذیه طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود.[۳]
مطالعات اقلیمی نشان داده است که طی سه دهه گذشته، میانگین بارندگی سالانه در ایران حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته و در برخی استان‌ها مانند اصفهان، یزد و کرمان، کاهش تا ۳۰ درصد نیز گزارش شده است.[۴] در نتیجه، آبخوان‌ها فرصت بازسازی خود را از دست داده‌اند و ناترازی میان برداشت و تغذیه روزبه‌روز تشدید شده است.
همچنین با افزایش دما، میزان تبخیر سطحی و تعرق گیاهان بالا می‌رود و نیاز آبی بخش کشاورزی افزایش می‌یابد. این مسئله موجب افزایش فشار بر منابع زیرزمینی برای جبران کمبود آب سطحی می‌شود.[۵] تغییر اقلیم در ایران نه‌تنها موجب کاهش بارش، بلکه باعث تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارندگی نیز شده است؛ یعنی بارش‌ها از حالت یکنواخت و تغذیه‌کننده به حالت رگباری و موقتی تبدیل شده‌اند که سهم کمتری در تغذیه سفره‌های آب دارند.
در نتیجه، تغییر اقلیم با دو مکانیسم هم‌زمان، یعنی کاهش تغذیه طبیعی و افزایش نیاز آبی، به‌طور غیرمستقیم بحران فرونشست را تشدید می‌کند.[۳و۴]

۲.۳عوامل انسانی

در ایران، عوامل انسانی مهم‌ترین و مستقیم‌ترین محرک فرونشست زمین هستند. بیش از ۸۵ درصد از منابع آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و این بخش عمدتاً متکی به منابع آب زیرزمینی است.[۳و۴] در حال حاضر، حدود ۸۰۰ هزار حلقه چاه مجاز و غیرمجاز در کشور فعال است که برداشت بیش از ظرفیت آبخوان‌ها را رقم می‌زنند.
در بسیاری از دشت‌های کشور، از جمله دشت‌های ورامین، رفسنجان، اصفهان و مهیار، سطح ایستابی سالانه بین ۱ تا ۱.۵ متر کاهش می‌یابد. این افت شدید، موجب از بین رفتن تکیه‌گاه رسوبات زیرزمینی و فشردگی تدریجی سازندها شده است[۱].
افزون بر برداشت آب، تغییر کاربری اراضی، گسترش شهرنشینی، حفر چاه‌های عمیق، و نبود نظام مؤثر نظارت بر منابع آب نیز در تشدید این روند نقش دارد. برخی مناطق شهری مانند جنوب‌غرب تهران و اصفهان به‌دلیل بارگذاری سازه‌ای زیاد (ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها) در کنار افت تراز آب زیرزمینی، نرخ نشست بالاتری را تجربه می‌کنند.[۲]
مطالعه Radman و همکاران (2021) با استفاده از داده‌های یادگیری ماشین و تداخل‌سنجی راداری نشان داد که حدود ۶۵ درصد از مناطق مستعد فرونشست در ایران مستقیماً با چگالی بالای چاه‌ها و برداشت بیش‌ازحد هم‌بستگی دارد. از سوی

دیگر، سیاست‌های ناکارآمد در مدیریت آب، فقدان برنامه‌ریزی برای الگوی کشت مناسب، و نبود قیمت‌گذاری واقعی آب، زمینه را برای تداوم برداشت بی‌رویه فراهم کرده است.[۴]

در مجموع، فشار انسانی بر منابع آب زیرزمینی در ایران، عامل اصلی ناپایداری زمین‌شناسی و فرونشست است .تا زمانی‌که برداشت از منابع زیرزمینی کاهش نیابد و مدیریت تقاضای آب به‌صورت پایدار اصلاح نشود، این روند ادامه خواهد داشت و خسارات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌صورت تصاعدی افزایش خواهد یافت.[۲و۳]

۳. وضعیت فرونشست در ایران

۳.۱گستره جغرافیایی و شدت فرونشست

ایران یکی از کشورهایی است که بیشترین نرخ و گستره فرونشست زمین در جهان را تجربه می‌کند. بر اساس داده‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران (GSI) و تحلیل‌های ماهواره Sentinel-1 ، بیش از ۷۰ درصد از دشت‌های کشور با درجات مختلفی از فرونشست مواجه‌اند.[۲]

نقشه‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) نشان می‌دهد که مناطق مرکزی و جنوب‌غربی ایران، به‌ویژه استان‌های تهران، اصفهان، فارس، یزد، کرمان و خراسان رضوی، دارای بیش‌ترین نرخ نشست هستند.[۲و۳]

مطالعات Motagh et al. (2008) در دشت‌های مرکزی ایران نشان دادند که نرخ فرونشست در برخی مناطق تا ۲۵ سانتی‌متر در سال است، در حالی که بررسی‌های اخیر با داده‌های جدید Sentinel-1 (2014–2023) نشان می‌دهد که در مناطقی مانند جنوب‌غرب تهران، ورامین، مهیار و اصفهان، نرخ نشست به ۳۰ تا ۳۶ سانتی‌متر در سال نیز می رسد. این میزان چندین برابر میانگین جهانی (حدود ۵ سانتی‌متر در سال) است.

جدول (۱) خلاصه‌ای از مهم‌ترین مناطق دچار فرونشست در ایران را بر اساس داده‌های ماهواره‌ای و گزارش‌های میدانی نشان می‌دهد:

منطقه	نرخ فرونشست (cm/yr)	ویژگی‌های زمین‌شناسی و انسانی غالب	منبع
جنوب‌غرب تهران (شهریار، اسلامشهر)	۳۰–۳۶	برداشت شدید آب، تراکم بالای جمعیت و ساخت‌وساز	Haghighi et al., 2024
دشت اصفهان–برخوار	۲۵–۳۰	لایه‌های ضخیم رس، افت شدید سطح آب زیرزمینی	Goorabi, 2020
دشت مهیار (فارس)	۲۵	خاک‌های رسی و تبخیر بالا	Sadeghi et al., 2023
دشت ورامین	۲۰–۲۵	کشاورزی فشرده و چاه‌های عمیق	Motagh et al., 2008
کرمان و رفسنجان	۱۵–۲۰	برداشت آب برای باغ‌های پسته	Radman et al., 2021
دشت مشهد	۱۰–۱۵	توسعه شهری سریع، افت سطح ایستابی	Noori et al., 2023

این داده‌ها نشان می‌دهد که مناطق پرجمعیت و کشاورزی‌محور کشور بیش‌ترین آسیب را از پدیده فرونشست متحمل می‌شوند.

۳.۲ تحلیل مکانی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

پیشرفت فناوری‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و داده‌های ماهواره Sentinel-1 وALOS-PALSAR ، امکان رصد دقیق فرونشست را در مقیاس ملی فراهم کرده است. مطالعات اخیر Haghighi et al. (2024) در مجله *Science Advances* با استفاده از ۹ سال داده ماهواره‌ای نشان داده‌اند که در بیش از ۶۰ دشت ایران، روند فرونشست شتاب‌دار است و در برخی نقاط نرخ نشست ماهانه به ۴ تا ۵ سانتی‌متر نیز می‌رسد.

تحلیل‌های مکانی نشان می‌دهد که نرخ نشست بیشترین همبستگی را با تراکم چاه‌ها و افت سطح ایستابی دارد. در مناطق با بیش از ۵۰ چاه در هر کیلومتر مربع، نرخ فرونشست به‌طور متوسط دو تا سه برابر سایر مناطق است.[۵] افزون بر این،

داده‌های گرادیان نشست نشان می‌دهد که فرونشست معمولاً در حاشیه شهرها و نواحی کشاورزی شدت بیشتری دارد، زیرا همزمان تحت تأثیر بارگذاری سازه‌ای و پمپاژ مداوم آب قرار دارند .[۴]

مطالعه Noori et al. (2023) در مجله *Nature Communications* با مدل‌سازی تغییرات تغذیه آبخوان‌ها، نشان داد که کاهش نرخ تغذیه سالانه حدود ۲.۶ میلیارد مترمکعب در سراسر کشور، رابطه مستقیم با افزایش سرعت نشست دارد. مناطق دارای کاهش تغذیه بیش از ۵۰ درصد، همزمان بیشترین نرخ نشست را تجربه کرده‌اند.

۳.۳غییرات زمانی و روندهای بلندمدت

تحلیل‌های زمانی بلندمدت نشان می‌دهد که روند فرونشست در ایران نه‌تنها ادامه دارد، بلکه در برخی مناطق شتاب‌دار (Accelerating)است. مناطق جنوبی تهران که در سال ۲۰۱۰ حدود ۱۵ سانتی‌متر نشست داشتند، در سال ۲۰۲۲ به بیش از ۳۵ سانتی‌متر در سال رسیده‌اند.

Motagh et al. (2008) نیز پیش‌تر هشدار داده بودند که اگر سیاست‌های برداشت آب اصلاح نشود، نشست در دشت‌های مرکزی ایران می‌تواند به سطح بحرانی برسد. متأسفانه، روند دهه اخیر نشان می‌دهد که این پیش‌بینی تحقق یافته است.

نقشه‌های مقایسه‌ای InSAR بین سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که وسعت مناطق دارای نشست بیشتر از ۵ سانتی‌متر در سال، از ۵۵ هزار کیلومتر مربع به بیش از ۱۰۰ هزار کیلومتر مربع افزایش یافته است.[۲] این گسترش فضایی بیانگر تشدید بحران در سراسر کشور است.

۳.۴مبستگی فرونشست با افت سطح ایستابی

رابطه میان افت سطح ایستابی و فرونشست زمین در اغلب مناطق ایران کاملاً اثبات‌شده است. به‌عنوان نمونه، در دشت اصفهان–برخوار، افت میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی حدود ۱.۲ متر گزارش شده که منجر به نرخ فرونشست سالانه ۲۷ سانتی‌متر شده است.[۶]

در دشت رفسنجان، کاهش ۳۵ متری سطح ایستابی در سه دهه گذشته با نشست تجمعی بیش از ۲.۵ متر همراه بوده است. در دشت ورامین و جنوب تهران نیز نشان داده‌اند که هر متر افت سطح آب زیرزمینی، به‌طور میانگین معادل ۱ تا ۱.۲ سانتی‌متر نشست سطح زمین است .

این ارتباط مستقیم میان تراز آب زیرزمینی و فرونشست، اهمیت کنترل برداشت آب و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها را در سیاست‌های مدیریتی کشور دوچندان می‌کند.[۳]

۳.۵پیامدهای منطقه‌ای و خطرات بالقوه

گسترش فرونشست در ایران پیامدهای گسترده‌ای دارد. در مناطق شهری مانند تهران و اصفهان، نشست زمین منجر به شکاف در جاده‌ها، لوله‌های انتقال آب و گاز، و ترک در ساختمان‌ها شده است. در اصفهان، فرونشست به‌طور مستقیم بناهای تاریخی را تهدید می‌کند؛ از جمله ترک‌های ساختاری در مسجد جامع و میدان نقش‌جهان که در مطالعات میدانی سال‌های اخیر ثبت شده‌اند.[۶]

در دشت‌های کشاورزی، نشست زمین باعث کاهش نفوذپذیری خاک، شور شدن اراضی، و کاهش بهره‌وری کشاورزی می‌شود. افزون بر آن، خطر بروز شکاف‌های سطحی طولانی در نواحی روستایی، تهدیدی برای سکونت‌گاه‌ها و زیرساخت‌های محلی محسوب می‌شود.

بنابراین، فرونشست زمین در ایران تنها یک چالش زمین‌شناسی نیست، بلکه بحرانی چندوجهی با آثار اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی است که اگر کنترل نشود، می‌تواند امنیت زیستی و اقتصادی کشور را تهدید کند.[۲و۳]

۴. پیامد های فرونشست زمین

فرونشست زمین در ایران، نه‌تنها پدیده‌ای زمین‌شناسی بلکه بحرانی چندوجهی با آثار گسترده زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی است. پیامدهای آن در بسیاری از مناطق کشور، به‌ویژه دشت‌های پرجمعیت و دارای زیرساخت‌های حیاتی، بسیار چشمگیر است .

۴.۱ تخریب زیرساخت‌ها

یکی از مهم‌ترین و فوری‌ترین پیامدهای فرونشست زمین، آسیب به زیرساخت‌های حیاتی شهری و روستایی است. فرونشست باعث ایجاد تغییر شکل‌های موضعی و ترک‌های سطحی در جاده‌ها، پل‌ها، خطوط انتقال گاز و آب، و مسیرهای راه‌آهن می‌شود.[۱]

مطالعات تداخل‌سنجی در جنوب تهران، اصفهان و کرمان نشان داده‌اند که شکاف‌های ناشی از نشست تا عمق ۲ تا ۳ متر نیز گسترش یافته و در برخی مناطق موجب گسیختگی کامل جاده‌ها و لوله‌های انتقال گاز شده است. در مسیر راه‌آهن تهران–قم، تغییر شیب ناشی از نشست موجب افزایش خطر واژگونی قطارها شده است.[۴]

براساس گزارش سازمان زمین‌شناسی ایران(GSI, 2023) ، خسارات اقتصادی مستقیم ناشی از فرونشست به زیرساخت‌ها در سال ۱۴۰۱ بیش از ۴۰ هزار میلیارد تومان برآورد شده است. این خسارات شامل ترک در ساختمان‌ها، شکست خطوط لوله و تغییر شکل جاده‌ها است. در دشت اصفهان–برخوار، نشست سالانه حدود ۲۵ سانتی‌متر موجب تخریب مکرر مسیرهای آب‌رسانی و فاضلاب شهری شده است.[۶]

۴.۲ نابودی اراضی کشاورزی

فرونشست اثر عمیقی بر کیفیت و کارایی اراضی کشاورزی دارد. نشست زمین باعث فشردگی خاک، کاهش تخلخل و افت شدید نفوذپذیری می‌شود که در نتیجه بازده آبیاری کاهش می‌یابد. این امر باعث می‌شود حجم بیشتری از آب برای آبیاری مورد نیاز باشد و چرخه تخریب آبخوان‌ها تشدید گردد.[۳]

در برخی دشت‌ها مانند رفسنجان، ورامین و مهیار فارس، فرونشست با افزایش شوری خاک همراه بوده است. فشردگی لایه‌های زیرسطحی مانع نفوذ عمقی آب و موجب تبخیر سطحی بالا می‌شود که در نهایت املاح محلول در خاک تجمع می‌یابد. نتیجه این فرآیند، کاهش حاصلخیزی، ترک خوردن زمین و از بین رفتن زمین‌های زراعی است.

براساس گزارش وزارت جهاد کشاورزی (۲۰۲۲)، بیش از ۱.۲ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی کشور به درجات مختلفی تحت تأثیر نشست زمین قرار گرفته‌اند و حدود ۲۵۰ هزار هکتار از این اراضی عملاً از چرخه تولید خارج شده‌اند.[۴]

۴.۳تهدید بناهای تاریخی و فرهنگی

شهرهای تاریخی ایران که بر بستر دشت‌های آبرفتی قرار گرفته‌اند، به‌طور ویژه در معرض خطر فرونشست هستند. در اصفهان، مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که ترک‌های ساختاری در بناهای ارزشمند مانند مسجد جامع، میدان نقش‌جهان، پل خواجو و سی‌وسه‌پل در حال گسترش است. بررسی‌های ژئوتکنیکی در سال ۲۰۲۲ نشان داد که میزان نشست تجمعی در اطراف مسجد جامع به بیش از ۴۵ سانتی‌متر رسیده است.[۲]

در کاشان، ری و نیشابور نیز آثار تاریخی همچون گنبدها و کاروانسراهای تاریخی دچار ترک‌های طولی شده‌اند. از آنجا که این بناها معمولاً فاقد پی عمیق هستند، نشست ناهمگن زمین به‌سرعت موجب تخریب سازه‌ای می‌شود. تهدید این آثار نه‌تنها میراث فرهنگی کشور را در معرض خطر قرار می‌دهد، بلکه به کاهش جذابیت گردشگری و پیامدهای اقتصادی آن منجر می‌شود.

۴.۴خطرات اجتماعی و مهاجرت

فرونشست زمین پیامدهای مستقیم اجتماعی دارد. نابودی اراضی کشاورزی و کاهش دسترسی به منابع آب زیرزمینی موجب افت درآمد کشاورزان و افزایش فقر روستایی می‌شود.[۳] در مناطق بحرانی مانند دشت ورامین، مهیار و رفسنجان، بسیاری از خانوارهای کشاورز در دهه اخیر ناچار به ترک زمین و مهاجرت به شهرها شده‌اند.

این روند مهاجرتی به‌ویژه به افزایش حاشیه‌نشینی در کلان‌شهرها مانند تهران، اصفهان و مشهد انجامیده است. رشد سریع جمعیت حاشیه‌نشین، فشار بر منابع شهری، خدمات عمومی و اشتغال را افزایش داده و پیامدهای اجتماعی و امنیتی گسترده‌ای به دنبال دارد.

علاوه بر آن، تخریب زیرساخت‌ها و آثار تاریخی، موجب کاهش حس تعلق و رضایت اجتماعی در میان ساکنان مناطق آسیب‌دیده شده است. تداوم این روند می‌تواند موجب تغییر الگوی سکونت، کاهش سرمایه اجتماعی و در نهایت تهدید پایداری اجتماعی مناطق مرکزی کشور شود.[۲]

۴.۵پیامدهای زیست‌محیطی

فرونشست زمین تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های طبیعی دارد. فشردگی لایه‌های زمین منجر به کاهش دائمی ظرفیت ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌شود، به‌طوری‌که حتی با افزایش بارندگی یا اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، بخشی از ظرفیت از دست رفته قابل بازگشت نیست.[۳] در دشت‌های ایران، به‌ویژه در مناطق مرکزی، این پدیده باعث از بین رفتن سفره‌های کم‌عمق، شور شدن خاک و کاهش حاصلخیزی اراضی شده است.[۴]

از دیگر آثار زیست‌محیطی، افزایش فرسایش بادی و آبی است. نشست ناهمگون سطح زمین موجب ایجاد ترک‌ها و شکاف‌های عمیق در خاک می‌شود که در مناطق خشک، بستری برای نفوذ جریان‌های سطحی و تشدید فرسایش فراهم می‌کند. همچنین تغییر در ساختار زمین‌سطحی بر الگوهای زهکشی طبیعی اثر می‌گذارد و می‌تواند موجب سیلاب‌های موضعی یا تغییر مسیر آبراهه‌ها شود.[۲]

۴.۶پیامدهای اقتصادی

خسارات اقتصادی ناشی از فرونشست زمین بسیار گسترده است. در مناطق شهری، نشست منجر به آسیب به زیرساخت‌ها، خطوط انتقال آب، فاضلاب، گاز و شبکه‌های ریلی و جاده‌ای می‌شود.[۱] براساس گزارش سازمان زمین‌شناسی ایران(2023) ، خسارات سالانه ناشی از فرونشست در کشور بیش از ۵ میلیارد دلار برآورد می‌شود که بخش اعظم آن مربوط به تخریب زیرساخت‌های شهری و کاهش بهره‌وری کشاورزی است.

در دشت‌های کشاورزی، فشردگی خاک سبب کاهش نفوذپذیری و تهویه خاک شده و در نتیجه، راندمان تولید محصولات زراعی کاهش می‌یابد. به‌ویژه در دشت‌های اصفهان، رفسنجان و ورامین، نشست زمین منجر به افت عملکرد سالانه محصولات و از بین رفتن بخشی از زمین‌های زراعی شده است.[۴و۶]

۵. راهکارهای مقابله با فرونشست زمین

پدیده فرونشست زمین در ایران یک بحران چندبعدی است که ریشه در مدیریت ناپایدار منابع آب و تغییرات اقلیمی دارد. مقابله با این پدیده نیازمند رویکردی جامع، بین‌رشته‌ای و مبتنی بر داده است که هم عوامل طبیعی و هم عوامل انسانی

را هدف قرار دهد.[۲و۳] در این بخش، مجموعه‌ای از مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی، فنی و اجتماعی برای کنترل و کاهش فرونشست زمین در ایران تشریح می‌شود.

۵.۱.مدیریت یکپارچه منابع آب

الف) تعیین سقف برداشت مجاز برای هر دشت

یکی از نخستین گام‌ها برای کنترل فرونشست، تعیین ظرفیت مجاز برداشت آب زیرزمینی در هر دشت بر اساس بیلان واقعی آبخوان است. در حال حاضر، بیش از ۶۰ درصد از دشت‌های ایران در وضعیت بحرانی اضافه‌برداشت قرار دارند[۸] تدوین و اجرای «برنامه بیلان آبخوان‌ها» با استفاده از داده‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری‌های میدانی، می‌تواند از ادامه افت سطح ایستابی جلوگیری کند.[۳]

ب) نصب کنتورهای هوشمند بر چاه‌ها

نصب کنتورهای هوشمند حجمی بر روی چاه‌های کشاورزی و صنعتی یکی از ابزارهای کلیدی کنترل برداشت است. این سیستم‌ها امکان نظارت بر مصرف، اعمال محدودیت‌های دوره‌ای و جریمه برداشت مازاد را فراهم می‌کنند.[۴] تجربه اجرای این طرح در دشت مهیار و ورامین نشان داده است که کنترل هوشمند توانسته تا ۲۰ درصد از میزان برداشت سالانه آب زیرزمینی را کاهش دهد.[۷]

ج) جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز

طبق برآورد وزارت نیرو، حدود ۳۵۰ هزار حلقه چاه غیرمجاز در ایران فعال است.[۸] شناسایی، انسداد و مسدودسازی این چاه‌ها از طریق سامانه‌های مکان‌محور (GIS) و تصاویر پهپادی، از مهم‌ترین اقدامات پیشگیرانه است. همکاری بین دستگاه‌های اجرایی (وزارت نیرو، جهاد کشاورزی و استانداری‌ها) برای اجرای هماهنگ این طرح ضروری است.

۵.۲.تغییر الگوی کشت و افزایش بهره‌وری آبیاری

الف) جایگزینی محصولات کم‌آب‌بر

بخش کشاورزی عامل اصلی افت آب‌های زیرزمینی است؛ حدود ۸۵ درصد از کل برداشت آب کشور در این بخش انجام می‌شود. جایگزینی محصولات پرآب‌بر مانند برنج، هندوانه و ذرت با محصولات مقاوم به خشکی مانند زعفران، پسته، کلزا و گیاهان دارویی می‌تواند به میزان قابل توجهی از فشار بر منابع زیرزمینی بکاهد.[۵]

ب) استفاده از روش‌های نوین آبیاری

به‌کارگیری روش‌های آبیاری کارآمد مانند آبیاری قطره‌ای، زیرسطحی و تیپ، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، موجب بهبود توزیع رطوبت در خاک و کاهش فشردگی آن می‌شود. این روش‌ها با حمایت مالی دولت و ارائه یارانه به کشاورزان می‌تواند به‌صورت گسترده اجرا گردد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که با اجرای این روش‌ها، مصرف آب کشاورزی تا ۴۰ درصد کاهش و راندمان آبیاری تا ۹۰ درصد افزایش می‌یابد.[۴]

۵.۳.تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی

الف) احداث سدهای زیرزمینی و بندهای خاکی

تغذیه مصنوعی یکی از مهم‌ترین راهکارهای فنی برای احیای آبخوان‌هاست. ساخت سدهای زیرزمینی و بندهای خاکی در مسیر رودخانه‌های فصلی موجب ذخیره رواناب‌ها و نفوذ آب به سفره‌ها می‌شود. در استان فارس و یزد، اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی موجب افزایش سطح ایستابی بین ۰٫۵ تا ۱ متر در سال شده است .[۶]

ب) هدایت آب‌های سطحی به مناطق دارای نشست شدید

در مناطق بحرانی مانند ورامین، دشت اصفهان و مهیار، می‌توان از آب‌های سطحی ناشی از سیلاب‌ها برای نفوذ کنترل‌شده به زمین استفاده کرد. طراحی سیستم‌های پخش سیلاب و حوضچه‌های نفوذ مصنوعی می‌تواند همزمان باعث کاهش خطر سیل و بهبود تغذیه آبخوان شود.[۲]

۵.۴.نظارت و هشدار زودهنگام

الف) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سامانه‌های هشدار سریع

پایش مداوم تغییرات سطح زمین با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری(InSAR) ، ماهواره Sentinel-1 و سیستم‌های GNSS امکان تشخیص نرخ نشست را با دقت میلی‌متری فراهم می‌کند. توسعه سامانه‌های هشدار سریع فرونشست مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند تصمیم‌گیران را از روندهای خطرناک مطلع سازد و اقدامات فوری پیشگیرانه را ممکن کند.[۴]

ب) تشکیل پایگاه داده ملی فرونشست

تجمیع داده‌های حاصل از سنجش از دور، مشاهدات میدانی و گزارش‌های محلی در قالب یک پایگاه داده ملی یکپارچه از ضروریات مدیریت این بحران است. چنین سامانه‌ای باید شامل نقشه‌های خطر، شاخص‌های آسیب‌پذیری، داده‌های چاه‌ها و تغییرات سطح آب زیرزمینی باشد. ایجاد این بانک داده، همکاری مؤثر بین دانشگاه‌ها، سازمان زمین‌شناسی، وزارت نیرو و سازمان فضایی ایران را می‌طلبد.[۷]

۵.۵.آموزش و آگاهی‌بخشی عمومی

الف) ترویج فرهنگ مصرف بهینه آب

یکی از مؤثرترین اقدامات بلندمدت، تغییر نگرش عمومی نسبت به مصرف آب است. از طریق آموزش‌های رسانه‌ای، برنامه‌های مدارس، و تشویق کشاورزان به رعایت الگوهای بهینه مصرف می‌توان الگوی رفتاری جامعه را اصلاح کرد.[۳]

ب) اطلاع‌رسانی درباره عواقب فرونشست

آگاهی مردم درباره خطرات فرونشست برای سکونت‌گاه‌ها، تأسیسات و آثار تاریخی هنوز بسیار پایین است. ایجاد برنامه‌های اطلاع‌رسانی محلی در شهرهای آسیب‌پذیر مانند اصفهان، ورامین و رفسنجان می‌تواند مشارکت مردمی را در طرح‌های کنترل فرونشست افزایش دهد. رسانه‌های ملی و شبکه‌های اجتماعی نقش کلیدی در تبیین ابعاد اقتصادی و اجتماعی این بحران دارند.

۶. نتیجه گیری

فرونشست زمین در ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بحران‌های زمین‌شناسی و زیست‌محیطی کشور مطرح است و نتیجه تعامل عوامل طبیعی و انسانی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، برداشت بی‌رویه منابع آب برای کشاورزی و صنعت، و تغییرات اقلیمی باعث فشرده شدن رسوبات زیرسطحی و نشست ناهمگون زمین شده است.[۲و۳] این روند در دشت‌های مرکزی، جنوبی و شرقی کشور، به‌ویژه در مناطقی مانند ورامین، رفسنجان و اصفهان، به سطح بحرانی رسیده و پیامدهای آن به شکل تخریب زیرساخت‌ها، کاهش حاصلخیزی اراضی کشاورزی، تهدید آثار تاریخی و افزایش فشارهای اجتماعی و مهاجرت روستاییان بروز کرده است.[۴و۶]

مطالعات نشان می‌دهد که پیامدهای فرونشست نه‌تنها ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی دارد، بلکه تهدید جدی برای پایداری اجتماعی و فرهنگی مناطق آسیب‌دیده نیز محسوب می‌شود. خسارت‌های ناشی از ترک و نشست ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها، خطوط انتقال آب و گاز و همچنین تخریب بناهای تاریخی موجب افزایش هزینه‌های اقتصادی و کاهش کیفیت زندگی ساکنان شده است.[۵]

راهکارهای مقابله با فرونشست زمین در ایران نیازمند رویکردی جامع و یکپارچه است .مدیریت منابع آب، تغییر الگوی کشت و بهره‌وری آبیاری، تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی، ایجاد سامانه‌های پایش و هشدار سریع و آموزش و آگاهی‌بخشی عمومی از جمله اقداماتی هستند که می‌توانند نرخ فرونشست و پیامدهای آن را کاهش دهند. استفاده از فناوری‌های نوین مانند تصاویر ماهواره‌ای InSAR و پایش GNSS امکان پیش‌بینی و مدیریت بحران را فراهم می‌کند، در حالی که مشارکت مردم و ترویج مصرف بهینه آب، تضمین کننده اجرای پایدار این اقدامات است.

در نهایت، جمع‌بندی مطالعات و تجربیات میدانی نشان می‌دهد که بدون اجرای سیاست‌های علمی و مدیریت یکپارچه، فرونشست زمین می‌تواند به اصلی‌ترین تهدید زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی ایران در دهه‌های آینده تبدیل شود. بنابراین، اتخاذ سیاست‌های ملی و منطقه‌ای مبتنی بر داده‌های علمی، حفاظت از منابع آب، ارتقای آگاهی عمومی و مشارکت جامعه در مدیریت منابع طبیعی، برای کاهش شدت و آثار فرونشست، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

۷. منابع

1.Motagh, M., et al. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water-reservoir overexploitation. Geophysical Research Letters, 35(16), L16403. https://doi.org/10.1029/2008GL033814Atluri, S.N. and Shen, S. (2002),"*The Meshless Local Petrov–Galerkin (MLPG) Method",* Tech Science Press, USA.

2.Haghighi, M. H., Motagh, M., & colleagues. (2024). A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. Science Advances, 10(3), eadk3039. https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039

3.Noori, R., et al. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. Nature Communications, 14, 7241. https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2

4.Sadeghi, H., et al. (2023). Assessing the vulnerability of Iran to subsidence hazard using a hierarchical FUCOM–GIS framework. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 31, 100989. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100989

5.Radman, A., et al. (2021). Integrating InSAR and deep learning for land subsidence modelling and prediction in Iran. Journal of Applied Remote Sensing, 15(2), 024511. https://doi.org/10.1117/1.JRS.15.024511

6.Goorabi, A. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its analysis using PS-InSAR. Remote Sensing Journal, 12(4), 445–458.

7.GSI (Geological Survey of Iran). (2023). National subsidence hazard report. Tehran: Geological Survey of Iran.

8.Ministry of Energy. (2023). Annual report on groundwater resources and extraction in Iran. Tehran: Department of Water Affairs.