وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

گزارش تحلیلی

تحلیلی بر فرونشست زمین در ایران؛
(مفاهیم، علل، پیامدها و راهبردهای پایش و کنترل)

شماره ثبت: ۶۹۰۸۴

تاریخ:۱۴۰۴/۱۲/۲۵

جمهوری اسلامی ایران

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

گزارش تحلیلی:

تحلیلی بر فرونشست زمین در ایران؛

(مفاهیم، علل، پیامدها و راهبردهای پایش و کنترل)

پژوهش و نگارش:

نادر عباسی و فرشید تاران

شماره ثبت: ۶۹۰۸۴

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

عنوان گزارش: تحلیلی بر فرونشست زمین در ایران؛ (مفاهیم، علل، پیامدها و راهبردهای پایش و کنترل)

نگارش: نادر عباسی و فرشید تاران

درخواست کننده: معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

محل اجراء: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تاریخ شروع: ۱۴۰۳/۱۰/۱

مدت اجرا: یک سال

ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

شمـارگان (تیراژ): –

سال انتشار: ۱۴۰۴

این اثر به شماره ۶۹۰۸۴ مورخ ۱۴۰۴/۱۲/۲۵ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع رسانی کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به ثبت رسیده است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
۱- مقدمه	۲
۲- ابعاد و انواع فرونشست	۶
۲-۱- فروچاله	۶
۲-۲- فرونشست ناحیه‌ای	۷
۲-۳- ایجاد شکاف در زمین	۹
۳- مبانی نظری و چگونگی وقوع فرونشست	۱۱
۴- علل و عوامل ایجاد فرونشست	۱۶
۴-۱- عوامل طبیعی زمین‌شناسی	۱۶
۴-۱-۱-کارست (انحلال سنگ‌های آهکی و تبخیری)	۱۶
۴-۱-۲- اکسیداسیون خاک‌های آلی (تورب)	۱۷
۴-۱-۳- حرکات تکتونیک	۱۷
۴-۲- عوامل انسان‌زاد	۱۸
۴-۲-۱- برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی	۱۸
۴-۲-۲- استخراج نفت و گاز	۲۲
۴-۲-۳- فعالیت‌های معدن‌کاری	۲۳
۴-۲-۴- توسعه شهری و ساخت و ساز	۲۴
۵- سابقه و نرخ فرونشست در ایران و جهان	۲۵
۵-۱- وضعیت جهانی فرونشست زمین	۲۵
۵-۲- سابقه پایش و بررسی نرخ فرونشست در ایران	۲۷
۶- روش‌های اندازه‌گیری و پایش فرونشست	۳۳
۶-۱- ابزارهای مستقیم یا مسّاحی زمینی	۳۳
۶-۱-۱- ترازیابی دقیق	۳۴
۶-۱-۲- استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی، GPS	۳۵
۶-۱-۳- استفاده از کشش‌سنج‌های گمانه‌ای (اکستنسومترها)	۳۶
۶-۱-۴- پیزومترها	۳۸
۶-۱-۵- استفاده از فشارسنج‌ها و انحراف‌سنج‌ها	۳۹
۶-۲- روش‌های سنجش از دور	۳۹
۶-۲-۱- تداخل‌سنجی راداری	۴۰
۶-۲-۲- استفاده از سنسورهای فیبر نوری	۴۲
۶-۲-۳- روش‌های تلفیقی	۴۲
۷- اثرات و پیامدهای فرونشست	۴۴
۷-۱- اثرات سازه‌ای و زیرساختی	۴۴
۷-۲- اثرات هیدروژئولوژیکی	۴۵
۷-۳- پیامدهای میراث فرهنگی و تاریخی	۴۵
۷-۴- پیامدهای کشاورزی و زیست‌محیطی	۴۶
۷-۵- پیامدهای اجتماعی و اقتصادی	۴۶
۸- راهکارهای احیای مناطق دچار فرونشست	۴۸
۸-۱- اقدامات کنترلی (پیش‌گیرانه)	۴۸

۸-۱-۱- کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی ۴۹
۸-۱-۲- تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها ۴۹
۸-۱-۳- اصلاح الگوی کشاورزی ۵۰
۸-۱-۴- پایش و هشدار سریع ۵۰
۸-۱-۵- کاهش بارگذاری و مدیریت توسعه شهری ۵۱
۸-۲- اقدامات سازگارانه و اصلاحی ۵۱
۸-۲-۱- مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و سازه‌ها ۵۱
۸-۲-۲- تثبیت و خواص ژئوتکنیکی بستر سازه ها ۵۲
۸-۲-۳- تدوین مقررات ملی فرونشست ۵۲
۸-۲-۴- ترمیم و بازسازی مناطق آسیب‌دیده ۵۳
۸-۲-۵- ایجاد نهاد متولی واحد ۵۳
۸-۲-۶- اقدامات فرهنگی، آموزشی و اجتماعی ۵۴
۹- جمع بندی و تحلیل نتایج ۵۵
فهرست منابع ۵۸
چکیده انگلیسی ۶۲

چکیده

فرونشست پدیده‌ای است که عمدتا به‌صورت نشست تدریجی و گسترده سطح زمین و در برخی موارد، به‌صورت فروریزش‌های ناگهانی و موضعی بروز یافته و پیامدهای عمیق، بلندمدت و غالبا برگشت‌ناپذیری بر زیرساخت‌های شهری و روستایی، اراضی کشاورزی، منابع آب زیرزمینی، سازه‌های حیاتی و میراث تاریخی برجای می‌گذارد. در این گزارش، ضمن تبیین مفاهیم و مبانی اولیه مرتبط با فرونشست، شکل‌های مختلف بروز آن، دلایل و مکانیزیم‌های وقوع، روش‌های پایش و اندازه‌گیری و نیز پیامدهای فنی، اقتصادی و اجتماعی آن تشریح گردیده است. سپس، با بررسی و تحلیل مطالعات و پژوهش‌های انجام شده در سطح ملی و بین‌المللی، وضعیت فعلی فرونشست در دشت‌ها و مناطق مختلف ایران و روند پیشرفت آن مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. در مجموعه‌ای از راهبردهای کنترل و احیای مناطق دچار فرونشست در قالب مدیریت برداشت آب زیرزمینی، اصلاح الگوی مصرف و کشت، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، مدیریت توسعه شهری، اقدامات ژئوتکنیکی، تقویت پایش و پژوهش و ارتقای آگاهی عمومی ارائه شده است. بر این اساس، اتخاذ رویکرد ملی، بلندمدت، بین بخشی و مبتنی بر حکمرانی پایدار منابع آب راهبرد اصلی و اساسی برای کنترل فرونشست در ایران معرفی شده است.

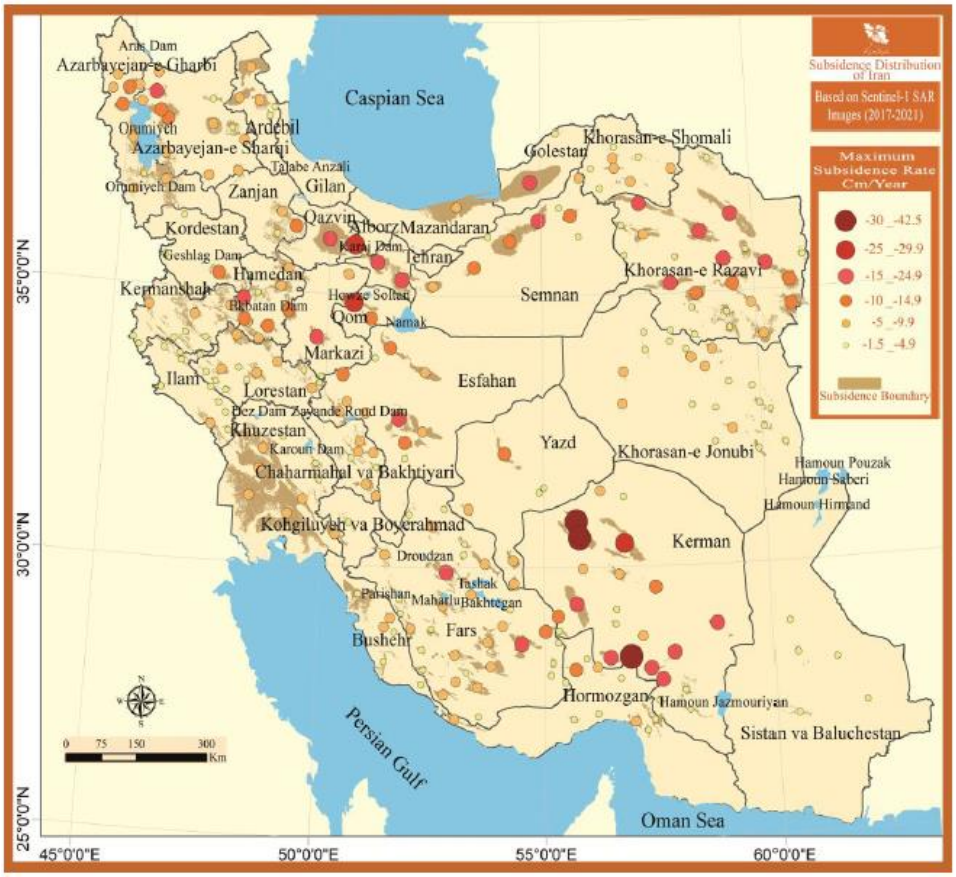
واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، پایش فرونشست، تحکیم خاک، فرونشست زمین، مدیریت آبخوان

۱- مقدمه

فرونشست زمین، یکی از مهم‌ترین مخاطرات ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی در بسیاری از مناطق جهان به‌شمار می‌رود که به‌صورت نشست تدریجی یا فروریزش ناگهانی سطح زمین در اثر فشردگی و کاهش حجم لایه‌های زیرسطحی رخ می‌دهد. اگرچه در ادبیات علمی، تفاوت اندکی در تعاریف ارائه شده توسط سازمان‌های بین‌المللی دیده می‌شود، اما همگی بر یک ویژگی مشترک مبنی بر پایین‌رفت تدریجی یا ناگهانی سطح زمین در اثر فرآیندهای طبیعی یا فعالیت‌های انسانی اتفاق نظر دارند. طبق تعریف موسسه زمین‌شناسی آمریکا، فرونشست زمین، ناشی از حرکت خاک‌های زیرسطحی بوده و می‌تواند همراه با جابه‌جایی افقی نیز باشد. یونسکو نیز آن را فروریزش یا نشست وسیع سطح زمین می‌داند که عمدتا به‌صورت حرکتی قائم رو به پایین رخ می‌دهد که از زمین‌لغزش‌ها، به‌دلیل وجود بردار حرکتی افقی قابل توجه در آنها، متمایز است (Poland, 1984). در تعریفی جامع‌تر، فرونشست رویدادی است که به‌صورت تغییر شکل یا نشست توده خاک در هر جهتی تحت بارگذاری‌های گوناگون خارجی، تنش داخلی و فاکتورهای زیست‌محیطی نامتعادل ایجاد می‌شود. سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده، فرونشست را نشست تدریجی یا فروریزش ناگهانی سطح زمین به‌دلیل برداشت یا جابه‌جایی مواد زیرسطحی تعریف کرده و گزارش می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد موارد فرونشست در آمریکا ناشی از برداشت آب زیرزمینی است، در حالی که سایر عوامل، مانند معدن‌کاری و فرآیندهای طبیعی نیز نقش دارند. عوامل ایجاد کننده و یا تسهیل کننده وقوع فرونشست بسیار متنوع و شامل دو گروه کلی عوامل طبیعی و عوامل انسانی با مکانیزیم متفاوت هستند. انحلال سنگ‌های کربناته و تبخیری، تراکم طبیعی رسوبات، ذوب یخ‌های دائمی و حرکات آرام پوسته از جمله عوامل طبیعی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، فعالیت‌های معدن‌کاری، استخراج نفت و گاز وگسترش شهرنشینی نیز از عوامل انسانی این پدیده هستند. در این میان، افت سطح ایستابی سفره آب‌های زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه، مهم‌ترین و فراگیرترین منشا فرونشست محسوب می‌شود.

فرونشست زمین، پدیده‌ای جهانی است و نمونه‌های گسترده آن در مناطق مختلف دنیا گزارش شده است. در ایالات متحده بیش از ۲۷ هزار کیلومتر مربع از اراضی در ۴۵ ایالت تحت تأثیر این پدیده قرار دارد (Wu et al., 2008) و بیش از ۸۰ درصد از موارد گزارش‌شده، ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است (Galloway and Sneed, 2013). این آمار نشان می‌دهد که فرونشست نه‌تنها یک چالش محلی، بلکه مساله‌ای مرتبط با مدیریت ناپایدار منابع آب در سطح جهانی است. در ایران نیز، فرونشست به یکی از بحرانی‌ترین و جدی‌ترین بحران‌های زیست‌محیطی و زیرساختی سال‌های اخیر تبدیل شده است. به‌طوری‌که بیش از ۷۵۰ شهر و حدود ۴۰ میلیون نفر در معرض خطر هستند و نرخ فرونشست در برخی مناطق به ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در سال می‌رسد. مهم‌ترین علت وقوع فرونشست در دشت‌های ایران، افت شدید سطح آب زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه، خشکسالی‌های متوالی، گسترش صنایع و کشت محصولات پرآب‌بر گزارش است (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱؛ عابدینی، ۱۳۹۲). بر اساس گزارش‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، از مجموع ۶۰۹ دشت ایران، بیش از ۳۰۰ دشت با پدیده فرونشست مواجه هستند و پیش‌بینی می‌شود که با تکمیل مطالعات، بیش از ۸۰ درصد دشت‌های کشور درگیر فرونشست باشند (فاضلی، ۱۴۰۰). همچنین، بر اساس مطالعات سازمان نقشه برداری کشور، نقشه جامع فرونشست بر اساس داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ مطابق شکل ۱ تدوین شده است. در این مطالعه، ۲۵۴ پهنه فرونشست در ۳۰ استان کشور شناسایی شده‌اند. بر این اساس، در همه استان‌های کشور به‌جز استان گیلان، وقوع فرونشست گزارش شده است. به‌طوری‌که بالاترین نرخ فرونشست کشور مربوط به استان کرمان با نرخی بیش از ۴۰ سانتی‌متر در سال بوده است و پس از آن، به‌ترتیب استان‌های البرز، قم، تهران، گلستان، خراسان رضوی، همدان و مرکزی دارای نرخ فرونشست بیشینه بالاتر از ۱۷ سانتی‌متر در سال بوده‌اند.پراکنش فرونشست در سطح کشور بر حسب نرخ سالانه، طوری است که ۷ درصد مناطق دارای نرخ بیشینه فرونشست بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال، ۱۷ درصد دارای نرخ فرونشست بیشینه در محدوده ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال، ۳۳ درصد این مناطق دارای نرخ فرونشست بیشینه در محدوده ۵ تا ۱۰

سانتی‌متر در سال و ۴۳ درصد این مناطق دارای نرخ فرونشست بیشینه در محدوده ۲ تا ۵ سانتی‌متر در سال هستند. همچنین، از نظر مجموع مساحت مناطق درگیر فرونشست، استان خراسان رضوی بیشترین گستره فرونشست را دارد. پس از آن، استان‌های کرمان، فارس، خوزستان و گلستان رتبه‌های بعدی گستره مناطق تحت تأثیر فرونشست را دارند. همچنین، گسترده‌ترین پهنه فرونشست مربوط به استان‌های ساحلی گلستان، خوزستان و مازندران است (آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲).



شکل ۱- نقشه توزیع فرونشست در ایران(آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲)

از نظر تعداد مناطق فرونشست نیز استان کرمان بعد از استان فارس دارای رتبه دوم است که ۲۵ منطقه فرونشست در این استان شناسایی شده است که از این تعداد، ۱۰ منطقه با نرخ بیشینه فرونشست بیشتر از ۱۷سانتی‌متر در سال در وضعیت بسیار بحرانی از حیث نرخ و گرادیان فرونشست است. همچنین، ۶ منطقه با داشتن نرخ بیشینه فرونشست بین ۷ تا ۱۲ سانتی‌متر در سال در وضعیت بحرانی و ۹ منطقه نیز با داشتن نرخ بیشینه فرونشست کمتر از ۵ سانتی‌متر

در سال در مراحل اولیه شکل‌گیری فرونشست است که اعمال سیاست‌های مدیریت بهینه استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی می‌تواند مانع گسترش و بحرانی‌تر شدن آنها شود(آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲). با این حال، گسترش بی‌رویه این مخاطره، همراه با نبود مدیریت جامع منابع آب، توسعه نامتوازن کشاورزی و فشار جمعیتی، کنترل و کاهش آن را دشوار کرده است.

با توجه به ابعاد گسترده و پیامدهای متعدد فرونشست زمین، ضرورت شناخت دقیق سازوکارهای آن، تحلیل وضعیت موجود و ارائه راهکارهای موثر برای کاهش خسارات، بیش از پیش احساس می‌شود. در این گزارش سعی شده است که ضمن تبیین ماهیت و ساز وکارهای وقوع فرونشست و ارائه تصویری از وضعیت جهانی و ملی آن، پیشنهادهایی برای احیا، علاج‌بخشی و مدیریت مخاطرات فرونشست ارائه شود.

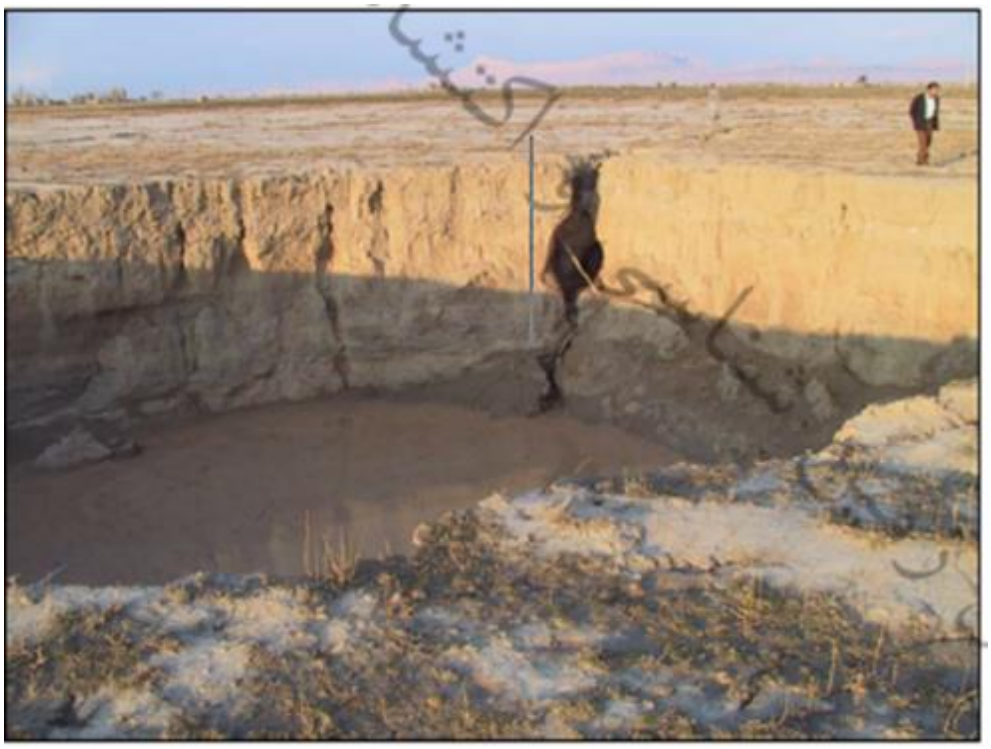
۲- ابعاد و انواع فرونشست

فرونشست بر اساس منشا، رفتار تنش-تغییرشکل، ظاهر جابه‌جایی سطح زمین و سرعت حرکت ذرات خاک قابل طبقه‌بندی است (عباس‌نژاد، ۱۴۰۱). این پدیده، بر اساس شکل وقوع، معمولا به سه صورت نقطه‌ای (فروچاله)، خطی (شکاف طولی) و ناحیه‌ای رخ می‌دهد.

۲-۱- فروچاله

در شکل نقطه‌ای آن که معمولا در یک محل با وسعت کم و عمق زیاد روی می‌دهد و از آن با عنوان فروچاله نیز یاد می‌شود، فرورفتگی بسیار عمیقی در یک نقطه خاص رخ می‌دهد. نمونه‌هایی از این نوع فروشست در شکل ۲ ارائه شده است. دلیل اصلی این نوع فرونشست، عمدتا انحلال موضعی لایه‌های زیرین خاک و یا اقدامات انسانی ناشی از حفاری‌های زیرزمینی مثل تونل و یا آبشستگی زیرزمینی ناشی از ورود ناخواسته و غیرمترقبه جریان شدید آن مثل ترکیدگی لوله آب و غیره است.





شکل ۲– فروچاله ایجاد شده در منطقه استان کرمان و دشت کبودرآهنگ و فامنین همدان

۲-۲- فرونشست ناحیه‌ای

فرونشست‌های ناحیه‌ای، مهم‌ترین، متداول‌ترین و مخرب‌ترین نوع فرونشست هستند که در سطح بسیار وسیعی مثل یک دشت و تا حدودی به‌صورت همگن اتفاق می‌افتند و اصطلاح کلی و برداشت عام از واژه فرونشست نیز همین نوع است. این نوع فرونشست به‌صورت آرام و پیش‌رونده اتفاق می‌افتد و عوارض ایجاد شده در آن به‌دلیل سرعت بسیار کم و وسعت بسیار زیاد به‌سادگی قابل رویت و تشخیص نیست، ولی با گذشت مدت زمان طولانی و مرور زمان، عوارض و اثرات آن در تمام زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی به‌صورت تخریب و آسیب‌های جدی به زیرساخت‌های شهری و روستایی، شکاف در سطح زمین، آسیب به سازه‌های تاریخی، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها، افزایش خطر سیل و تغییر در الگوهای زهکشی طبیعی نمایان می‌شود. از این نوع فرونشست، به‌دلیل گستردگی وسعت و شدت تخریب‌ها و آسیب‌های ایجاد شده، به‌عنوان «زلزله خاموش» یاد می‌شود. در شکل ۳- الف، نمونه‌ای از فرونشست همگن ناحیه‌ای که طی آن سطح زمین در منطقه‌ای در کالیفرنیا طی ۵۲ سال (از سال ۱۹۲۵ تا ۱۹۷۷) به‌میزان ۹ متر نشست داشته است، نشان داده شده است. همچنین، بالا آمدن

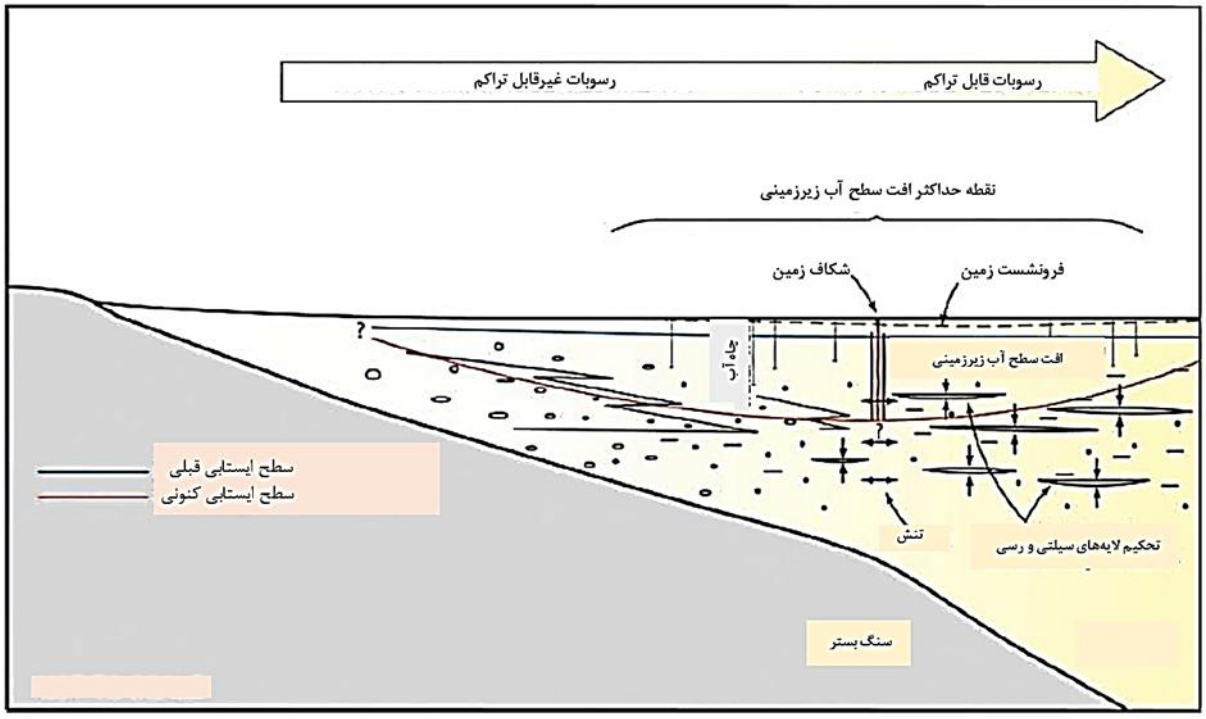
لوله‌های فلزی و کلاهک بتنی چاه در اثر فرونشست ناحیه‌ای در دشت نظرآباد، منطقه‌ای در هند و دشت فسا به‌ترتیب در شکل‌های ۳- ب، ۳- ج و ۳-د نشان داده شده‌اند.



شکل ۳– نمونه‌هایی از فرونشست ناحیه‌ای در مناطق مختلف جهان و ایران

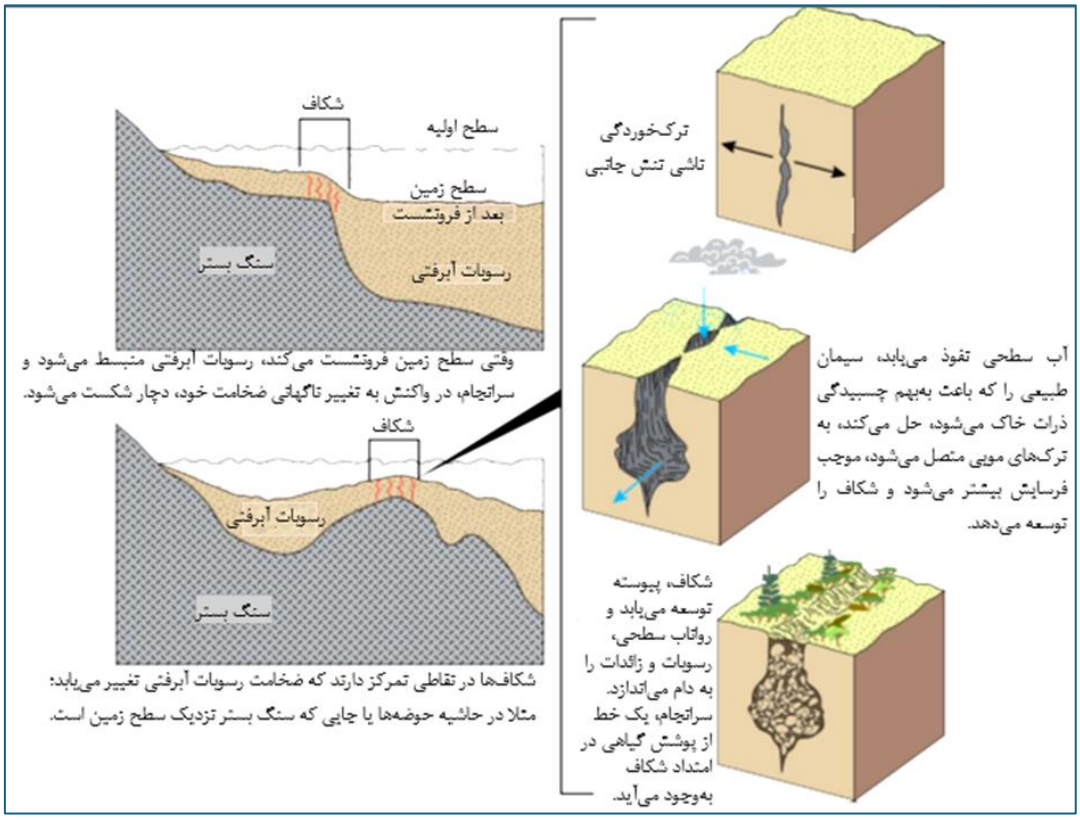
۲-۳- ایجاد شکاف در زمین

این پدیده، ممکن است در مقیاس‌های مختلف و به‌صورت همگن یا غیرهمگن بروز کند. در شرایطی که رسوبات و لایه‌های زیرسطحی از نظر نوع رسوبات تشکیل دهنده و نیز ابعاد سطحی و عمقی تا حدودی یکنواخت باشد، نشست سطح زمین نیز به‌صورت همگن و در سطح وسیع رخ می‌دهد که در چنین شرایطی، تشخیص آن دیرهنگام و آسیب به تاسیسات زیربنایی کمتر است، ولی در شرایطی که ضخامت بخشی از رسوبات زیرسطحی به‌دلیل قرار گرفتن در محدوده برآمدگی سنگ بستر یا ناحیه نزدیک به دامنه‌های کوهستانی نسبت به رسوبات در نواحی اطراف کمتر باشد، به‌دلیل اختلاف میزان نشست در دو ناحیه، نواحی کششی در مرز بین دو قسمت ایجاد و باعث کشیدگی در رسوبات فوقانی شده و به‌صورت شکاف‌هایی عمیق در سطح زمین نمایان می‌شود (شکل ۴).



شکل ٤– چگونگی ایجاد شکاف در زمین

افت غیرهمسطح آب زیرزمینی، متغیر بودن ضخامت لایه‌های تحکیم‌پذیر، ناهمگنی و تراکم متفاوت لایه‌ها به‌دلیل منشا پیدایش متفاوت و شکل غیرمسطح لایه تحکیم‌ناپذیر بستر موجب به‌وجود آمدن نشست‌های نامتوازن بر سطح زمین می‌شود. در مناطقی که نشست‌های نامتقارن به‌صورت قابل توجهی افزایش یابد، شکاف در سطح زمین[1] ایجاد می‌شود. در بسیاری از دشت‌های ایران، تفاوت ضخامت و تراکم‌پذیری رسوبات در مجاورت برآمدگی‌های سنگ بستر یا حاشیه کوهستانی، منجر به رخداد فرونشست تفاضلی و تشکیل زون‌های کششی می‌شود که در نهایت به ایجاد شکاف‌های عمیق فرونشستی در سطح زمین می‌انجامد(شکل ۵). نمونه‌هایی از آثار و پیامدهای ناشی از فرونشست زمین به‌شکل شکاف در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- شرایط مختلف مسبب فرونشست به‌صورت شکاف در سطح زمین

[1] Earth Fissure



شکل ٦- نمونه‌هایی از شکاف‌های عمیق در سطح زمین در اثر فرونشست در مناطق مختلف ایران

۳- مبانی نظری و چگونگی وقوع فرونشست

فرونشست زمین، نتیجه چند فرآیند فیزیکی و ژئوتکنیکی است که هرکدام سبب کاهش حجم لایه‌های زیرسطحی و در نهایت، پایین‌رفتن سطح زمین می‌شوند. به‌طور کلی، فرونشست زمین را می‌توان بر حسب منشا و علت وقوع به دو گروه اصلی، شامل عوامل طبیعی زمین‌شناسی و عوامل انسان‌زاد (استخراج آب، نفت، گاز، معدن و هیدروکربن، بارگذاری شهری) تقسیم‌بندی نمود. با این حال، مکانیزیم کاهش حجم لایه‌های زیرسطحی و به‌تبع آن نشست زمین در این دوگروه متفاوت است. مکانیزیم عوامل طبیعی، عمدتا ناشی از فرآیند فیزیکی طبیعی مثل انحلال لایه‌های سنگی و یا خاک‌های حاوی ذرات نمک، گچ، آهک و یا سایر املاح انحلال‌پذیر

در اثر تماس طولانی‌مدت با آب است و در مواردی نیز حرکات تکتونیکی زمین باعث ایجاد تغییراتی در سطح زمین می‌شود. مکانیزیم عوامل انسانی فرونشست که بخش عمده و اصلی این پدیده را شامل می‌شود، مبتنی بر تغییرات ایجاد شده در ترکیب فازهای تشکیل دهنده خاک (جامد، مایع و گاز) و افزایش تنش موثر بین دانه‌ای در اثر خروج سیال منفذی (آب، نفت و گاز) است. مکانیزیم و چگونگی تغییر تنش موثر و تغییر شکل‌ها در توده خاک بر اساس اصول و مبانی مقاومت مصالح و مکانیک خاک و خواص ژئوتکنیکی لایه‌های زمین قابل بررسی و ارزیابی است. در این بخش، مبانی نظری و مکانیزیم وقوع این نوع فرونشست به‌عنوان عامل اصلی بر اساس اصول و مبانی مقاومت مصالح و ژتوتکنیک ارائه می‌شود.

اصولا وقتی جسمی تحت بارهای خارجی قرار می‌گیرد، دچار دو نوع تغییر شکل الاستیک و پلاستیک (خمیری) می‌شود. تغییر شکل الاستیک، معمولا با برداشته شدن بار مجددا به حالت اولیه برمی‌گردد، ولی در نوع خمیری با حذف نیرو حالت اولیه جسم بازیابی نمی‌شود. در مورد خاک‌ها نیز که معمولا تغییر شکل‌ها به‌صورت نشست بروز داده می‌شود، همین موضوع صادق است، با این تفاوت که عمده تغییر شکل‌های ایجاد شده و یا نشست به‌صورت خمیری و یا غیرقابل برگشت است. از این رو، نشست ایجاد شده در خاک‌ها در قالب دو گروه کلی الاستیک یا آنی و نشست تحکیمی یا بلندمدت صورت می‌گیرد. نشست الاستیک خاک که بلافاصله پس از بارگذاری رخ می‌دهد و پس از باربرداری به حالت اولیه برمی‌گردد، بر اساس قوانین الاستیسیته و خواص الاستیک، مانند مدول الاستیسیه ضریب پواسون خاک ارزیابی می‌شود. نشست خمیری خاک در اثر کاهش حجم توده خاک، هم به‌واسطه کاهش منافذ خاک در اثر خروج هوا (تراکم[1]) و هم به‌واسطه کاهش منافذ خاک در اثر خروج آب منفذی (تحکیم[2]) اتفاق می‌افتد.میزان نشست خمیری خاک متاثر از عامل متعددی، مانند قابلیت فشردگی و تراکم‌پذیری خاک، ضخامت لایه خاک، تنش موثر اولیه و اختلاف تنش وارده بر خاک است.

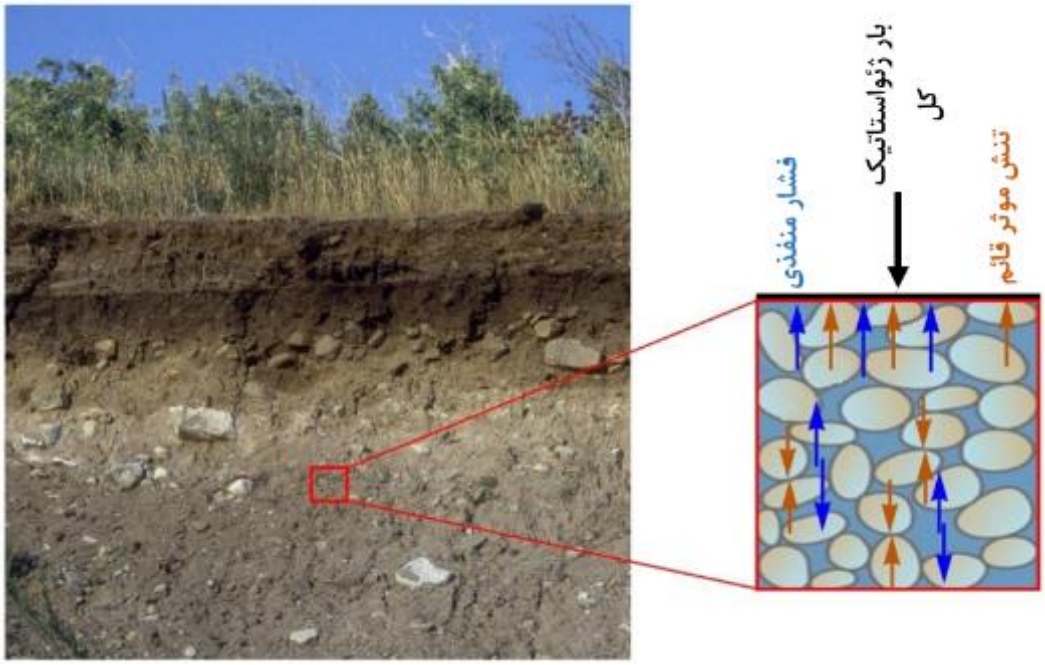
[1] compaction
[2] Consolidation

به‌طوریکه بدون ایجاد اختلاف تنش در خاک، تغییر شکل یا نشستی هم روی نمی‌دهد. بر اساس مبانی و اصول مکانیک خاک، تنش‌های وارده بر یک المان خاک، ناشی از وزن سربار و بارهای خارجی وارده از سازه‌های موجود (که تنش کل نامیده می‌شود) و فشار آب منفذی در آن نقطه است. با توجه به این‌که فشار آب منفذی در جهت عکس تنش کل عمل می‌کند، تنشی که به‌طور موثر به اسکلت خاک به‌صورت بین دانه‌ای وارد می‌شود(تنش موثر)، مطابق رابطه ۱ تفاضل تنش کل و فشارآب منفذی است.

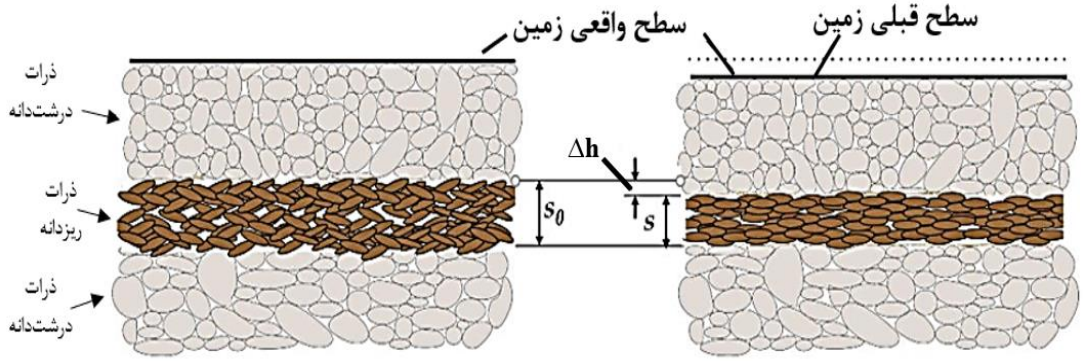
$$\sigma' = \sigma - u \qquad (۱)$$

که در آن، σ' تنش موثر، u فشار آب منفذی و σ تنش کل است.

از آن‌جاکه مقدار فشار آب منفذی در هر نقطه از محیط خاک متناسب با ارتفاع ستون آب در آن نقطه است ($u = \gamma h$)، با کاهش سطح آب زیرزمینی کاهش و تنش موثر وارده به دانه‌های خاک افزایش می یابد (شکل ۷). از این‌رو، زمانی‌که آب از یک آبخوان پمپاژ می‌شود، سطح آب زیر زمینی و به‌تبع آن، فشار آب منفذی کاهش می‌یابد که در نتیجه، بخش بیشتری از تنش کل به دانه‌های خاک وارد می‌شود (افزایش تنش موثر). در نتیجه، یک اختلاف تنشی($\Delta\sigma'$) بین تنش موثر وارده به المان خاک در قبل و بعد از افت سطح آب زیرمینی ایجاد می‌شود که این اختلاف تنش، باعث فشردگی لایه‌ها و نشست تحکیمی خاک زیرسطحی می‌شود. به‌مرور زمان، نشست ایجاد شده در لایه‌های زیرین به سطح زمین منتقل و به‌صورت فرونشست نمایان می‌شود(شکل ۸). البته هنگامی‌که آب از طریق تغذیه طبیعی یا تزریق مصنوعی وارد آبخوان شود، فشار آب منفذی می‌تواند افزایش یابد که در برخی شرایط، این افزایش ممکن است فرونشست را تا حدی کنترل کند یا کاهش دهد (Gambolati and Teatini, 2021).



شکل ۷- تحمل بار ژئواستاتیک کل توسط تنش موثر قائم و فشار آب منفذی (Gambolati and Teatini, 2021)



شکل ۸- تراکم خاک (Δh) در اثر کاهش تخلخل خاک (Gambolati and Teatini, 2021)

بر اساس نظریه تحکیم یک‌بعدی ترزاقی، مقدار نشست ناشی از تحکیم و نیز زمان رسیدن به مقدار معینی از نشست تحکیمی به‌ترتیب از روابط ۲ و ۳ به‌شرح زیر قابل تعیین هستند:

$$\Delta h = C_c \frac{H}{1+e_0} \ln \frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'} \quad (۲)$$

$$t = C_c \frac{TH^2}{C_v} \quad (۳)$$

که در آنها:

Δh= مقدار نشست ناشی از تحکیم،

Cc= نمایه فشردگی؛ که به ویژگی‌های خاک بستگی دارد.

e_0 = نسبت پوکی اولیه نمونه خاک،

H= ضخامت لایه خاک (این ضخامت، برای لایه‌هایی که از دو طرف زهکشی می‌شوند، نصف در نظر گرفته می‌شود.)

σ'= فشار سربار اولیه،

$\Delta\sigma'$= مقدار افزایش فشار ناشی از بارگذاری،

t= زمان ایجاد درصد معینی از تحکیم (نشست)،

T= عامل زمان برای درصد تحکیم مورد نظر که از جدول‌ها یا منحنی‌های مربوطه استخراج می‌شود،

cv= ضریب تحکیم است که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست می‌آید.

این نوع نشست، مهم‌ترین و گسترده‌ترین عامل فرونشست در ایران و بسیاری از نقاط جهان بوده و اساس آن بر افت سطح آب زیرزمینی و تغییر در تعادل تنش‌های خاک استوار است. وقتی آبخوان‌ها بیش از ظرفیت طبیعی خود برداشت می‌شوند، فشار منفذی (u) کاهش می‌یابد و در نتیجه، تنش موثر $(\sigma' = \sigma - u)$ افزایش پیدا می‌کند. این افزایش تنش موثر، باعث ایجاد تراکم (عمدتا در لایه‌های درشت‌دانه) و تحکیم در لایه‌های ریزدانه (رس و سیلت) می‌شود که اغلب دائمی و غیرقابل برگشت است. این تراکم، موجب کاهش ضخامت ستون رسوبی و نشست سطح زمین می‌شود. ویژگی مهم این ساز و کار، آن است که حتی پس از توقف برداشت، نشست ادامه می‌یابد، زیرا فرآیند تحکیم ثانویه و خزش در لایه‌های ریزدانه به‌صورت بلندمدت فعال باقی می‌ماند.

برداشت بی‌رویه آب از آبخوان‌ها طی سال‌های اخیر، باعث افت سریع و شدید سطح آب زیرزمینی و در نتیجه، تشدید و تسریع وقوع فرونشست در ایران شده است. دشت‌های تهران، کرج و رفسنجان، نمونه‌های بارز این نوع فرونشست هستند که نرخ فرونشست آنها به ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر در سال رسیده است. در سطح جهانی، مکزیکوسیتی و سان‌واکین در کالیفرنیا نمونه‌های مشهور هستند.

٤- علل و عوامل ایجاد فرونشست

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، علت و عوامل متعددی باعث وقوع فرونشست می‌شوند که در قالب دوگروه کلی عوامل طبیعی زمین‌شناسی، شامل انحلال، اکسیداسیون و حرکات تکتونیکی زمین و عوامل انسان‌زاد، شامل استخراج آب، نفت، گاز، معدن و هیدروکربن و بارگذاری شهری تقسیم‌بندی می‌شوند. این عوامل به‌تفکیک به‌شرح زیر هستند:

٤-١- عوامل طبیعی زمین‌شناسی

این دسته، شامل فرآیندهایی است که بدون دخالت مستقیم انسان رخ می‌دهند، هرچند فعالیت‌های انسانی می‌توانند آنها را تشدید کنند.

٤-١-١-کارست (انحلال سنگ‌های آهکی و تبخیری)

ایجاد کارست یا حفره‌هایی با ابعاد مختلف در لایه‌های زیرسطحی، عمدتا در مناطقی اتفاق می‌افتد که خاک‌های انحلال‌پذیر وجود داشته باشد. خاک انحلال‌پذیر به خاکی اطلاق می‌شود که بخشی از ذرات جامد آن متشکل از نمک‌های معدنی با قابلیت انحلال است. این نمک‌ها می‌توانند از نوع کلرور سدیم، سولفات کلسیم آبدار (گچ)، کربنات کلسیم یا سایر نمک‌های معدنی باشند. این ذرات نمکی در صورت تماس با آب در آن حل شده و همراه با جریان آب از محیط خاک خارج و در نتیجه، فضاهای خالی قابل‌توجهی را به‌جای می‌گذارند. وقوع چنین پدیده‌ای (یعنی انحلال و شسته شدن نمک از محیط خاک) می‌تواند تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، از جمله مقدار پوکی (تخلخل)، تراکم‌پذیری، نفوذپذیری، نشست‌پذیری و مقاومت برشی آن ایجاد کند. افزایش تخلخل خاک به‌همراه کاهش مقاومت برشی، باعث می‌شوند که خاک حتی بدون بارگذاری جدید دچار نشست گردد (رحیمی و عباسی، ۱۳۹۳). مقدار این نشست، بسته به میزان مواد

انحلال‌پذیر متفاوت بوده و می‌تواند از چند سانتی‌متر یا چند متر متغییر باشد. البته در مواقعی نیز ممکن است به‌علت وجود توده‌های عظیم مواد انحلال‌پذیر، حفره‌های بسیار بزرگ و حتی غارهایی با ابعاد مختلف ایجاد شود. وجود غارهای طبیعی در اغلب مناطق، نتیجه چنین فرآیندی است. در چنین شرایطی، بسته به شرایط و ماهیت این حفره‌ها در مراحل مختلف تشکیل حفره، فروچاله‌های ناگهانی در سطح زمین ایجاد می‌شود. این نوع نشست‌ها معمولا به‌صورت نقطه‌ای و در یک مدت زمان کوتاه به‌صورت فروچاله اتفاق می‌افتند. در ایران، فروچاله‌های کارستی در اغلب مناطق، از جمله همدان و کرمان گزارش شده است. در جهان، ایالت فلوریدا در آمریکا نمونه بارز این نوع نشست است.

٤-١-٢- اکسیداسیون خاک‌های آلی (تورب)

کاهش سطح آب در لایه‌های آلی، به‌ویژه خاک‌های پیت، یکی از دلایل مهم و در عین حال، متفاوت فرونشست زمین محسوب می‌شود که عمدتا در نتیجه خشک کردن این اراضی برای توسعه کشاورزی رخ می‌دهد. با پایین افتادن سطح آب، خاک‌های آلی که پیش‌تر در شرایط اشباع و بی‌هوازی قرار داشتند، در معرض هوا قرار گرفته و فرآیند تجزیه باکتریایی مواد آلی آغاز می‌شود. این فرآیند همراه با اکسیداسیون، کاهش حجم خاک و از دست رفتن جرم آلی بوده و در نتیجه، فرونشستی تدریجی اما پیوسته و اغلب برگشت‌ناپذیر در سطح زمین ایجاد می‌کند. از نمونه‌های شاخص جهانی می‌توان به منطقه فنز در بریتانیا، اورگلیدز فلوریدا در ایالات متحده و دلتای ساکرامنتو-سان‌خوآکین در کالیفرنیا اشاره کرد که در همگی آنها، زهکشی زمین‌های پیت به‌منظور کشاورزی موجب فرونشست قابل توجه سطح زمین و تغییرات اساسی در کاربری و پایداری این اراضی شده است.

٤-١-٣- حرکات تکتونیک

طبق این نظریه، زمین دارای یک لایه بیرونی سفت و سخت است که به لیتوسفر معروف است و ضخامت آن به‌طور معمول حدود ۱۰۰ کیلومتر است و روی یک لایه پلاستیکی قالب‌پذیر و تاحدی ذوب شده به نام استنوسفر

قرار دارد. لیتوسفر به هفت صفحه بزرگ قاره‌ای و اقیانوسی، شش یا هفت صفحه متوسط منطقه‌ای و چندین صفحه کوچک تقسیم شده است. این صفحات معمولا با سرعت ۵ تا ۱۰ سانتی متر (۲ تا ۴ اینچ) در سال نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند و در امتداد مرزهای خود با هم تعامل دارند. این صفحات در جایی به هم نزدیک می‌شوند، از هم دور می‌شوند یا بر روی هم می‌لغزند. صفحه یا صفحات تکتونیک، نظریه‌ای مربوط به پویایی پوسته بیرونی زمین یعنی لیتوسفر است که در علم زمین‌شناسی برای درک فرآیندهای کوه‌سازی، آتشفشان‌ها، زلزله‌ها و همچنین تکامل سطح زمین، مطرح می‌شود. حرکات تکتونیک پوسته‌ای (فشار و کشش) می‌توانند نشست یا بالاآمدگی در سطح زمین ایجاد کنند. این تغییرات معمولا در بازه‌های زمانی طولانی رخ می‌دهند و در مقیاس مدیریتی کوتاه‌مدت اهمیت کمتری دارند، اما در ترکیب با ساز و کارهای دیگر می‌توانند اثرگذار باشند.

٤-۲- عوامل انسان‌زاد

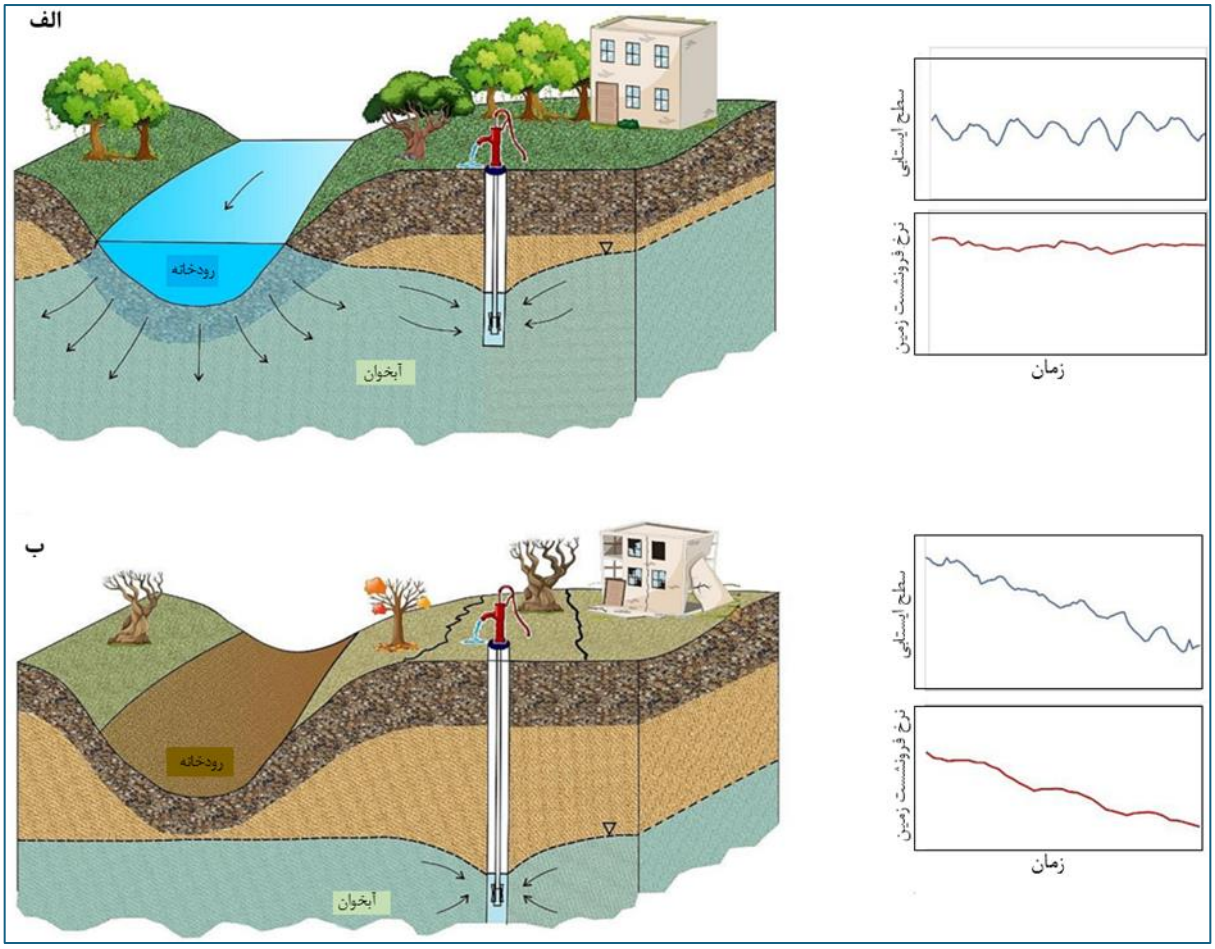
این دسته، شامل فعالیت‌های مستقیم انسانی است که به تغییر شرایط زیرسطحی و نشست زمین منجر می‌شوند. همان‌طورکه در بخش‌های قبلی تصریح شد، علت اصلی وقوع فرونشست طی سده اخیر در جهان و به‌ویژه در ایران، عوامل انسانی است. عوامل انسانی پدید آورنده فرونشست بسیار متنوع هستند. در این قسمت، چند مورد از مهم‌ترین آنها تشریح می‌شوند:

٤-۲-۱- برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی

همان‌طورکه اشاره شد، علل و عوامل متعددی موجب فرونشست در دنیا و ایران می‌شوند، ولی در مطالعات و بررسی‌های انجام شده در سطح ملی و بین‌المللی، عامل اصلی فرونشست زمین در دنیا و به‌ویژه ایران، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی معرفی شده است (Khorami etal., 2020; Motagh etal., 2008; Haghsena Haghighi etal., 2024؛ اصغری سراسکانرود و همکاران، ۱۴۰۰؛ آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲؛ ، قهرودی و علی‌نوری،

۱۴۰۰، حداد و خراسانی، ۱۳۹۸، صالحی معتمد و همکاران، ۱۳۹۸ ، علیزاده و همکاران، ۱۴۰۲، عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۱ ، نظم فر و شیرزادگان، ۱۴۰۱ ، شریفی‌کیا و همکاران ۱۳۹۹). معتق و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی داده‌های ماهواره‌ای و سطح آب زیرزمینی در دشت تهران، همبستگی قوی بین این دو پارامتر یافته و نشان دادند که مهم‌ترین عامل فرونشست در ایران، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است. اشرف و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی روند افزایشی تعداد چاه‌های ثبت شده در ایران از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۵ و آشکارسازی افزایش چشمگیر در برداشت آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه برای مصارف کشاورزی، و افت قابل توجه سطح آب زیرزمینی و ارزیابی تغییرات سطح زمین، تراکم لایه‌های آبدار و فرونشست زمین را با برداشت بی رویه آب از منابع مرتبط دانسته‌اند.مدنی و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه خود نشان دادند که خشکسالی‌های متوالی در ایران باعث افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی و در نتیجه تشدید فرونشست شده است.

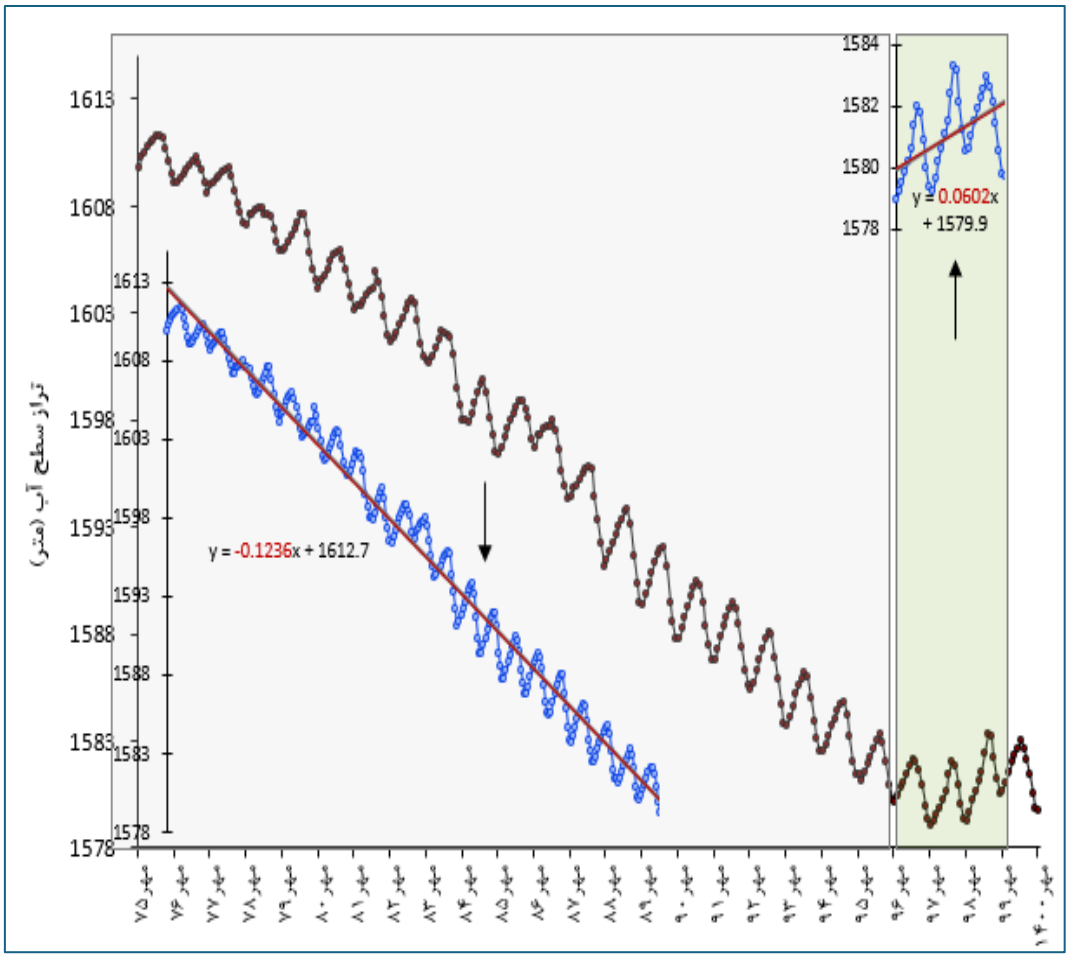
اصولا برداشت آب از منابع آب های زیرزمینی برای اهداف مختلف، به‌ویژه تامین آب کشاورزی، از سالیان دور یک فرآیند معمول بوده و به‌طور طبیعی سالانه نوساناتی طی ماه‌های مختلف در سطح آب زیرزمینی به‌دلیل برداشت در فصل کشاورزی و تغذیه در فصل‌های دیگر رخ می‌دهد. در سال‌هایی که میزان برداشت با میزان تغذیه تا حدودی نزدیک به هم و یا یکسان باشد، علی‌رغم نوسانات فصلی، سطح کلی در طول سال ثابت می‌ماند، ولی در سال‌هایی که میزان برداشت با تغذیه متفاوت باشد، در صورت مازاد برداشت، سطح آب کاهش و در صورت مازاد تغذیه، سطح آب زیرزمینی افزایش می‌یابد. در شرایطی که سطح آب طی سالیان مختلف تا حدودی ثابت باشد، تغییر در تنش موثر ایجاد نشده و به‌تبع آن نشستی نیز اتفاق نمی‌افتد و در شرایطی که میزان برداشت بیش از تغذیه باشد (برداشت بی‌رویه)، علی‌رغم نواسانات جزئی فصلی، سطح آب سالانه کاهش و متناسب با آن لایه‌های خاک در اثر افزایش تنش متراکم و دچار نشستی موسوم به فرونشست زمین می‌شوند. این موضوع، به‌صورت شماتیک در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- شکل شماتیکی از ارتباط برداشت بی‌رویه آب با پدیده فرونشست

بررسی‌های انجام شده در خصوص ارزیابی سطح آب‌های زیرزمینی، به‌وضوح روند نزولی سطح آب‌های زیرزمینی را در اغلب دشت‌های کشور نشان می‌دهند. به‌عنوان نمونه، هیدروگراف بلندمدت آبخوان یکی از دشت‌های استان زنجان بر مبنای آمار چاه‌های مشاهداتی موجود در محدوده مطالعاتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل، علی‌رغم نوسانات فصلی سطح آب زیرزمینی، هیدروگراف بلندمدت از دو روند نزولی در سال‌های آبی ۷۶-۷۵ تا ۹۸-۹۷ و روند صعودی در سال‌های آبی ۹۸-۹۷ تا ۱۴۰۰-۹۹ پیروی می‌کند، به‌طوری‌که هر ساله، ماکزیمم تراز سطح آب زیرزمینی، عموما در فروردین ماه و حداقل تراز نیز در ماه مهر قرار دارد. همچنین، تراز آب زیرزمینی در آبخوان مذکور طی ۲۱ سال حدود ۳۱ متر و به‌طور میانگین با کاهشی معادل

۰/۱۲۴ متر در هر ماه مواجه بوده است. این در حالی است که در بازه صعودی محقق شده (از سال آبی ۹۸-۹۷)، تراز آب زیرزمینی به‌طور میانگین معادل ۰/۰۶ متر در ماه افزایش یافته است (عباسی، ۱۴۰۴).



شکل ۱۰- شماتیکی از ارتباط برداشت بی‌رویه آب با پدیده فرونشست

به‌طور یک قاعده سرانگشتی، کاهش ۳۰ متری در تراز آب زیرزمینی معادل کاهش فشار آب منفذی به‌میزان ۳۰۰ کیلوپاسکال و یا ۳۰ تن بر مترمربع است که مطابق رابطه ۱، افزایشی معادل ۳۰۰ کیلوپاسکال در تنش موثر بین دانه‌ای داشته که مطابق قوانین و مبانی ژئوتکنیک، افزایش تنش نیز موجب نشست در خاک خواهد شد. میزان این نشست نیز بسته به عمق لایه، تنش موثر، نسبت پوکی اولیه و ضریب فشردگی به‌راحتی قابل محاسبه است.

در مجموع، می‌توان گفت که با توجه به قطعی بودن روند نزولی تراز آب‌های زیرزمینی، نشست تحکیمی در لایه خاک که به‌صورت فرونشست نمود پیدا می‌کند، قطعی است.

٤-٢-٢- استخراج نفت و گاز

هرچند معمول‌ترین دلیل فرونشست زمین، استخراج آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود، اما استخراج نفت، گاز و مواد معدنی نیز در نشست زمین موثر است. استخراج نفت و گاز به‌عنوان یکی از عوامل مهم و شناخته شده فرونشست زمین، عمدتا از طریق کاهش فشار سیالات موجود در مخازن هیدروکربوری و تغییر تعادل تنش در لایه‌های زیرسطحی عمل می‌کند. در مخازن نفت و گاز، سیالات موجود در فضاهای خالی سنگ نقش اساسی در تحمل بخشی از تنش‌های وارده از لایه‌های فوقانی دارند؛ با برداشت مداوم و بلندمدت نفت، گاز و گاه آب شور همراه، فشار منفذی کاهش یافته و در نتیجه، تنش موثر وارد بر اسکلت سنگ افزایش می‌یابد. این افزایش تنش موثر، موجب تراکم‌پذیری سنگ مخزن و لایه‌های مجاور، کاهش حجم تخلخل‌ها و در نهایت، نشست تدریجی یا ناگهانی سطح زمین می‌شود. شدت و گستره فرونشست ناشی از استخراج هیدروکربن‌ها به عواملی مانند نوع و خواص ژئومکانیکی سنگ مخزن (ماسه‌سنگ و آهک)، میزان تراکم‌پذیری، عمق مخزن، نرخ و مدت برداشت و همچنین، وجود یا عدم وجود برنامه‌های نگهداشت فشار مانند تزریق آب یا گاز وابسته است. نمونه‌های متعددی در مقیاس جهانی، این پدیده را تایید می‌کنند؛ از جمله میدان نفتی ویلمینگتون در کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا، که به‌دلیل برداشت گسترده نفت و افت شدید فشار مخزن، فرونشستی در حدود ۹ متر را تجربه کرده و خسارات قابل‌توجهی به زیرساخت‌های شهری و بندری وارد شده است. همچنین در منطقه نیگاتا ژاپن، استخراج هم‌زمان گاز طبیعی و آب شور از مخازن زیرزمینی منجر به فرونشستی در حدود ۳ متر شده که آثار آن در تغییر تراز زمین و آسیب به ساختمان‌ها و تاسیسات صنعتی گزارش شده است. در میدان‌های نفتی واقع در سواحل دریاچه ماراکایبو در ونزوئلا نیز برداشت طولانی‌مدت نفت باعث فرونشستی در حدود ۴ متر گردیده که پیامدهای زیست‌محیطی و مهندسی قابل‌توجهی، از جمله افزایش خطر آب‌گرفتگی مناطق ساحلی، به‌همراه داشته است.

نشست سطح زمین در یک میدان نفتی، به‌مرور زمان به تاسیسات سطحی و زیرسطحی حساس و استراتژیک آسیب رسانده و هزینه‌های قابل ملاحظه‌ای را به بخش تولید و بازیافت نفت تحمیل می‌کند که این امر، لزوم کنترل و

نظارت بر نشست زمین در میادین نفتی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن پیامدها و خسارت‌های جبران‌ناپذیر ناشی از این پدیده، ضرورت می‌یابد که مناطق مستعد این پدیده مرتب مورد بررسی و پایش قرار گیرند (علی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). با این حال، این نوع فرونشست در ایران کمتر گزارش شده، اما در جهان نمونه‌های بارز آن در آمریکا و نیجریه ثبت شده است.

٤-۲-۳- فعالیت‌های معدن‌کاری

به‌طور کلی، ایجاد خلا یا تضعیف سازه‌های زیرسطحی، موجب نشست یا فروچاله‌های ناگهانی می‌شود. در ایران، معادن زغال‌سنگ کرمان نمونه‌ای از فرونشست از نوع فروچاله هستند. در آلمان و چین نیز نشست‌های شدید در مناطق معدنی گزارش شده است. فعالیت‌های معدن‌کاری، به‌ویژه استخراج زغال‌سنگ قهوه‌ای و سایر مواد معدنی که مستلزم تخلیه یا کاهش سطح آب زیرزمینی در لایه‌های اطراف معدن هستند، از دیگر عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست زمین به‌شمار می‌روند. در این فرآیندها، کاهش فشار آب منفذی و برداشت مواد معدنی از اعماق زمین باعث تغییر در تعادل تنش، تراکم لایه‌های زمین و در برخی موارد، فروریزش یا نشست تدریجی سطح زمین می‌شود. شدت و گستره فرونشست ناشی از معدن‌کاری به عواملی مانند عمق و وسعت استخراج، نوع مواد معدنی، ویژگی‌های ژئومکانیکی سازندها و نحوه مدیریت آب‌های زیرزمینی وابسته است. از نمونه‌های شناخته شده، می‌توان به فرونشست‌های ثبت شده در منطقه لتروب ولی استرالیا اشاره کرد که در اثر استخراج گسترده زغال‌سنگ قهوه‌ای و تخلیه آب از لایه‌های زیرسطحی، نشست‌های قابل‌ملاحظه‌ای در سطح زمین گزارش شده است.

٤-٢-٤- توسعه شهری و ساخت و ساز

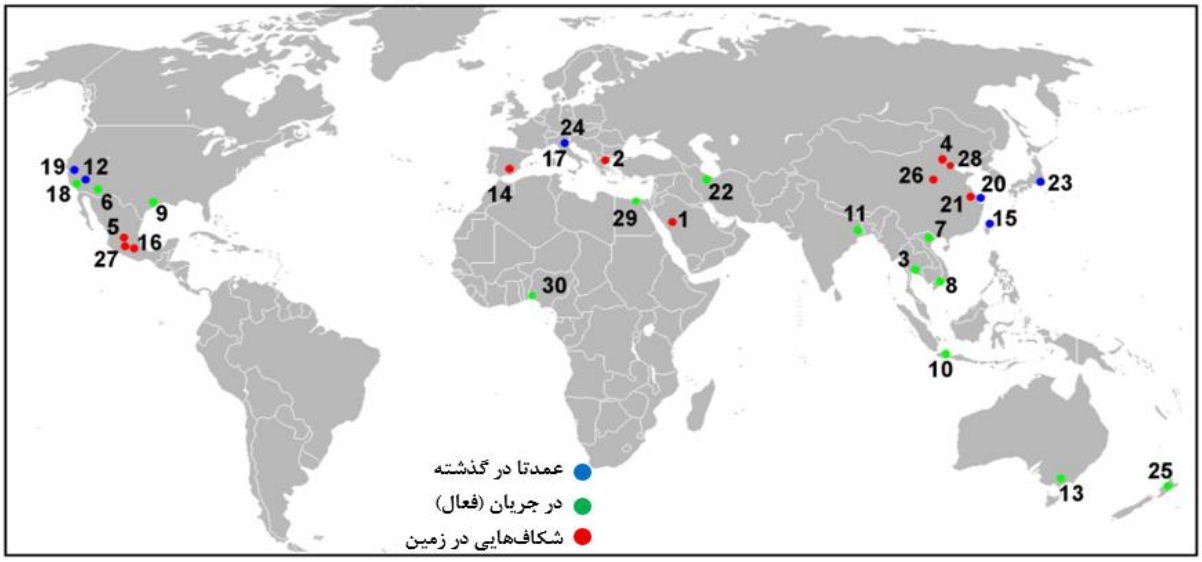
توسعه شهری و اجرای پروژه‌های عمرانی بزرگ، به‌ویژه احداث تونل‌های عمیق، متروها و سازه‌های زیرزمینی، از دیگر عوامل مؤثر در بروز فرونشست زمین به شمار می‌روند. حفاری‌های عمیق و عملیات زهکشی مرتبط با این سازه‌ها می‌توانند موجب کاهش فشار آب منفذی در لایه‌های رسی و سیلتی اشباع شوند که این امر به افزایش تنش مؤثر، تراکم تدریجی این لایه‌ها و در نهایت نشست سطح زمین منجر می‌شود. این نوع فرونشست غالبا در مقیاس محلی و در مناطق شهری متراکم رخ می‌دهد، اما به‌دلیل تمرکز زیرساخت‌ها می‌تواند خسارات قابل توجهی به ساختمان‌ها، شبکه‌های حمل‌ونقل و تأسیسات شهری وارد کند. نمونه‌هایی از این پدیده در شهرهای مختلف سوئد و نروژ گزارش شده است، جایی که ساخت تونل‌های عمیق بدون مدیریت دقیق شرایط هیدروژئولوژیکی، موجب افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست در بافت‌های شهری شده است. همچنین ساخت و ساز سنگین روی خاک‌های نرم می‌تواند تحکیم سریع ایجاد کند. در شهرهای بزرگ با رشد سریع، مانند شانگهای و بانکوک، این فرآیند نقش مهمی در نشست زمین داشته است.

۵- سابقه و نرخ فرونشست در ایران و جهان

ارزیابی و بررسی کمیت و کیفیت فرونشست سابقه طولانی دارد. اخیرا، این بررسی‌ها به‌دلیل قابل مشاهده و قابل لمس شدن عوارض فرونشست از دقت و حساسیت بیشتری برخوردار بوده و مطالعات گسترده‌ای نیز در این مورد انجام گرفته است. در این قسمت، برخی از این مطالعات انجام شده به‌تفکیک ملی و بین‌المللی ارائه می‌شود.

۵-۱- وضعیت جهانی فرونشست زمین

اغلب بررسی‌های انجام شده، مناطق اصلی فرونشست زمین با منشا انسانی ناشی از برداشت آب زیرزمینی در سراسر جهان را نشان می‌دهد. شکل ۱۱، پراکنش وقوع فرونشست به شکل‌های مختلف در سطح جهان را نشان می‌دهد. بیشترین فرونشست ثبت شده زمین در طول تاریخ، که بیش از ۱۴ متر است، مربوط به تولید آب گرم‌زمینی در میدان زمین‌گرمایی وایراکی در نیوزیلند است (Allis et al., 2009). طبق این نقشه، ایران جزو مناطقی است که دارای فرونشست‌های فعال است. منطقه آمریکای شمالی (ایالات متحده و مکزیک)، بیشترین تعداد نقاط فرونشست ثبت شده را دارد. تمرکز اصلی در غرب و جنوب غرب آمریکا است؛ جایی‌که به‌دلیل کمبود منابع آب سطحی، رشد جمعیت و کشاورزی گسترده، استخراج شدید آب زیرزمینی موجب نشست‌های چشمگیر شده است. در اروپا (ایتالیا، اسپانیا، هلند و بخش‌هایی از اروپای شرقی)، فرونشست‌ها عمدتا در حوضه‌های ساحلی و دلتاها رخ داده‌اند. در این منطقه، ترکیب برداشت آب زیرزمینی و ویژگی‌های زمین‌شناسی ریزدانه بخشی از زمین در کنار زهکشی طولانی‌مدت زمین‌های پست منجر به نشست‌های تاریخی شده است. در آسیا، در ترکیه و عراق، برخی فرونشست‌ها گزارش شده‌اند، اما از نظر شدت و گستره کمتر از ایران هستند. آسیای شرقی (چین، ژاپن، کره جنوبی) و جنوبی (هند، بنگلادش، تایلند، اندونزی، فیلیپین) نیز از کانون‌های بزرگ فرونشست در جهان هستند. در آفریقا نشست‌های شناخته شده محدودتر هستند، اما نقاطی در حوضه‌های ساحلی و شهرهای بزرگ شمال این قاره ثبت شده‌اند. در استرالیا تنها موارد محدودی ثبت شده است که بیشتر در مناطق شهری و صنعتی به‌دلیل استخراج منابع آب یا بهره‌برداری از ذخایر انرژی و زمین‌گرمایی هستند.



شکل ۱۱- مناطق عمده فرونشست زمین ناشی از برداشت آب زیرزمینی در سراسر جهان (Gambolati and Teatin, 2021)

کاهش سطح آب زیرزمینی در اثر پمپاژ بیش از حد برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شهری شایع‌ترین و گسترده‌ترین دلیل فرونشست در مناطق مختلف دنیا ذکر شده است. تاکنون نمونه‌های متعددی در دنیا گزارش شده است که علت اصلی فرونشست در آنها برداشت بیش از حد آب از سفره آب های زیرزمینی بوده است. از بارزترین آنها می‌توان به مواردی نظیر سان‌خوآکین کالیفرنیا در آمریکا (فرونشست ۹ متر)، مکزیکوسیتی، مکزیک (فرونشست ۹ متر)، توکیو، ژاپن (فرونشست ۴/۵۹ متر)، اوزاکا، ژاپن (فرونشست ۲/۸۸ متر)، شانگهای، چین (فرونشست ۲/۶۳ متر)، تگزاس آمریکا (فرونشست ۲/۷۵ متر)، بانکوک، تایلند (برآمدگی لوله چاه‌ها گزارش شده است)، آریزونا، آمریکا (فرونشست ۱ تا ۳/۸ متر)، دره سانتا کلارا، کالیفرنیا، آمریکا (فرونشست ۴/۱ متر)، راف ریور، آیداهو، آمریکا (فرونشست ۰/۸ متر)، بتن روژ، لوئیزیانا، آمریکا (فرونشست ۰/۳۸ متر)، لاس وگاس، نوادا، آمریکا (فرونشست ۱ تا ۱/۷ متر)، لندن، بریتانیا (فرونشست ۰/۳۵ متر)، دبرسن، مجارستان (فرونشست ۰/۴۲ متر)، ونیز، ایتالیا (فرونشست ۰/۱۵ متر) اشاره کرد.

۵-۲- سابقه پایش و بررسی نرخ فرونشست در ایران

ازآن‌جاکه ایران از لحاظ فعالیت‌های ژئودینامیکی منطقه فعالی است، بررسی تغییرات پوسته زمین به‌منظور پیشگیری از خسارت‌های احتمالی، یکی از مهم‌ترین رویکردهای مدیریت بحران همواره مورد توجه بوده است. یکی از دقیق‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌ها برای بررسی تغییرات ارتفاعی، استفاده از مشاهدات ترازیابی است که با تکرار مشاهدات ترازیابی، امکان بررسی تغییرات ارتفاعی مسیرهای ترازیابی فراهم شده است. این مشاهدات، یک‌بار به‌طور کامل از سال ۱۳۶۰ شروع و تا سال ۱۳۷۶ با تجهیزات اپتیکی انجام شد و دومین بار از سال ۱۳۸۰ شروع و تا سال ۱۳۸۸ با تجهیزات رقومی تکرار شد. در سال ۱۳۸۰ با بررسی وضعیت تغییرات ارتفاعی، برای اولین بار فرونشست دشت تهران به‌صورت کمی آشکارسازی شد. بر اساس این گزارش، ۴۲ منطقه فرونشست شناسایی شدند که تمام آنها در حوزه آبخوان‌هایی که با کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه بودند، قرار داشتند. با توجه به اهمیت شهر تهران و وقوع برخی مناطق شهری، سازه‌های مهم و زیرساخت‌های حیاتی در پهنه فرونشست، پایش مداوم این پهنه در دستور کار سازمان نقشه‌برداری کشور قرار دارد و محاسبات ماهیانه و سالانه بر اساس پردازش‌های راداری و محاسبات ژئودتیکی انجام می‌شود. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، مطالعات گسترده‌ای در ایران در مورد ارزیابی وقوع فرونشست و میزان آن در دشت‌های مختلف انجام شده است که در این قسمت، برخی از این موارد ارائه می‌شوند.

- در سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ شاهد افزایش نرخ فرونشست در منطقه مسکونی یافت آباد و نسیم شهر تهران تا ۳۱ سانتی‌متر در سال که رکورددار بالاترین نرخ فرونشست کشور در این بازه زمانی است، ثبت شده است. بازدیدهای میدانی، نشان دهنده افزایش فشار بر منابع آب زیرزمینی در راستای تامین آب شرب و کشاورزی باغات در مناطق افزایش نرخ فرونشست هستند(آمیغ پی و همکاران، ۱۴۰۳).
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، در سال ۱۳۹۸ اطلس فرونشست ایران را تهیه کرده است که شامل اطلاعات جامعی درباره وضعیت فرونشست در دشت‌های مختلف کشور است. بر اساس این

گزارش، همه استان‌های کشور به‌جز گیلان، دچار فرونشست شده‌اند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۸).

- در بازه زمانی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ تعداد ۲۵۴ پهنه فرونشست در ۳۰ استان کشور شناسایی شدند. بالاترین نرخ فرونشست مربوط به استان کرمان با نرخ بیش از ۴۰ سانتی‌متر در سال بود (آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲).
- بررسی های انجام شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح ۱۰۰ متر در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ نشان داده است حدود ۳/۵ درصد (۵۶۰۰۰ کیلومتر مربع) از مساحت ایران که عمدتا تحت آبیاری بودند، در معرض فرونشست قرار دارد و نرخ فرونشست در حدود ۳۰۰۰ کیلومتر مربع از این مناطق بیش از ۱۰ سانتی‌متر در سال بوده است.همچنین در فلات مرکزی ایران که حدود دوسوم آبخوان‌های مورد بهره‌برداری را در بر می‌گیرد، نرخ فرونشست در این ناحیه بالاتر از ۳۵ سانتی‌متر در سال گزارش شده است. علاوه بر این در این گزارش با بیان اینکه سالانه ۱/۷ میلیارد متر مکعب از سفره‌های آب زیرزمینی محصور و نیمه محصور تخلیه می‌شود تصریح شده است که پمپاژ شدید آب‌های زیرزمینی، عامل تخریب سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست گسترده زمین در ایران شناخته است. بطوریکه نشست تحکیمی درازمدت آبخوان در این مناطق بیش از دو برابر نشست الاستیک و قابل برگشت فصلی است. این امر نشان‌دهنده‌ی از دست رفتن دائمی سفره‌های آب زیرزمینی است که پایداری منابع آب در سراسر ایران را به خطر می‌اندازد(Haghshenas-Haghighi and Motagh, 2024).
- نرخ فرونشست در دشت غربی تهران بیش از ۲۵ سانتی‌متر در سال، در مجاورت فرودگاه بین‌المللی تهران حدود ۵ سانتی‌متر و در دشت ورامین ۲۲ سانتی‌متر در سال است. الگوی زمانی فرونشست با کاهش سطح آب زیرزمینی مطابقت دارد (Haghshenas-Haghighi and Motagh, 2019).

- در دشت شهریار، بیشترین فرونشست مربوط به باغات (۱۱/۵۴ سانتی‌متر) و مراتع (۱۱/۳۴ سانتی‌متر) است. سطح آب‌های زیرزمینی طی ۶ سال ۷ متر افت کرده است (اصغری سراسکانرود و محمدزاده شیشه‌گران، ۱۴۰۰).
- در دشت جنوب شرقی تهران طی ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۲، با کاهش برگشت آب به سفره، میزان فرونشست تا ۵۵ درصد افزایش یافت. با افزایش برداشت آب، میزان فرونشست حدود ۴۰ درصد بیشتر شد (توسلی و همکاران، ۱۳۹۸).
- نرخ فرونشست در منطقه جوادآباد دشت ورامین طی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸ حدود ۲۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۱).
- در دشت اردبیل در بازه زمانی ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۹، متوسط افت آب زیرزمینی ۹/۵ متر و میانگین نرخ فرونشست ۴/۴ میلی‌متر در سال بوده است (آقایاری و همکاران، ۱۴۰۱).
- در دشت مشگین، متوسط افت سطح ایستابی طی ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ حدود ۲۳/۷۵ متر و حداکثر نرخ فرونشست ۹/۳۵ سانتی‌متر گزارش شده است (نظم‌فر و شیرزادگان گرجان، ۱۴۰۱).
- بین ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۶ منطقه‌ای حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مربع در دشت رفسنجان دچار فرونشست بیش از ۵ سانتی‌متر در سال شده است. سه ناحیه با فرونشست شدید (بالای ۲۰ سانتی‌متر در سال) شناسایی شدند. حجم ذخیره‌سازی از دست رفته آبخوان حدود ۳۰۰ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است (Motagh et al., 2017).
- در سال ۲۰۱۰ محدوده‌ای با وسعت ۱۳/۷ کیلومتر مربع در دشت مشهد با نرخ ۲۰ سانتی‌متر در سال در حال فرونشست بوده است (صالحی متعهد و همکاران، ۱۳۹۸).

- نرخ فرونشست در برخی مناطق مشهد به ۱۹/۱ سانتی‌متر در سال می‌رسد. شمال غرب شهر، بیشترین فرونشست را دارد. لایه‌های ریزدانه تاثیر قابل توجهی بر میزان فرونشست دارند (خرمی و همکاران، ۲۰۲۰).
- دشت قزوین با میانگین نرخ ۴۰ میلی‌متر و حداکثر ۵۰ میلی‌متر در سال (بر اساس داده‌های ENVISAT) و ۶۵ میلی‌متر در سال (بر اساس داده‌های Sentinel-1) دچار فرونشست است. برداشت بیش از حد از آبخوان باعث افت حدود ۱۷ متری سطح آب طی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ شده است (بابایی و همکاران، ۲۰۲۰).
- در دشت نورآباد با افت ۲۲ متر سطح آب طی ۱۲ سال میزان فرونشست حدود ۱۶ سانتی‌متر و میانگین سالانه ۴ سانتی‌متر بوده است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۹).
- در دشت همدان-بهار، میزان فرونشست سالانه ۵۶ میلی‌متر برآورد شده است که بیشترین مقدار مربوط به مناطق دارای افت آب زیرزمینی است (جوادی، ۱۴۰۰).
- بالاترین نرخ‌ها در بازه ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ مربوط به استان کرمان با بیش از ۴۰ سانتی‌متر در سال و پس از آن استان‌های البرز، قم، تهران، گلستان، خراسان رضوی، همدان و مرکزی با نرخ بیشینه بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال است (آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲).
- حصارکی زاد و همکاران(۱۴۰۳) طی یک مطالعه و تحلیل جامع، وضعیت فعلی فرونشست در ایران را به‌صورت مرور سیستماتیک مورد بررسی قرار دادند. در این مرور سیستماتیک، تعداد ۷۶ مطالعه در ۲۱ استان کشور انتخاب و میزان فرونشست در مناطق مختلف کشور مورد ارزیابی وگروه بندی گردید. بر این اساس بیشترین میزان فرونشست در تهران (دشت تهران تا ۴۳ سانتی‌متر در سال)، فارس (قره‌باغ و دیندارلو تا ۳۰ سانتی‌متر در سال) و کرج (دشت کرج تا ۳۰ سانتی‌متر در سال) ثبت شده است و این مناطق، نیازمند اقدامات فوری مدیریت منابع آب و پایش دقیق زیرساخت‌ها هستند. همچنین استان‌هایی مانند زنجان، قزوین و اردبیل فرونشست نسبتا پایینی دارند (۳ تا ۹ سانتی‌متر در سال)، اما روند صعودی

در برخی دشت‌های آن ها مشهود است. دشت‌های مرکزی و کویری ایران، شامل یزد، سمنان، اصفهان و خراسان رضوی، نوسانات زیادی در میزان فرونشست دارند که حساسیت بالای این مناطق به کاهش سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. در اکثر استان‌ها، مقادیر فرونشست در بازه‌های زمانی اخیر افزایش یافته است؛ برای مثال، در هریس از ۱/۲ به ۱۵ سانتی‌متر و در مشهد از ۲۰ به ۲۳ سانتی‌متر در سال رسیده است.

نتایج کلی حاصل از حصارکی زاد و همکاران (۱۴۰۳) و نیز سایر پژوهش های ذکر شده در بخش های قبلی این گزارش در جدول (۱) ارائه شده است. مطابق این جدول، فرونشست زمین در ایران به‌طور عمده ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است و این عامل در تمام استان‌ها به‌عنوان مهم‌ترین علت شناسایی شده است. برداشت بی رویه آب از منابع آب زیرزمینی، حتی در مناطقی با ظرفیت آبی نسبتا مناسب، موجب کاهش سطح آب و فرونشست زمین می‌شود. علاوه بر برداشت بی‌رویه، عوامل تکمیلی و محلی نیز در شدت و دامنه فرونشست نقش داشته‌اند. به‌طور مثال، در مناطق شهری و دشت‌های صنعتی، مانند تهران، کرج، اراک و کرمان، وزن تاسیسات و بناها فرونشست را تشدید می‌کند. در برخی دشت‌ها، مانند مشهد و سبزوار، عوامل تکتونیکی و ساختار زمین‌شناسی در کنار برداشت آب زیرزمینی اثرگذار بوده‌اند و در یزد، مهردشت و ابرکوه علاوه بر برداشت آب، حل شدن سازندهای آهکی نیز نقش مهمی در فرونشست دارد. شدت فرونشست در استان‌های مختلف متفاوت است؛ این روند، حاکی از تشدید بحران آب و فشار بر منابع زیرزمینی است.

جدول ۱- فرونشست زمین در برخی استان‌های ایران

استان	دشت/شهرهای مهم	بازه زمانی	دامنه میزان فرونشست (سانتی‌متر در سال)	عوامل موثر بر فرونشست
آذربایجان شرقی	هریس، آذرشهر، مرند، شبستر، صوفیان	۲۰۰۹-۲۰۲۰	۱/۲-۱۵	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
آذربایجان غربی	سلماس	۲۰۱۹	۱۱	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
اردبیل	اردبیل، مشکین‌شهر	۱۹۸۷-۲۰۲۰	۴/۴-۹/۳۵	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
اصفهان	مهیار، نجف‌آباد، دامنه-داران	۲۰۰۲-۲۰۱۸	۶-۹	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
البرز	دشت هشتگرد، دشت کرج	۲۰۰۸-۲۰۲۱	۴/۷-۳۵	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
تهران	دشت تهران، جنوب تهران، شهریار، کرج، ورامین	۲۰۰۳-۲۰۲۳	۲/۳-۴۳	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، وزن تاسیسات، تونل‌های مترو
خراسان رضوی	جوین، سبزوار، مشهد، نیشابور	۱۹۸۱-۲۰۱۸	۲-۲۳	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، عوامل تکتونیکی
خوزستان	دزفول	۲۰۱۰-۲۰۱۲	۵/۹	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
زنجان	خرمدره، ابهر	۲۰۰۳-۲۰۱۹	۳/۴-۴	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
سمنان	سمنان، ایوانکی	۲۰۰۳-۲۰۱۸	۱۰-۱۳/۳	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
فارس	فسا، داراب، قره‌باغ، دیندارلو، مرودشت، نورآباد	۱۹۹۲-۲۰۱۹	۲/۵-۳۰	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
قزوین	دشت قزوین	۲۰۰۳-۲۰۱۷	۳-۶۵	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
قم	دشت قم، دشت علی‌آباد، دشت جعفرآباد، قنوات	۲۰۰۳-۲۰۱۶	۲/۸-۲۲	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
کردستان	قروه، چهاردولی	۲۰۱۶-۲۰۱۸	۱۱-۱۷	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
کرمان	جیرفت، شهر کرمان، نوق، بهرمان	۲۰۰۵-۲۰۲۲	۶-۴۰	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، عوامل تکتونیکی، وزن تاسیسات
کرمانشاه	دشت ماهیدشت	۲۰۱۵-۲۰۲۰	۳	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
گلستان	گرگان، آق‌قلا، علی‌آباد	۲۰۰۵-۲۰۱۰	۱-۲۲	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، عوامل تکتونیکی
مرکزی	دشت شازند، شهر اراک	۲۰۰۳-۲۰۱۷	۱-۱۷	برداشت بی‌رویهآب زیرزمینی، وزن تاسیسات، عوامل تکتونیکی
هرمزگان	میناب	۲۰۱۴-۲۰۱۸	۱۳	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی
همدان	دشت همدان، شهر همدان-بهار	۲۰۱۵-۲۰۲۰	۴/۷-۵۶	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، وزن تاسیسات
یزد	ابرکوه، اردکان، مهردشت	۱۱۹۳-۲۰۱۹	۲-۱۳	برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی

٦- روش‌های اندازه‌گیری و پایش فرونشست

با توجه به گستردگی و شدت فرونشست در بسیاری از دشت‌ها، مطالعات جامع و سیستماتیک، پایش مستمر و اقدامات مدیریتی موثر برای کاهش و کنترل این پدیده ضروری است. در این راستا، شناخت دقیق وضعیت فعلی فرونشست، روندهای زمانی و مکانی آن و عوامل موثر بر آن از طریق روش‌های اندازه‌گیری دقیق و قابل اعتماد، گام اول و ضروری برای مدیریت این چالش زیست‌محیطی جدی است. برای پایش و اندازه‌گیری فرونشست زمین، روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌توان آنها را به دو دسته اصلی روش‌های سنجش از دور و روش‌های مستقیم یا مساحی زمینی تقسیم کرد. در سال‌های اخیر، رویکرد تلفیقی استفاده از روش‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری‌های زمینی برای پایش جامع فرونشست مورد توجه قرار گرفته است. این رویکرد ترکیبی امکان درک بهتر مکانیسم‌های فرونشست، ارتباط آن با عوامل مختلف و پیش‌بینی روند آینده را فراهم می‌کند.

٦-١- ابزارهای مستقیم[1] یا مسّاحی زمینی

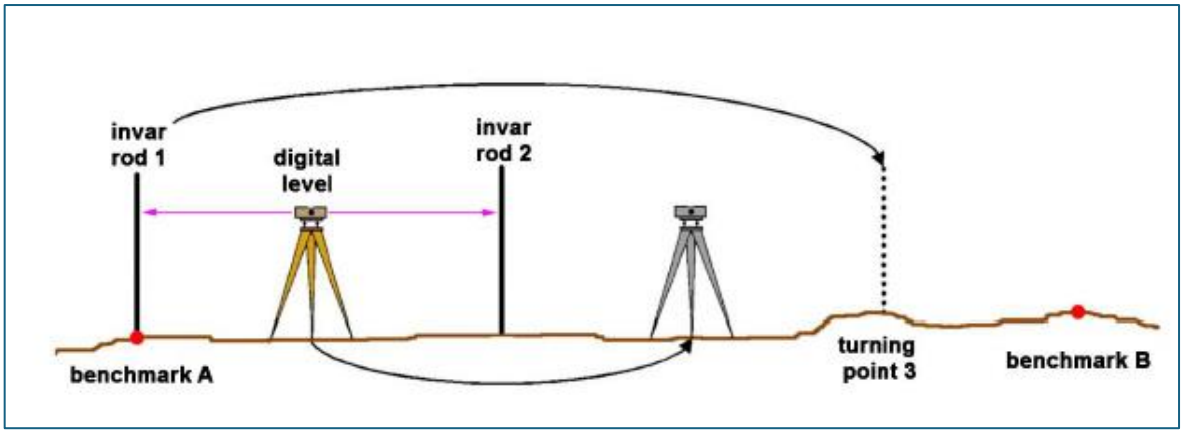
اساس روش‌های مستقیم، اندازه‌گیری‌های مختصات مکانی عمدتا با مبانی مساحی و نقشه‌برداری در روی سطح است که به روش‌های ژئودتیک[2] نیز معروف هستند. در این روش‌ها از وسایل اندازه‌گیری شاخص‌ها و سنجه‌های مختلفی از لایه‌های خاک و سطح آب استفاده می‌شود. بدین صورت که با کارگذاری سنسورهایی، جابه‌جایی‌ها به‌طور مستقیم اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. ژئودزی، علم تعیین شکل و ابعاد زمین و میدان ثقل آن و بررسی تغییرات زمانی آن است. بررسی تغییرات سطح زمین، می‌تواند به‌عنوان پیش‌نشانگر حوادث مهیبی چون زلزله و آتشفشان و به‌منظور بررسی و کنترل رفتار گسل‌های فعال و همچنین، مدل‌سازی گسل‌های مسبب زلزله و یا برای شناخت و کنترل فرونشست، نقش مهمی را در جلوگیری از بروز بحران و مدیریت سوانح طبیعی داشته باشد (آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲).

1. In-situ
2 Geodetic

٦-١-١- ترازیابی دقیق[1]

این روش که از قدیمی‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تغییر ارتفاع سطح زمین است، با استفاده از ابزار ترازیابی دقیق، تغییرات ارتفاعی نقاط مختلف را تعیین و میزان فرونشست را اندازه‌گیری می‌کند. در این روش، شبکه‌ای از بنچ‌مارک‌ها به‌صورت منظم با دقت میلی‌متری و در فواصل طولانی ترازیابی می‌شوند. این روش، دقت بالایی دارد، اما محدود به نقاط خاص است و پوشش مکانی گسترده‌ای ندارد. این روش که از قرن نوزدهم تا به امروز کاربرد گسترده ای دارد، به نقشه‌بردار این امکان را می‌دهد که با استفاده از دوربین‌های ترازیابی و اصول مساحی و نقشه‌برداری، ارتفاع نقطه‌ای را از یک نقطه مبنای شناخته شده[2] به سایر نقاط انتقال دهد (شکل ۱۲) یا به‌عبارتی دیگر، ارتفاع یک نقطه ثابت از سطح زمین را با دیگر نقاط مختلف بسنجد و برآورد کند. در هر پیمایش، اختلاف ارتفاع "ed" بین دو نقطه مبنا با تجمیع اختلاف ارتفاع بین دسته‌ای از نقاط رفت و برگشتی ثبت می‌شود. در این روش، فرض می‌شود که نقطه مرجع، ثابت است. برای ارزیابی دقت اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده در جهت‌های رفت و برگشتی (ed) نباید بیشتر از $5\ (1.5\sim3)\sqrt{D}$ میلی‌متر باشد که در آن، D طول خط اصلی بر حسب کیلومتر است. هنگامی که شبکه‌ای از نقاط مبنایی ایجاد و ترازیابی دقیق انجام می‌شود، بررسی‌های بعدی در زمان‌های مختلف جابه‌جایی های عمودی صورت گرفته مشخص می‌شود (**Gambolati and Teatin, 2021**).

[1] Spirit Leveling
[2] Bench Mark



شکل ۱۲- تصویر شماتیکی از ترازیابی (Gambolati and Teatin, 2021)

امروزه، استفاده از ترازیاب‌های دیجیتال و شاخص‌های نوری که با آلیاژی از آهن و نیکل با ضریب انبساط بسیار ناچیز ساخته می‌شوند، ضمن بالابردن دقت و حذف خطاهای انسانی، سرعت اندازه‌گیری را افزایش داده است.

٦-١-٢- استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی، GPS[1]

سیستم موقعیت یاب جهانی، GPS، سیستم راهبری و مسیریابی ماهواره‌ای است که از شبکه‌ای با ۲۴ ماهواره تشکیل شده است. ماهواره‌های این سیستم، روزی دو بار در مدارهایی دقیق به‌دور زمین می‌گردند و اطلاعاتی را به زمین مخابره می‌کنند. گیرنده‌های GPS، این اطلاعات را دریافت و با انجام محاسبات هندسی، فاصله گیرنده با ماهواره تعیین می‌شود و در پایش فرونشست سطح زمین استفاده می‌شود. این روش برای پایش مداوم نرخ نشست در ایستگاه‌های دائمی است و در آن، امکان برداشت سه‌بعدی وجود دارد. همچنین، نصب ایستگاه‌های GPS دائمی یا موقت برای اندازه‌گیری جابه‌جایی عمودی زمین به‌کار می‌رود (صالحی معتمد و همکاران، ۱۳۹۸). علائم دریافتی از حداقل چهار ماهواره می‌توانند توسط گیرنده‌های مستقل در هر نقطه‌ای از زمین و یا نزدیک به آن مورد استفاده قرار گیرند تا موقعیت مطلق تقریبی آن را تعیین کنند (Gambolati and Teatin, 2021).

[1] Global Positioning System

٦-١-٣- استفاده از کشش‌سنج‌های گمانه‌ای (اکستنسومترها[1])

این ابزارها برای اندازه‌گیری تغییر ضخامت لایه‌های خاک در عمق استفاده می‌شوند و اطلاعات دقیقی درباره مکانیسم فرونشست فراهم می‌کنند. امروزه از اکستنسومترها برای اندازه‌گیری تغییر ضخامت لایه‌های خاک در عمق و کسب اطلاعات دقیق درباره مکانیسم فرونشست استفاده می‌شود. اکستنسومترها قابلیت اندازه‌گیری جابه‌جایی عمودی و افقی بین سطح زمین و نقطه انتهایی وسیله (داخل زمین) را دارند. برای مناطقی که سفره در حال فشرده شدن است، موثرترین روش برای ثبت نشست زمین، استفاده از اکستنسومتر است، زیرا در این روش، تاثیر حرکات تکتونیک بر روی داده‌های ثبت شده حذف می‌گردد و عدد ثبت شده، نشانگر جابه‌جایی نسبی لایه‌های خاک است و نه جابه‌جایی کل بر روی سطح زمین. به‌کارگیری اکستنسومتر در کنار نقاط مرجع در نقشه‌برداری محلی می‌تواند نشست نقطه مرجع را مشخص کند و به‌این‌ترتیب، می‌تواند به محاسبه میزان نشست مناطق دیگر کمک کند. استفاده از چند اکستنسومتر به‌صورت هم‌زمان، این امکان را فراهم می‌کند که نشست لایه‌های مختلف زمین در عمق‌های مختلف حاصل شود. وقتی داده‌های اکستنسومتر با داده‌های لوگ حفاری و تغییرات سطح آب با هم مورد بررسی قرار گیرند، می‌توانند اساس تهیه آنالیز تنش-کرنش و مدل معکوس برای به‌دست آوردن تراکم متوسط و هدایت هیدرولیکی قائم سفره باشد. اخیرا با پیشرفت در پایدارسازی و افزایش حساسیت دستگاه‌ها می‌توان نشست الاستیک، انبساط و نوسانات خیلی کوچک زمین را نیز اندازه گرفت. در شکل ۵ نمونه‌هایی از انواع اکستنسومترها نشان داده شده‌اند.

اکستنسومتر تک‌کابلی (شکل ۱۳-الف) ساده‌ترین فرم اکستنسومتر است و اجزای اصلی آن عبارت هستند از:

- وزنه در بالا که کابل را تحت کشش ثابت نگه می‌دارد؛
- تجهیزات اندازه‌گیری که تغییر طول کابل را ثبت می‌کند؛
- خط‌کش مغناطیسی و خوانشگر که تغییرات کوچک طول را اندازه‌گیری می‌کنند؛

[1] Extensometer

- کابل بلند که تا عمق حدود ۴۰۰ متر پایین می‌رود؛
- وزنه انتهایی که نقطه مرجع ژئوتکنیکی در ته چاه محسوب می‌شود؛
- میز اندازه‌گیری برای ثابت نگه داشتن ابزار خوانش.

وقتی لایه‌های زمین بین سطح و عمق دچار تحکیم، نشست یا تغییر شکل قائم می‌شوند، فاصله بین نقطه مرجع (وزنه انتهایی) و سطح تغییر می‌کند. این تغییر توسط کابل و حسگرها ثبت می‌شود.

اکستنسومتر با لوله مفصلی (شکل ۱۳-ب)، پیشرفته‌تر از نوع تک کابلی است و برای اعماق بیشتر (تا ۹۰۰ متر) قابل استفاده است. اجزای اصلی این نوع اکستنسومتر عبارت هستند از:

- جدار چاه با مفصل‌های لغزشی که اجازه می‌دهند بخش‌هایی از لوله با نشست زمین حرکت کنند، بدون این‌که کل سازه دچار تنش اضافی شود؛
- لایه‌های متراکم‌شونده خاک که در اطراف لوله قرار دارند؛
- میله مرکزی که نسبت به لایه‌های اطراف، مرجع اندازه‌گیری تغییر طول است؛
- دستگاه ثبات که داده‌ها را در سطح ثبت می‌کند؛
- پلاگ بتنی در انتها برای تثبیت نقطه مرجع روی سنگ بستر.

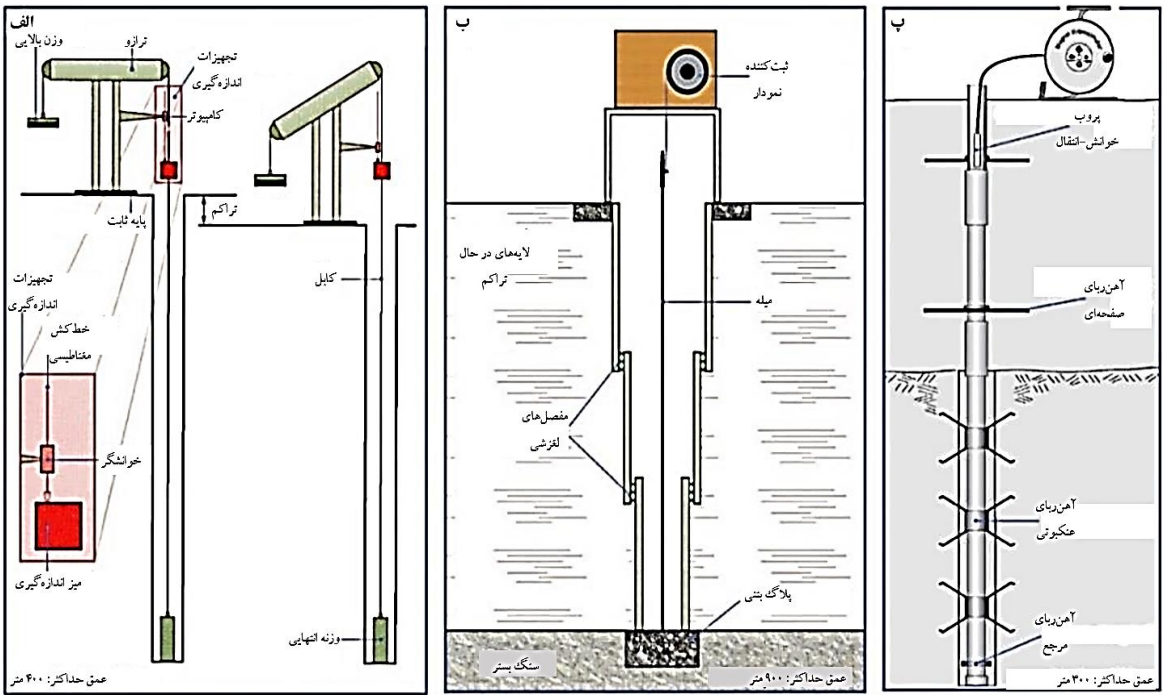
وقتی لایه‌های زمین نشست می‌کنند، مفصل‌ها جابه‌جا می‌شوند، اما طول میله در داخل تغییر نمی‌کند. اختلاف بین حرکت جدار چاه و میله مرکزی، همان تغییر ضخامت لایه‌ها است.

اکستنسومتر چندلایه مغناطیسی (شکل ۱۳-پ) برای اندازه‌گیری تغییر شکل در چند عمق مختلف سازه‌های زمین‌شناسی طراحی شده است. اجزای اصلی آن عبارت هستند از:

- پروب خوانش-انتقال که داخل لوله حرکت می‌کند و موقعیت آهن‌رباها را می‌خواند؛
- آهن‌رباهای صفحه‌ای که در لایه‌های پرشده قرار داده می‌شوند؛
- آهن‌رباهای عنکبوتی که به دیواره چاه متصل می‌شوند و با تغییر شکل زمین حرکت می‌کنند؛

- آهن‌ربای مرجع که نقطه ثابت را مشخص می‌کند.

حداکثر عمق کاربرد این نوع اکستنسومتر حدود ۳۰۰ متر است. با پایین بردن پروب داخل لوله، سیستم محل دقیق هر آهن‌ربا را شناسایی می‌کند. تغییر موقعیت هر آهن‌ربا نسبت به زمان، نشان‌دهنده تغییر شکل یا نشست لایه متناظر در آن عمق است.



شکل ۱۳- انواع اکستنسومترهای چاهی (Gambolati and Teatin, 2021)

٦-١-٤- پیزومترها

این ابزارها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب زیرزمینی استفاده می‌شوند و داده‌های آنها برای تحلیل ارتباط بین افت سطح آب و فرونشست زمین به‌کار می‌رود. از آن‌جاکه یکی از دلایل اصلی فرونشست، کاهش تنش موثر بین دانه‌ای در لایه‌های زیرسطحی در اثر افت سطح آب زیرزمینی است، با اندازه‌گیری روند تغییرات و میزان افت سطح آب زیرزمینی می‌توان میزان کاهش فشار آب منفذی و در نتیجه، افزایش تنش موثر را تعیین نمود. سپس، با استفاده از اصول مکانیک خاک و تئوری تحکیم ترزاقی و با اندازه‌گیری مشخصات لایه‌های زیرسطحی، میزان نشست تحکیمی محاسبه می‌شود. در این روش، علاوه بر تعیین میزان افت سطح آب زیرزمینی با استفاده از

پیزومترها، مشخصات خاک نیز با انجام برخی از آزمایش‌های آزمایشگاهی، شامل آزمایش تحکیم برای تعیین ضرایب فشردگی، ضریب تحکیم، شاخص‌های تراکم‌پذیری، آزمایش نفوذپذیری برای تعیین سرعت زهکشی در لایه‌ها و آزمایش مدول تغییر شکل برای تعیین سختی و مقاومت لایه‌ها در برابر تغییر شکل تعیین می‌شوند. سپس، با استفاده از روابط کلاسیک محاسبه نشست الاستیک و نشست تحکیمی و مدل‌سازی رفتار تنش-کرنش، مقادیر نشست لایه‌ها و و نهایتا، میزان فرونشست محاسبه می‌شود.

٦-١-٥- استفاده از فشارسنج‌ها و انحراف‌سنج‌ها[1]

روش دیگر، استفاده از فشارسنج‌های چاهی و حسگرهای الکترونیکی برای تشخیص فازهای تحکیم اولیه و ثانویه و نرخ فشردگی است. اندازه‌گیری تراکم لایه‌ها و سنجش میزان فشردگی عمقی لایه‌ها یکی دیگر از روش‌های مستقیم است که طی آن با کارگذاری لوله و یا تلسکوپی، میزان فشردگی عمقی و تراکم لایه‌ها اندازه‌گیری و بر اساس آنها، میزان تغییر حجم لایه‌ها و در نتیجه، میزان فرونشست تعیین می‌شود. این روش، دقیق‌ترین روش مستقیم برای ثبت جابه‌جایی بین یک نقطه مرجع در عمق و سطح زمین است و در آن، امکان تفکیک عمقی لایه‌های متراکم‌شونده وجود دارد.

٦-٢- روش‌های سنجش از دور

این روش‌ها، به‌عنوان ابزار اصلی مطالعات مدرن فرونشست، شامل اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع سطح زمین از فضا با دقت سانتی‌متری تا میلی‌متری هستند و مزایایی مانند پوشش وسیع، امکان تحلیل بلندمدت، امکان پایش دوره‌ای مناطق وسیع بدون نیاز به حضور زمینی و هزینه نسبتا کم دارند. روش‌های سنجش از دور، بسیار متنوع هستند. در این قسمت، سه مورد از آنها که کاربرد بیشتری دارند، ارائه می‌شوند.

[1] Inclinometers

٦-٢-١- تداخل‌سنجی راداری[1]

از اوایل دهه ۱۹۹۰، با عملیاتی شدن ماهواره‌های راداری، تداخل‌سنجی راداری نیز به‌صورت گسترده مورد استفاده متخصصان علوم زمین قرار گرفت (Motagh etal., 2017). تداخل‌سنجی داده‌های راداری در بین روش‌های متنوع وگوناگون آشکارسازی تغییرات پوسته زمین به‌عنوان بهترین روش اندازه‌گیری پوسته این تغییرات از حیث هزینه، مقیاس و سرعت مطرح است. اصول این تکنیک برای اولین بار توسط گراهام در سال ۱۹۷۴ بیان شد. بدین صورت که تداخل‌سنجی تفاضلی راداری تغییرات فاز را از دو زوج تصویر راداری که در زمان‌های مختلف و به‌صورت پیوسته اخذ شده‌اند، محاسبه کرده، مبتنی بر آن، تغییرات به‌وجود آمده در پوسته زمین را به‌صورت کمی و کیفی آشکار می‌کند. این فن، برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های حاصل شده از زمین لرزه، جابه‌جایی یخچال‌ها و پدیده فرونشست و یا بالاآمدگی زمین با موفقیت به‌کار گرفته شده است (اصغری سراسکانرود و محمدزاده شیشه‌گران، ۱۴۰۰). مزیت اصلی InSAR، پوشش وسیع مکانی و امکان پایش مستمر در طول زمان است.

فناوری‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی رادارای از اختلاف فاز علایم راداری بین تعدادی (حداقل دو مورد) سنجنده در همان منطقه استفاده می‌کنند. اختلاف فاز به‌طور دقیق مربوط به جابه‌جایی سطح زمین است که پس از حذف اثر توپوگرافی سطح و کاهش اختلالات جوی، آشکار می‌شود. روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی امکان تشخیص و اندازه‌گیری حرکت زمین را در مقیاس‌های زیر سانتی‌متر با جزئیات مکانی و وضوح اندازه‌گیری زیاد فراهم می‌کند. از سال ۱۹۹۰ تا کنون، سنجده‌های راداری متعددی فعال بوده‌اند که مهم‌ترین آنها می‌توان به مواردی مانند ERS-1/2; ENVISAT; JERS-1; Radarsat-1/2, ALOS, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed اشاره کرد. سنجده راداری سنتینل-۱ (SENTINEL-1) نیز از سال ۲۰۱۴ فعال شده و استفاده از آن به‌طور گسترده برای اهداف مختلف، مانند ارزیابی فرونشست عمومیت یافته است **(Gambolati and Teatin, 2021)**.

1. Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR

با پرتاب ماهواره راداری سنتینل-۱ توسط اتحادیه فضایی اروپا، مجموعه تصاویر راداری زیادی در دسترس عموم قرار گرفته است. این تصاویر از سه نوار کنار هم که هر نوار دارای ۹ قطعه است، تشکیل شده است. این تصاویر، محدوده ۱۵۰ کیلومتر در راستای مسیر پرواز ماهواره و ۲۵۰ کیلومتر در راستای عمود بر پرواز را با قدرت تفکیک مکانی حدود ۱۴ متر پوشش می‌دهد. ویژگی بارز تصاویر این ماهواره در مقایسه با ماهواره‌های راداری پیشین اتحادیه فضایی اروپا پوشش وسیع‌تر منطقه تصویربرداری و قدرت تفکیک زمانی مناسب‌تر تصاویر اخذ شده از منطقه است که هر ۱۲ روز است. ازآنجاکه تکنولوژی مشاهده زمین با اسکن‌های پیشرفته، سرعت بالای داپلر در راستای آزیموت را تولید می‌کند، برای جلوگیری از ایجاد پرش و ناپیوستگی در اختلاف فاز تصاویر در بین قطعات هر نوار، ثبت هندسی بسیار دقیق تصاویر در حد یک‌هزارم پیکسل در راستای آزیموت مورد نیاز است (آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲). بدین‌ترتیب، ملاحظه می‌شود که بایگانی داده‌ای زیادی از سنجه‌های راداری در بسیاری از مناطق وجود دارد که می‌توانند برای ازیابی فرونشت در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

روش تداخل‌سنجی راداری که امکان اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین را با دقت میلی‌متری فراهم می‌کند، در ایران نیز در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای یافته است. به‌طوری‌که تاکنون مطالعات متعددی از جمله حق‌شناس حقیقی و معتق (۲۰۱۹) در تهران، معتق و همکاران (۲۰۱۷) در رفسنجان و بابایی و همکاران (۲۰۲۰) در قزوین، اصغری سراسکانرود (۱۴۰۰) در دشت شهریار، آقایاری و همکاران (۱۴۰۱) در دشت شهریار، آمیغ پی و عربی (۱۴۰۲) برای کل کشور، قهرودی و علی نوری (۱۴۰۰) در دشت سبزوار، حداد و خراسانی (۱۳۹۸) در دشت سمنان، صالحی معتمد و همکاران (۱۳۹۸) در دشت مشهد، علیزاده و همکاران (۱۴۰۲) و عمادالدین و همکاران (۱۴۰۱) در دشت ورامین، نظم فر و شیرزادگان (۱۴۰۱) در دشت مشگین، و شریفی‌کیا و همکاران (۱۳۹۹) در دشت نورآباد از این روش برای پایش فرونشست زمین در دشت‌های مختلف استفاده کرده‌اند.

اخیرا، نسخه‌های به‌روزتر و پیشرفته‌تری از روش‌های تداخل‌سنجی توسعه و مورد استفاده قرار گرفته اند. از این روش‌ها می‌توان به مواردی مانند تکنیک پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS-InSAR)[1] که از نقاط با بازتاب راداری پایدار استفاده می‌کند، و روش اینترفرومتری راداری تفاضلی[2] (DInSAR) که برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین بین دو زمان مختلف استفاده می‌شود نام برد **(Gambolati and Teatin, 2021)**.

٦-٢-٢- استفاده از سنسورهای فیبر نوری[3]

به‌دنبال گسترش و نیاز به پایش زیرساخت‌های عمرانی، استفاده از حسگرهای فیبر نوری در سال‌های گذشته افزایش یافته است. این روش، این امکان را فراهم می‌کند تا مشاهدات و اعلان هشدارهای اولیه به‌موقع خطرات طبیعی و ناشی از فعالیت‌های انسانی، مانند زمین‌لغزش‌ها، جریان‌های واریزه‌ای، فرونشست و درز و شکاف زمین امکان‌پذیر گردد. در این روش، فرض بر این است که ویژگی‌های حسگرهای فیبر نوری تحت تاثیر محیط‌های پیرامونی تغییر می‌کند و هر واکنشی از محیط پیرامونی، بسته به شدت و علایم انتشار یافته در محیط بر روی خواص فیبرها اثر گذاشته و دمای آن را تغییر می‌دهد و در نتیجه، تغییرات دمایی ناشی از جابه‌جایی‌ها، بارگذاری‌ها، فشارهای زمین، فشار منفذی آب و رطوبت خاک، میزان اثر مشخص می‌شود. **(Gambolati and Teatin, 2021)**.

٦-٢-٣- روش‌های تلفیقی

همان‌طورکه اشاره شد، برای پایش و اندازه‌گیری فرونشست زمین، روش‌های بسیار متنوع و مختلفی، شامل دو گروه سنجش از دور و ژئودتیک (مساحی و زمینی) وجود دارد. در سال‌های اخیر، رویکرد تلفیقی استفاده از روش‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری‌های زمینی برای پایش جامع فرونشست در ایران مورد توجه قرار گرفته

[1] Permanent Scatter InSAR- PS-INSAR
[2] Differential SAR Interferometry, DInSAR
[3] Fiber Optic Sensors (FOS)

است. این رویکرد ترکیبی، امکان درک بهتر مکانیسم‌های فرونشست، ارتباط آن با عوامل مختلف و پیش‌بینی روند آینده را فراهم می‌کند. اخیرا، آمیغ‌پی و عربی (۱۴۰۲) برای اولین بار با تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیک، اطلاعات چاه‌های پیزومتری و سری زمانی، وضعیت سطح این چاه‌ها و مناطق بحرانی کاهش سطح آب را مورد شناسایی قرار دادند. با توجه به پردازش‌های انجام شده در بازه زمانی **۱۳۹۵** تا **۱۳۹۹** فرونشست در **۲۵۴** پهنه **۳۰** استان کشور شناسایی و نقشه جامع فرونشست زمین در ایران تهیه شد. سپس، با محاسبه میدان جابه‌جایی سطحی زمین در ایران با استفاده از پردازش تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ با نرم افزار GMTSAR با دقت ثبت هندسی بالا و صحت‌سنجی نتایج آن با مشاهدات ترازیابی دقیق و مشاهدات GPS، ایستگاه‌های دایمی مناطق تحت تاثیر پدیده فرونشست در کشور مورد شناسایی و ارزیابی قرار گرفت (آمیغ‌پی و عربی، ۱۴۰۲).

۷- اثرات و پیامدهای فرونشست

فرونشست زمین می‌تواند پیامدهای گسترده و گاه جبران‌ناپذیر به‌دنبال داشته باشد. این پدیده می‌تواند هم بر زیرساخت‌های سطحی و سازه‌ای و هم بر سیستم‌های هیدرولوژیکی و کارکرد آبخوان‌ها اثرات عمیق بگذارد. این پیامدها معمولا به‌دلیل ناهمگونی نشست‌ها، فشردگی دائمی لایه‌ها و تغییر رژیم جریان آب ایجاد می‌شوند. در ادامه، مهم‌ترین اثرات و پیامدها ارائه می‌شود.

۷-۱- اثرات سازه‌ای و زیرساختی

در پی وقوع فرونشست، تاسیسات زیربنایی به صورت‌های مختلف و به‌شرح زیر دچار آسیب می‌شوند:

- **تخریب سازه‌ها**: فرونشست غیریکنواخت باعث تغییر شکل بستر زمین می‌شود و این امر، تنش‌های اضافی و ناخواسته‌ای به سازه‌ها وارد می‌کند. سازه‌ها به‌دلیل سختی نسبی خود نمی‌توانند این تغییر شکل ناهمگون را دنبال کنند و در نتیجه، بی‌ثباتی پی‌ها، اعوجاج سازه و کاهش ایمنی کلی ساختمان‌ها رخ می‌دهد.

- **ترک‌خوردگی ساختمان‌ها**: نشست‌های نامتقارن، یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد ترک در دیوارها و کف ساختمان‌ها است. زمانی که بخش‌های مختلف زمین با نرخ متفاوتی پایین می‌روند، اجزای سازه‌ای تحت کشش یا فشار غیرعادی قرار می‌گیرند و این تنش‌ها به ایجاد ترک‌های سطحی و سازه‌ای منجر می‌شود.

- **آسیب به خطوط انتقال آب، گاز و فاضلاب**: نشست زمین موجب جابه‌جایی عمودی و افقی در لوله‌های مدفون می‌شود. این جابه‌جایی‌ها می‌توانند سبب پارگی لوله‌ها، شکست اتصالات، تغییر شیب کانال‌ها و اختلال در عملکرد شبکه انتقال شوند. ازآن‌جاکه این زیرساخت‌ها نسبت به تغییر شکل حساس‌اند، حتی نشست‌های کوچک نیز مشکلات جدی ایجاد می‌کنند.

- **آسیب و از بین رفتن پوشش آسفالت**: روسازی‌ها در برابر نشست بسیار آسیب‌پذیر هستند. فرونشست باعث ایجاد موج، ترک، شکاف و ناهمواری در خیابان‌ها و جاده‌ها می‌شود. بارگذاری ترافیکی، این آسیب‌ها را تشدید کرده و موجب تخریب سریع شریان‌های شهری و برون‌شهری می‌گردد.

- **تخریب زیرساخت‌های حمل و نقل:** زیرساخت‌هایی مانند خطوط راه‌آهن، باند فرودگاه و بزرگراه‌ها به نشست حتی جزئی بسیار حساس هستند. فرونشست موجب ناهمواری، موج‌دار شدن سطح، اعوجاج خطوط ریلی و کاهش ایمنی حرکت وسایل نقلیه می‌شود و هزینه نگهداری و تعمیر را به‌شدت افزایش می‌دهد.

۷-۲- اثرات هیدروژئولوژیکی

از جمله آسیب ها و پیامدهای ناخواسته ناشی از فرونشست، به موارد متعددی به‌شرح زیر می‌توان اشاره نمود:

- **کاهش برگشت‌پذیری ظرفیت آبخوان:** یکی از مهم‌ترین آثار هیدروژئولوژیکی، فشردگی دائمی لایه‌های ریزدانه است. این فشردگی، موجب کاهش تخلخل و از دست رفتن همیشگی بخشی از ظرفیت ذخیره آبخوان می‌شود. پس از وقوع تحکیم در این لایه‌ها، بازگشت به وضعیت اولیه تقریبا غیرممکن است.

- **افزایش خطر سیلاب:** فرونشست با کاهش ارتفاع نسبی سطح زمین، عملکرد طبیعی زهکشی را مختل می‌کند. مناطق فرونشسته تمایل بیشتری به نگهداشت آب دارند و در صورت بارش شدید، آب سطحی در این نواحی جمع می‌شود. این امر، احتمال وقوع سیلاب، آب‌گرفتگی و افزایش مدت ماندآب را بالا می‌برد.

- **تغییر شیب زمین و مسیر جریان آب:** نشست نامتوازن، باعث تغییر الگوی شیب سطح زمین می‌شود و در نتیجه، مسیر جریان‌های سطحی و زیرسطحی دچار اختلال می‌شود. این پدیده، می‌تواند مسیر کانال‌ها، نهرها، قنوات و شبکه‌های آبیاری را تغییر دهد و باعث کاهش کارآیی سیستم‌های مدیریت آب شود.

۷-۳- پیامدهای میراث فرهنگی و تاریخی

فرونشست، تهدیدی جدی برای بناهای تاریخی و میراث فرهنگی است، زیرا این بناها اغلب بر پایه‌های قدیمی و مصالح سنتی بنا شده‌اند که مقاومت کمی در برابر تغییرات ناهمگن سطح زمین دارند. ترک‌های ناشی از نشست می‌توانند دیوارهای آجری و سنگی را از هم باز کنند و موجب فروپاشی تدریجی شوند. در ایران، مسجد جامع

اصفهان، بناهای تاریخی یزد و آثار ارزشمند مشهد در معرض خطر هستند. این بناها نه‌تنها ارزش فرهنگی دارند، بلکه نقش مهمی در گردشگری و هویت ملی ایفا می‌کنند. از بین رفتن یا آسیب‌دیدن آنها به‌معنای از دست دادن بخشی از حافظه تاریخی کشور است. در سطح جهانی، شهر ونیز نمونه‌ای بارز است که نشست زمین و بالا آمدن سطح آب دریا هم‌زمان بناهای تاریخی آن را تهدید می‌کند. بنابراین، فرونشست نه‌تنها یک بحران فنی، بلکه یک تهدید فرهنگی و اجتماعی است که باید در سیاست‌های ملی حفاظت میراث فرهنگی لحاظ شود.

۷-٤- پیامدهای کشاورزی و زیست‌محیطی

نشست زمین، اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر کشاورزی و محیط زیست دارد. تراکم خاک ناشی از فرونشست، باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود، در نتیجه آب و مواد غذایی کمتر به ریشه گیاهان می‌رسد و حاصلخیزی خاک کاهش می‌یابد. این امر، تولید محصولات کشاورزی را تهدید می‌کند و امنیت غذایی کشور را به خطر می‌اندازد. علاوه بر این، افت سطح آب زیرزمینی ارتباط هیدرولوژیکی با تالاب‌ها و رودخانه‌ها را قطع می‌کند و موجب خشک شدن آنها می‌شود. نمونه بارز در ایران، تالاب گاوخونی و بختگان است که به‌دلیل افت شدید سطح آب زیرزمینی و فرونشست، بخش‌های وسیعی از آنها خشک شده‌اند. این تغییرات، زیستگاه‌های طبیعی را نابود کرده و تنوع زیستی را کاهش می‌دهد. در سطح جهانی، هلند و اندونزی با نشست ناشی از زهکشی زمین‌های توربی مواجه‌اند که باعث از دست رفتن زمین‌های کشاورزی و افزایش انتشار کربن شده است. بنابراین، فرونشست نه‌تنها یک بحران زمین‌شناسی، بلکه یک تهدید جدی برای پایداری محیط‌زیست و کشاورزی است.

۷-۵- پیامدهای اجتماعی و اقتصادی

فرونشست پیامدهای گسترده‌ای بر جامعه و اقتصاد دارد. سکونتگاه‌های انسانی در مناطق نشست‌دار در معرض خطر مستقیم هستند؛ ترک ساختمان‌ها، شکست زیرساخت‌ها و کاهش کیفیت زندگی می‌تواند منجر به مهاجرت‌های اجباری شود. در ایران، بیش از ۴۰ میلیون نفر در شهرها و روستاهای درگیر فرونشست زندگی

می‌کنند و این، یعنی نیمی از جمعیت کشور در معرض تهدید است(شریفی‌کیا، ۱۳۹۱). از نظر اقتصادی، هزینه‌های تعمیر و بازسازی زیرساخت‌ها بسیار سنگین است و بودجه‌های عمرانی را تحت فشار قرار می‌دهد. همچنین، ارزش زمین و املاک در مناطق نشست‌دار کاهش می‌یابد و سرمایه‌گذاری در این مناطق کم‌رنگ می‌شود. در سطح جهانی، مکزیکوسیتی نمونه‌ای بارز است که نشست زمین نه‌تنها زیرساخت‌ها را تخریب کرده، بلکه ارزش اقتصادی زمین‌های شهری را نیز کاهش داده است. این پیامدها نشان می‌دهد که فرونشست یک بحران چندبعدی است که باید در سیاست‌های اجتماعی و اقتصادی کشور به‌طور جدی لحاظ شود.

۸- راهکارهای احیای مناطق دچار فرونشست

بررسی جامع داده‌ها، مطالعات پیشین، تحلیل‌های ژئوتکنیکی، هیدروژئولوژیکی و همچنین شواهد میدانی نشان می‌دهد که فرونشست زمین در جهان، به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران، اکنون یکی از مهم‌ترین، گسترده‌ترین و بحرانی‌ترین مخاطرات طبیعی-انسانی است. مخاطره‌ای که علاوه بر تهدید مستقیم سازه‌ها، زیرساخت‌ها، اراضی کشاورزی و آثار تاریخی، موجب از بین رفتن دائمی بخش بزرگی از ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها شده و این موضوع، بزرگ‌ترین خسارت پنهان و غیرقابل جبران آن است. به‌طوری‌که از این پدیده به‌عنوان زلزله خاموش یاد می‌شود. از آن‌جاکه این پدیده، یک موضوع چند علیتی و چندبعدی است، اقدامات اصلاحی و مدیریت آن نیز نیازمند مدیریت هماهنگ و چندبخشی و در نظر گرفتن علت یا علل ایجاد آن است. تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد که ترکیب اقدامات پیشگیرانه، پایش دقیق، اصلاح الگوی مصرف و ترمیم زیرساخت‌ها می‌تواند نرخ فرونشست را کاهش دهد و آثار آن را محدود کند. در ایران نیز تدوین مقررات ملی فرونشست و هماهنگی بین دستگاه‌های اجرایی، گام نخست در مسیر مدیریت علمی این بحران است. از این رو، مدیریت فرونشست، نیازمند ترکیبی از اقدامات پیشگیرانه (کنترلی) و اصلاحی (علاج‌بخشی) است. اقدامات کنترلی بر کاهش عوامل محرک تمرکز دارند، درحالی‌که اقدامات علاج‌بخشی به کاهش آثار و ترمیم آسیب‌ها می‌پردازند. این دو دسته باید در قالب یک برنامه ملی هماهنگ و چندبخشی اجرا شوند.

۸-۱- اقدامات کنترلی (پیش‌گیرانه)

با توجه به این که علت غالب فرونشست در کشور ناشی از افت شدید سطح آب زیرزمینی است، مدیریت این پدیده باید بر کنترل عوامل محرک و اصلاح پیامدهای آن متمرکز باشد. در این راستا، موارد زیر قابل توصیه هستند:

۸-۱-۱- کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی

کنترل برداشت آب زیرزمینی، مهم‌ترین و بنیادی‌ترین اقدام برای مهار فرونشست در ایران است، زیرا علت غالب نشست، ناشی از افت سطح آبخوان‌هاست. در شرایطی که بیش از ۱۴۰ میلیارد متر مکعب از توان اکولوژیکی آبخوان‌های کشور برداشت شده، فشار منفذی کاهش یافته و تراکم لایه‌های رسی و سیلتی آغاز شده است. برای سازگاری با این روند، نخستین گام ایجاد سامانه پایش و کنترل برداشت است. نصب کنتورهای هوشمند روی چاه‌ها و اتصال آنها به سامانه ملی پایش، امکان نظارت بر میزان برداشت و تخلف را فراهم می‌کند. تجربه‌های پایلوت در استان یزد و خراسان نشان داده‌اند که این اقدام می‌تواند افت سطح آب را کاهش دهد. علاوه بر کنترل برداشت، انسداد چاه‌های غیرمجاز طبق قانون توزیع عادلانه آب ضروری است؛ در تهران بیش از ۳۰ درصد چاه‌ها فاقد پروانه‌اند و همین عامل، یکی از محرک‌های اصلی فرونشست جنوب غرب تهران است. در کنار این اقدامات، مدیریت تقاضا نیز حیاتی است. سهمیه‌بندی برداشت در مناطق بحرانی، تغییر الگوی مصرف صنعتی و کشاورزی، و اعمال تعرفه‌های بازدارنده برای مصارف پرآب‌بر، جایگزینی آب زیرزمینی با منابع سطحی، بهبود روش‌های آبیاری، تغییر الگوی مصرف، جابه‌جایی چاه‌ها به لایه‌های کم‌تراکم‌تر و وضع قوانین محدودکننده برداشت می‌توانند فشار موثر وارد بر لایه‌های رسی و آبرفتی را کاهش دهند و روند فرونشست را کند یا متوقف کنند. بسیاری از نمونه‌های موفق، مانند توکیو، سن‌خوزه و شانگهای بر پایه همین اصل شکل گرفته‌اند. در مجموع، مدیریت منابع آب زیرزمینی باید همزمان فنی، قانونی و اقتصادی باشد تا بتواند بحران فرونشست را مهار کند.

۸-۱-۲- تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها

راهکار دیگر، تغذیه مصنوعی آبخوان‌هاست؛ یعنی هدایت رواناب‌ها و سیلاب‌ها به حوضچه‌های نفوذی یا تزریق مستقیم به سفره‌های زیرزمینی. تغذیه مصنوعی، چه از طریق پخش آب در سطح زمین و چه از طریق چاه‌های تزریق، می‌تواند سطح آب زیرزمینی را بالا آورده و فشار منفذی را بازیابی کند و در نتیجه، از افزایش

تنش موثر جلوگیری کند. این روش در مناطقی که لایه‌های آبخوان در نزدیکی سطح، بیرون‌زدگی دارند یا در سیستم‌های محصور که تزریق مستقیم انجام می‌شود کارایی بسیار بالایی داشته است. نمونه‌های موفق، شامل تزریق آب در میدان نفتی ویلمینگتون و عملیات گسترده تغذیه در شانگهای هستند. این اقدام در دشت ورامین نتایج مثبتی داشته و نرخ افت سطح آب را کاهش داده است.

۸-۱-۳- اصلاح الگوی کشاورزی

بخش عمده مصرف آب در ایران مربوط به کشاورزی است و همین بخش، بیشترین فشار را بر آبخوان‌ها وارد می‌کند. بنابراین، اصلاح الگوی کشاورزی یکی از کلیدی‌ترین اقدامات کنترلی است. نخستین گام، تغییر روش‌های آبیاری است؛ جایگزینی آبیاری غرقابی با روش‌های نوین مانند قطره‌ای، بارانی و زیرسطحی بدون افزایش سطح زیر کشت می‌تواند به میزان قابل توجهی صرفه‌جویی در مصرف آب ایجاد کند. گام دوم در این خصوص، اصلاح الگوی کشت است. محصولات پرآب‌بر مانند برنج، چغندرقند، لوبیا، صیفی جات و گیاهان علوفه ای نباید در مناطق خشک کشت شوند. این تغییر، نه‌تنها مصرف آب را کاهش می‌دهد، بلکه ارزش اقتصادی بالاتری نیز دارد .گام سوم، توسعه کشت گلخانه‌ای با رویکرد انتقال کشت فضای باز به گلخانه بدون تخصیص جدید برای آن است. گلخانه‌ها با کنترل شرایط محیطی، بهره‌وری آب را افزایش می‌دهند و امکان تولید پایدار در مناطق کم‌آب را فراهم می‌کنند. در کنار این اقدامات، آموزش کشاورزان و حمایت مالی دولت برای تغییر الگوی کشت ضروری است. بدون اصلاح کشاورزی، هیچ برنامه‌ای برای مهار فرونشست موفق نخواهد بود.

۸-۱-٤- پایش و هشدار سریع

فرونشست، یک پدیده تدریجی است، اما پیامدهای آن ناگهانی و مخرب ظاهر می‌شوند. بنابراین ایجاد سامانه پایش و هشدار سریع حیاتی است. فناوری‌های نوین، مانند رادار تداخل‌سنجی ماهواره‌ای، امکان پایش نرخ نشست

با دقت میلی‌متری را فراهم می‌کنند. در تهران و مشهد، نقشه‌های دقیق نشست با استفاده از InSAR تهیه شده و پهنه‌های بحرانی شناسایی شده‌اند. علاوه بر آن، نصب ایستگاه‌های دائمی GPS و ژئودزی می‌تواند تغییرات سطح زمین را به‌صورت لحظه‌ای ثبت کند. این داده‌ها باید در قالب یک سامانه ملی پایش فرونشست یکپارچه شوند و در اختیار وزارت نیرو، سازمان زمین‌شناسی، وزارت راه و شهرسازی و سازمان میراث فرهنگی قرار گیرند. چنین سامانه‌ای می‌تواند به‌عنوان مرجع تصمیم‌گیری عمل کند و هشدارهای لازم را برای جلوگیری از توسعه شهری یا کشاورزی در مناطق بحرانی صادر نماید. تجربه‌های جهانی نشان داده‌اند که پایش دقیق می‌تواند از خسارات میلیاردی جلوگیری کند؛ در ژاپن و هلند، سامانه‌های پایش فرونشست نقش کلیدی در مدیریت بحران داشته‌اند.

۸-۱-۵- کاهش بارگذاری و مدیریت توسعه شهری

توسعه نامناسب شهری و ساخت و ساز روی خاک‌های نرم می‌تواند مشکلات فرونشست را تشدید کند. مدیریت ساخت و ساز در مناطق حساس، جلوگیری از ایجاد بارگذاری سنگین روی خاک‌های تراکم‌پذیر و اعمال محدودیت‌های شهری از اقداماتی است که به کاهش تنش وارده و پیشگیری از نشست بیشتر کمک می‌کند.

۸-۲- اقدامات سازگارانه و اصلاحی

علاوه بر اقدامات پیشگیرانه که شاید موثرترین و مناسب ترین اقدام باشند، در شرایط وقوع فرونشست و آسیب به تاسیسات می توان از اقدامات علاج بخشی، اصلاحی و رویکردهای سازگاری با فرونشست به شرح زیر استفاده نمود.

۸-۲-۱- مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و سازه‌ها

در مناطقی که فرونشست اجتناب‌ناپذیر است، باید زیرساخت‌ها و سازه‌ها مقاوم‌سازی شوند تا آسیب‌ها کاهش یابد. یکی از روش‌های مهم، استفاده از پی‌های شناور است که بار سازه را به سطح وسیع‌تری منتقل می‌کنند و اثر

نشست ناهمگن را کاهش می‌دهند. در ساختمان‌های بلند، استفاده از پی‌های عمیق ضروری است؛ این پی‌ها بار سازه را به لایه‌های عمیق‌تر و پایدارتر خاک منتقل می‌کنند. برای خطوط انتقال نیرو و آب، طراحی سازه‌های انعطاف‌پذیر با اتصالات قابل حرکت می‌تواند شکست ناشی از نشست را کاهش دهد. همچنین، استفاده از تزریق مصالح در خاک برای افزایش مقاومت و کاهش تراکم‌پذیری یکی از روش‌های رایج مقاوم‌سازی است. در برخی پروژه‌های تهران و اصفهان، تزریق سیمان به خاک موجب کاهش نرخ نشست محلی شده است. در مجموع، مقاوم‌سازی باید بخشی از آیین‌نامه ملی ساخت‌وساز در مناطق نشست‌دار باشد.

۸-۲-۲- تثبیت و خواص ژئوتکنیکی بستر سازه ها

روش‌های ژئوتکنیکی تثبیت لایه‌های مشکل‌ساز، شامل تزریق مصالح برای کاهش نشت و افزایش مقاومت لایه‌ها، پیش‌بارگذاری برای تخلیه پیش‌رونده آب منفذی و کاهش نفوذپذیری لایه‌ها برای مدیریت بهتر فشار منفذی هستند. این اقدام‌ها، به‌ویژه در مناطق دارای تونل، خاک‌های ریزدانه حساس یا لایه‌های با قابلیت تراکم بالا پیشنهاد می‌شوند و می‌توانند به‌عنوان مکمل راهبردهای آبخوان‌داری عمل کنند.

۸-۲-۳- تدوین مقررات ملی فرونشست

ایجاد یک چارچوب قانونی الزام‌آور برای مدیریت فرونشست ضروری است. این مقررات باید شامل مفاد مشخص باشد:

- ضوابط ساخت و ساز: الزام طراحی سازه‌ها با در نظر گرفتن نشست احتمالی، استفاده از پی‌های مقاوم و انعطاف‌پذیر و ممنوعیت ساخت‌وساز سنگین در پهنه‌های بحرانی
- ضوابط برداشت آب: تعیین سقف برداشت سالانه برای هر دشت بر اساس ظرفیت اکولوژیکی، نصب کنتور هوشمند به‌عنوان شرط صدور پروانه و اعمال جریمه برای تخلف

- ضوابط کشاورزی: ممنوعیت کشت محصولات پرآب‌بر در مناطق بحرانی، الزام استفاده از روش‌های نوین آبیاری و حمایت مالی برای تغییر الگوی کشت
- ضوابط پایش: ایجاد سامانه ملی پایش فرونشست و الزام دستگاه‌ها به گزارش‌دهی دوره‌ای
- ضوابط میراث فرهنگی: پایش بناهای تاریخی در مناطق نشست‌دار و الزام به مقاوم‌سازی آنها

این مقررات باید در قالب یک آیین‌نامه ملی فرونشست تدوین شود و به‌عنوان سند الزام‌آور برای همه دستگاه‌های اجرایی عمل کند. تنها با چنین چارچوبی می‌توان مدیریت فرونشست را از سطح توصیه‌های عمومی به سطح سیاست‌های اجرایی ارتقا داد.

۸-۲-٤- ترمیم و بازسازی مناطق آسیب‌دیده

در مناطقی که نشست شدید رخ داده، اقدامات علاج‌بخشی ضروری است. این اقدامات شامل پرکردن ترک‌ها و شکاف‌ها با مصالح مناسب برای جلوگیری از گسترش آنها، تثبیت خاک با استفاده از آهک یا ژئوسنتتیک‌ها برای افزایش مقاومت و بازسازی خطوط انتقال با لوله‌های انعطاف‌پذیر است. علاوه بر این، باید از توسعه شهری در پهنه‌های بحرانی جلوگیری شود و مناطق آسیب‌دیده به‌عنوان پهنه‌های پرخطر در طرح‌های شهری مشخص شوند. در برخی کشورها مانند مکزیکوسیتی، توسعه شهری در مناطق نشست‌دار ممنوع شده و این اقدام از خسارات بیشتر جلوگیری کرده است.

۸-۲-٥- ایجاد نهاد متولی واحد

امروزه، فرونشست زمین در ایران به یک بحران ملی بدل شده است؛ بحرانی که نه‌تنها زیرساخت‌ها و محیط‌زیست را تهدید می‌کند، بلکه پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی گسترده‌ای دارد. این بحران چندبعدی، نیازمند مدیریت هماهنگ و چندبخشی است؛ یعنی ضرورت دارد سازمان های ذی‌مدخل، مانند

وزارت نیرو، وزارت راه، سازمان میراث فرهنگی، وزارت جهاد کشاورزی و نهادهای اجتماعی هم‌زمان و در تعامل با یکدیگر برای مدیریت این بحران ملی اقدام نمایند. تنها با چنین رویکردی می‌توان از تبدیل فرونشست به یک بحران غیرقابل کنترل جلوگیری کرد. علی‌رغم این‌که طی سال‌های اخیر، همواره اظهارنظرهای متعددی توسط محققین، فعالان رسانه ای سیاسی و اجتماعی و نیز مسئولین و کارشناسان دستگاه‌های دولتی، از جمله وزارت نیرو، راه و شهرسازی، جهاد کشاورزی، محیط زیست و مدیریت بحران در خصوص این پدیده صورت می گیرد و اغلب این اظهار نظرها هم با ارائه آمارهای مختلف هشداری هستند، ولی به‌نظر می‌رسد که متولی مشخصی برای مسئولیت‌پذیری، شناسایی، کنترل و کاهش آن وجود ندارد. لذا برای مدیریت آن، اراده و تعامل دستگاه‌های ذی‌مدخل اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، تشکیل مرجع ملی مدیریت فرونشست با مشارکت وزارت نیرو، راه و شهرسازی، جهاد کشاورزی، محیط زیست، وزارت کشور، مدیریت بحران و دانشگاه‌ها و سایر نهادهای ذی‌مدخل همراه با تدوین ساز و کارهای روشن برای پاسخ‌گویی، مسئولیت‌پذیری و تهیه نقشه راه ملی توصیه می‌شود.

۸-۲-٦- اقدامات فرهنگی، آموزشی و اجتماعی

با توجه به ماهیت آرام، تدریجی و ناحیه‌ای فرونشست، به‌ویژه در لایه‌های ریزدانه، بخش بزرگی از خسارت‌ها در کوتاه‌مدت قابل مشاهده و لمس نیست، ولی در بلندمدت به‌شکل ترک‌خوردگی‌های وسیع، شکاف‌های عمیق، تخریب راه‌ها، خطوط انتقال و ساختمان‌ها ظاهر می‌شوند. همچنین، با توجه به پیش‌رونده بودن این پدیده، ماهیت برگشت‌ناپذیر آن و نقش پررنگ افت سطح آب زیرزمینی، مدیریت فرونشست در ایران باید به یک اولویت ملی، تبدیل شود. در این راستا، اجرای کمپین‌های ملی آگاهی‌بخشی درباره بحران فرونشست، آموزش مدیران محلی، کارشناسان آب منطقه‌ای و کشاورزان، گنجاندن موضوع فرونشست در آموزش‌های محیط‌زیستی و دانشگاهی و اطلاع‌رسانی درباره خسارت‌های پنهان آن، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

۹- جمع بندی و تحلیل نتایج

با توجه به مباحث عنوان شده در بخش های قبلی ملاحظه می شود فرونشست در ایران از نظر گستره و شدت پدیده فرونشست زمین، در وضعیت بسیار بحرانی قرار دارد. بطوریکه امروزه از یک مخاطره محلی فراتر رفته و به یک چالش ملی با پیامدهای جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و زیرساختی تبدیل شده است. امروزه این پدیده تنها یک برآورد و یا تحلیل کارشناسی نیست بلکه به عنوان یک رویداد بطور روشن و قابل لمس برای عموم گشته است. از اینرو مطالعات و پژوهش های بسیار متنوع و گسترده ای نیز طی سالیان اخیر در خصوص ارزیابی میزان و نرخ فرونشست انجام گرفته است. بر اساس مجموعه نتایج و آموزه های حاصل از این بررسی ها موارد زیر قابل استنتاج و بیان است:

۱- بر اساس نتایج مستندات منتشره شده در نشریه های علمی کشور، همه استان های کشور به جز استان گیلان دچار فرونشست با درجات متفاوتی از میزان و نرخ وقوع سالانه هستند. بطوریکه حدود ۱۰ تا ۱۱ درصد از مساحت کشور به‌طور مستقیم درگیر این پدیده است.

۲- میزان فرونشست در مناطق مختلف کشور متفاوت و از چند سانتیمتر تا ۴۳ سانتیمتر در سال برآورد شده است. بیشترین نرخ‌های فرونشست عمدتا در مناطق با برداشت شدید آب زیرزمینی و تمرکز فعالیت‌های کشاورزی و شهری مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که بیشترین میزان فرونشست در تهران (دشت تهران تا ۴۳ سانتی‌متر در سال)، دشت رفسنجان (منطقه بهرمان) تا حدود ۴۰ سانتی‌متر در سال، در نواحی جنوبی البرز حدود ۳۵ سانتی‌متر در سال و در جنوب‌غرب تهران نزدیک به ۳۰ سانتی‌متر در سال گزارش شده است. همچنین، دشت‌هایی نظیر قم، گلستان و خراسان رضوی نیز با نرخ‌های قابل‌توجهی در حدود ۲۰ تا ۲۲ سانتی‌متر در سال مواجه‌اند.

۳- در اغلب بررسی ها با اثبات همبستگی قوی بین فرونشست و سطح آب زیرزمینی، عامل اصلی فرونشست زمین در ایران برداشت بی رویه از منابع آب زیرزمینی معرفی شـده است. بطوریکه با وقوع خشـکسالی های اخیر و با افزایش برداشت از آب های زیرزمینی سرعت فرونشست تشدید شده است.

٤- با توجه به اینکه فرآینده فرونشـست حرکت زمین بسته به ساختار زمین شناسی، بصورت بطئی و ناحیه ای است، عوارض ناشی از آن آرام و پیشرونده اتفاق می افتد و ممکن است به سادگی و در کوتاه مدت قابل تشخیص نباشد

٥- پیامدهای فرونشست از دو منظر بسیار مهم و قابل تامل است. اولی وقوع تخریب در سازه ها و تاسیسات زیربنابی شهری، صنعتی و کشاورزی است که عمدتا هزینه و خسارت های مالی و جانی بسیاری به دنبال دارد. پیامد دوم که خسارت اصلی و پنهان فرونشست است، از بین رفتن منافذ بین دانه ای خاک و به تبع آن ظرفیت نگهداری آب در خاک است. از بین رفتن منافذ خاک تقریبا غیر قابل برگشت و خسارتی جبران ناپذیر است. بطوریکه حتی در صورت وقوع شرایط تر سالی بارندگی و آب مازاد در سال های آتی، تغذیه آبخوان به شکل اول ناممکن خواهد بود.

٦- با توجه به پراکندگی و تنوع شرایط جغرافیایی، زمین‌شناسی و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در استان‌های مختلف کشور، بررسی فرونشست به‌صورت استانی و منطقه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. چنین تحلیل‌هایی امکان شناسایی مناطق با ریسک بالا، متوسط و پایین و همچنین، تعیین اولویت اقدامات مدیریتی و سیاست‌گذاری پایدار منابع آب را فراهم می‌کند.

۷- پیامدهای کلیدی فرونشست زمین ایجاب می‌کند که استان‌هایی با بیشترین فرونشست، مانند تهران، فارس و البرز، اقدامات جدی برای کنترل برداشت آب، پایش زیرساخت‌ها و اصلاح مدیریت شهری و کشاورزی انجام دهند و در استان های دیگر که میزان فرونشست تاکنون کمتر بوده ولی روند سرعتی وقوع آن افزایشی است نیز اقدامات مشابه صورت گیرد.

۸- علیرغم اینکه طی سال های اخیر همواره اظهارنظرهای متعددی توسط محققین، فعالان رسانه ای سیاسی و اجتماعی و نیز مسئولین و کارشناسان دستگاه های دولتی از جمله وزارت نیرو، راه و شهرسازی، جهاد کشاورزی، محیط زیست، مدیریت بحران و... درخصوص این پدیده بصورت می گیرد، و اغلب این اظهار نظرها هم با ارائه آمارهای مختلف هشداری می باشد، لیکن به نظر می رسد متولی مشخصی برای مسئولیت پذیری، شناسایی، کنترل و کاهش آن وجود نداشته باشد. بدیهی است برای مدیریت آن، اراده و تعامل دستگاه های ذیمدخل اجتناب ناپذیر است

۹- در مجموع و با عنایت به مباحث کوتاه عنوان شده مهمترین رویکرد برای مدیریت فرونشست اقدامات پیشگیرانه است. گرچه برای اصلاح و یا ترمیم سازه و تاسیسات خسارت دیده می توان اقداماتی انجام داد. کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی و برنامه ریزی مناسب آبخوانداری موثرترین راهکار برای کنترل پدیده فرونشست باشند. لذا تمام اقدامات پیشنهادی و عملیاتی بایستی در راستای این دو رویکرد باشند.

فهرست منابع

آقایاری، ل.، عابدینی، م. و اصغری سراسکانرود، ص. ۱۴۰۱. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت اردبیل). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۱ (۱): ۱۱۷-۱۳۲.

آمیغ‌پی، م. و عربی، س. ۱۴۰۲. مطالعه وضعیت فرونشست زمین در اثر استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در ایران با استفاده از نقشه جامع فرونشست کشور. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹ (۵): ۱۴۵-۱۵۶.

آمیغ‌پی، م.، قراییان، ف. و عربی، س. ۱۴۰۳. افزایش بی‌سابقه نرخ فرونشست شهر تهران. سازمان نقشه‌برداری.

اصغری سراسکانرود، ص. و محمدزاده شیشه‌گران، م. ۱۴۰۰. برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت شهریار). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۰ (۱): ۴۰-۵۴.

توسلی، ا. کاربین، ح.، ترابی، م. و عساکره، ع. ۱۳۹۸. بررسی عوامل موثر بر فرونشست دشت جنوب شرقی تهران بر اثر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی. نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، ۴ (۲): ۵۸-۷۲.

جوادی، س.م.ر. ۱۴۰۰. برآورد و تحلیل میزان فرونشست دشت همدان-بهار با استفاده از تصاویر راداری و سری زمانی SBAS. رساله دکتری، دانشگاه تبریز.

حداد، ع. و خراسانی، ا. ۱۳۹۸. اثر تغییرات سطح آب زیرزمینی بر فرونشست دشت سمنان. نشریه علوم زمین. سال ۲۸ شماره ۱۱۲

حصارکی‌زاد، ع.، یمانی، م. و گورابی، ا. ۱۴۰۳. تحلیل جامع فرونشست زمین در ایران: مروری سیستماتیک به وضعیت فعلی. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۳ (۳): ۲۳-۴۵.

رحیمی، ح. و عباسی، ن. ۱۳۹۳. مهندسی ژئوتکنیک ؛ خاک های مشکل آفرین . انتشارات دانشگاه تهران.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۳۹۸. فرونشست و پیامدهای نامطلوب آن در ایران و جهان. وزارت صنعت، معدن و تجارت.

شرکت مدیریت منابع آب ایران. (۱۴۰۰). گزارش وضعیت آب‌های زیرزمینی کشور.

شریفی‌کیا، م. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به‌کمک روش تداخل‌سنج راداری در دشت نوق-بهرامان. برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۶ (۳): ۷-۵۵.

شفیعی، ن.، مختاری، ل.گ.، امیراحمدی، ا. و زندی، ر. ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸ (۴): ۹۳-۱۱۱.

صالحی متعهد، ف.، حافظی مقدس، ن.، لشکری‌پور، غ. و دهقانی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی فرونشست زمین به‌کمک تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد. نشریه زمین‌شناسی مهندسی. ۱۳ (۳): ۴۳۵-۴۶۲.

عابدینی، م. ۱۳۹۲. بررسی علل فرونشست دشت اردبیل و اثرات آن در محدوده شهر. جغرافیای طبیعی، ۶ (۱۹): ۷۱-۸۴.

عباس‌نژاد، ا. ۱۴۰۱. نشست زمین. نشر دانشگاه شهید باهنر (کرمان).

عباسی، ن. ۱۴۰۴. بیلان منابع و مصارف آب و مدلسازی تخصیص آب کشاورزی استان زنجان. گزارش نهایی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. در دست بررسی

علیزاده زکریا، ز.، عبادی، ح. و فرنود احمدی، ف. ۱۴۰۲. امکانسنجی استفاده از تداخل‌سنجی راداری به منظور اندازه‌گیری فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی. نشریه علمی ژئومکانیک نفت، دوره ۶؛ شماره ۱؛

۱. عمادالدین، س.، شاهی، و.، آرخی، ص. و آق‌آتابای، م. ۱۴۰۱. تعیین میزان فرونشست زمین در محدوده مخروط‌افکنه جاجرود با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴ (۲): ۱۶۸-۱۸۲.

فاضلی عبداله ، ۱۴۰۰ ، متن مصاحبه با انتخاب . کد خبر :۶۴۳۴۲۳

قهرودی تالی،م. و علی نوری، خ. ۱۴۰۰. تحلیل عوامل مؤثر بر فرونشست در دشت سبزوار. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی ، دوره ۳۰ ، شماره ۱

نظم‌فر، ح. و شیرزاد گرجان، م. ۱۴۰۱. پایش فرونشست سطح زمین با فن تداخل‌سنجی راداری (محدوده مورد مطالعه: دشت مشکین). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱ (۳۱): ۲۵-۴۸.

وزارت نیرو. (۱۳۹۹). گزارش سالانه وضعیت آب‌های زیرزمینی و اقدامات مقابله با فرونشست.

Allis, R., Bromley, C. and Currie, S. 2009. Update on subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zealand. Geothermics, 38 (1): 169-180.

Anderssohn, J., Motagh, M., Walter, T. R., Rosenau, M., Kaufmann, H., & Oncken, O. (2008). Surface deformation time series and source modeling for a volcanic complex system based on satellite wide swath and image mode interferometry: The Lazufre system, central Andes. Remote Sensing of Environment, 112(5), 2160-2172.

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2017). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. Scientific Reports, 7(1), 1-9

Babaee, S., Mousavi, Z., Masoumi, Z., Malekshah, A. H., Roostaei, M., & Aflaki, M. (2020). Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, *41*(12), 4780-4798.

Galloway, D.L. and Sneed, M. 2013. Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA. Boletín de la Sociedad GeolóGica Mexicana, 65 (1): 123-136.

Gambolati, G. and Teatini, P. 2021. Land Subsidence and its Mitigation. The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada.

Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. Remote Sensing of Environment, 221, 534-550.

Haghshenas-Haghighi, M. and Motagh, M. 2024. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. Science Advances, 10 (19): adk3039.

Khorrami, M., Abrishami, S., Maghsoudi, Y., Alizadeh, B. and Perissin, D. 2020. Extreme subsidence in a populated city (Mashhad) detected by PSInSAR considering groundwater withdrawal and geotechnical properties. Scientific Reports, 10 (1): 1-16.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315-328.

Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. Iranian Studies, 49(6), 997-1016.

Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghighi, M., Wetzel, H. U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. Engineering Geology, 218, 134-151.

Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. Geophysical Research Letters, 35(16).

Poland, J.F. (Ed.). 1984. Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Ground-water Withdrawal. Studies and Reports in Hydrology, No. 40, UNESCO.

Shamshiri, R., Motagh, M., Baes, M., & Sharifi, M. A. (2020). Deformation analysis of the Lake Urmia causeway (LUC) embankments in northwest Iran: insights from multi-sensor interferometry synthetic aperture radar (InSAR) data and finite element modeling (FEM). Journal of Geodesy, 94(6), 1-18.

Wu, J., Shi, X., Xue, Y., Zhang, Y., and Wei Z. and Yu, J. 2008. The development and control of the land subsidence in the Yangtze Delta, China. Journal of Environmental Geology, 55 (8): 1725-1735.

An Analysis of Land Subsidence in Iran:
(Concepts, Impacts, and Strategies for Monitoring and Control)

Abstract

Land subsidence is a phenomenon that typically manifests as a gradual and extensive lowering of the ground surface, and in some cases, as sudden and localized collapses. It leaves profound, long-term, and often irreversible impacts on urban and rural infrastructure, agricultural lands, groundwater resources, critical structures, and cultural heritage. This report explains the basic concepts and principals of subsidence and describes its various forms of occurrence, causes and mechanisms, monitoring and measurement methods, and its technical and socio-economic consequences. Then, by reviewing and analyzing national and international research, it discusses the current status as well as progress of subsidence in various plains and regions of Iran. This report, then, presents a set of strategies for controlling and restoring areas affected by subsidence, in the forms of groundwater withdrawal management, modifying consumption and cultivation patterns, artificial recharge of aquifers, urban development management, geotechnical measures, strengthening monitoring and research, and promoting public awareness. Accordingly, adopting a national, long-term, inter-sectoral approach based on sustainable governance of water resources is introduced as the main and fundamental strategy for controlling subsidence in Iran.

Keywords: Aquifer management**,** Groundwater, Land subsidence, Soil consolidation, Subsidence monitoring

Ministry of Agriculture – Jahad
Agricultural Research, Education, and Extension Organization
Agricultural Engineering Research Institute

Report Title:	An Analysis of Land Subsidence in Iran: (Concepts, Impacts, and Strategies for Monitoring and Control)
Written by:	N. Abbasi & F. Taran
Employer:	Deputy of Water and Soil, Ministry of Agricultural Jahad & Agricultural Engineering Research Institute
Location:	Agricultural Engineering Research Institute
Publisher:	Agricultural Engineering Research Institute
Tirage:	-
Date of issue:	2026

Ministry of Agriculture – Jahad
Agricultural Research, Education, and Extension Organization
Agricultural Engineering Research Institute

Analytical Report:

An Analysis of Land Subsidence in Iran:
(Concepts, Impacts, and Strategies for Monitoring and Control)

Written by:

N. Abbasi & F. Taran

No: 69084

Ministry of Agreculture – Jahad
Agricultural Research, Education, and Extension Organization
Agricultural Engineering Research Institute

Analytical Report

An Analysis of Land Subsidence in Iran:
(Concepts, Impacts, and Strategies for Monitoring and Control)

No: 69084

بسمه‌تعالی

فرم ثبت انتشارات وزارت کشاورزی در
مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی

عنوان: تحلیلی بر فرونشست زمین در ایران؛ (مفاهیم، پیامدها و راهبردهای پایش و کنترل)
نویسنده: نادر عباسی و فرشید تاران
مترجم: -

درصورتی‌که اثر ترجمه باشد لطفاً عنوان و مشخصات کامل اخذ اصلی را مرقوم فرمانید.

گردآورنده:
ناظر:
چاپ:

در صورت تجدید چاپ لطفاً تاریخ انتشار چاپ‌های قبلی را مرقوم فرمانید.

ویرایش:
محل ناشر: کرج
نام ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
تاریخ انتشار:
تعداد صفحات: ۶۲ صفحه
شمارگان: -
زبان متن: فارسی (دارای چکیده انگلیسی)

لطفاً موضوع کتاب یا نشریه خود را حدود ۵۰ کلمه مرقوم فرمانید.

موضوع:

در این گزارش، مفاهیم و مبانی اولیه مرتبط با فرونشست، دلایل و مکانیزیم‌های وقوع، روش‌های پایش و اندازه‌گیری و نیز پیامدهای فنی، اقتصادی و اجتماعی آن تشریح گردیده است. سپس، وضعیت فعلی فرونشست در دشت‌ها و مناطق مختلف ایران و روند پیشرفت آن مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. در ادامه مجموعه‌ای از راهبردهای کنترل و احیای مناطق دچار فرونشست در قالب مدیریت برداشت آب زیرزمینی، اصلاح الگوی مصرف و کشت، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، مدیریت توسعه شهری، اقدامات ژئوتکنیکی، تقویت پایش و پژوهش و ارتقای آگاهی عمومی ارائه شده است.

نوع : **کتاب** **نشریه** ☑ **نشریه ادواری**