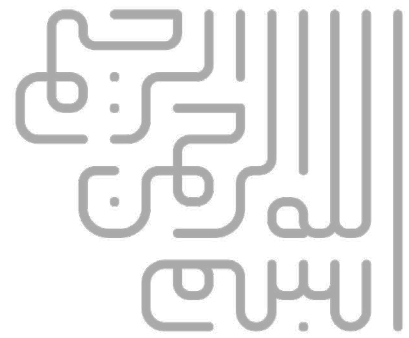


ملاحظات مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای در مواجهه با پدیده فرونشست



تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۴/۷
Publish Date : 2026/6/28



عنوان: ملاحظات مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای در مواجهه با پدیده فرونشست
تهیه و تدوین (Author): مهسا پایاب (گروه عمران و شهرسازی)
واژه‌های کلیدی: فرونشست، مدیریت شهری، توسعه منطقه‌ای، حفاظت از زیرساخت‌ها،
آمایش سرزمین
ناشر: مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

[DOI: 10.22034/mrc.report.21653](https://doi.org/10.22034/mrc.report.21653)

[Permanent Link:](#)

Publisher : Islamic Parliament Research Center of Iran

عنوان: ملاحظات مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای در مواجهه با پدیده فرونشست

نوع گزارش: طرح ☐ لایحه ☐، نظارتی ☐، راهبردی ☒، پیش‌نویس قانونی ☐

نام دفتر: مطالعات زیربنایی (گروه عمران و شهرسازی)

مدیر مطالعه: علی فرمان

اظهار نظر کنندگان: مصطفی اسماعیلی مهبیاری (دفتر مطالعات فرهنگی، گروه ورزش، میراث فرهنگی و گردشگری)، فرشته دستواره (دفتر مطالعات سیاسی، گروه سیاست داخلی)

ناظران علمی: حبیب‌اله ظفریان، میثم پيله فروش

گرافیک و صفحه‌آرایی: حمیده سادات وفایی

تاریخ شروع مطالعه: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱



فهرست مطالب

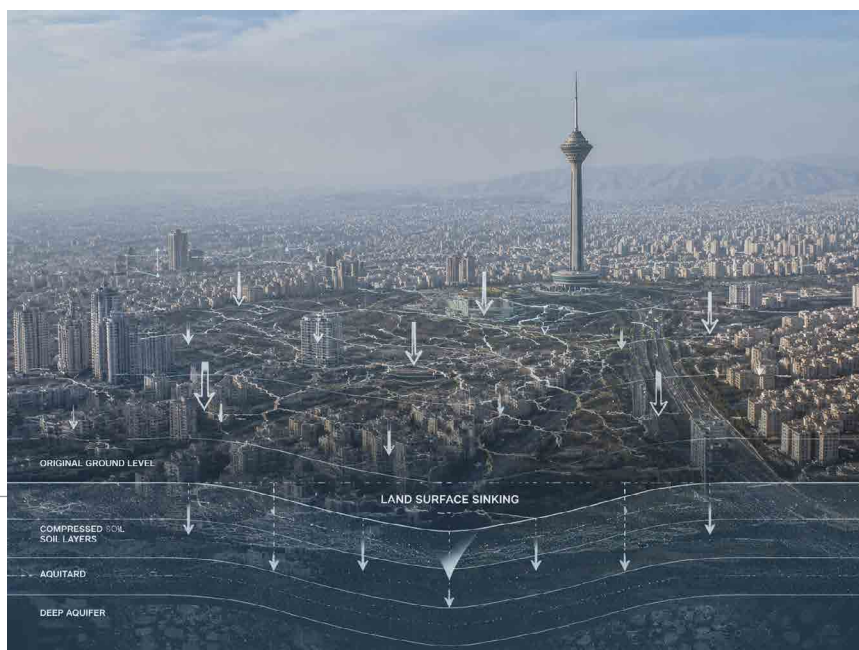
۷	چکیده.....
۷	خلاصه مدیریتی.....
۱۰	۱. مقدمه.....
۱۱	۲. پیشینه.....
۱۱	۱-۲. سوابق مطالعاتی.....
۱۵	۲-۲. سوابق تقنینی.....
۱۷	۳. رویکردها و نظریات شهرسازی در مواجهه با کم آبی.....
۱۷	۱-۳. مقایسه عرصه شهر با شرایط طبیعی و خاستگاه اصلی.....
۱۸	۲-۳. معرفی مهم ترین مفاهیم طراحی شهری مرتبط با آب.....
۲۱	۴. مروری بر تجربیات جهانی مدیریت شهری در مواجهه با فرونشست.....
۲۷	۵. وضعیت فرونشست در کشور و پیامدهای ناشی از آن.....
۳۲	۱-۵. وضعیت فرونشست در تهران.....
۳۹	۲-۵. وضعیت فعلی و مهم ترین چالش های حکمروایی موجود.....
۴۰	۶. آثار و پیامدهای فرونشست بر محیط های شهری.....
۴۴	۷. راهبردها و الزامات مدیریت شهری در کنترل و مواجهه با فرونشست.....
۴۳	۱-۷. اقدامات و راهبردهای حوزه شناسایی، پیش بینی و پایش فرونشست.....
۴۴	۲-۷. اقدامات و راهبردهای حوزه کاهش میزان و نرخ فرونشست زمین از طریق مدیریت منابع آب.....
۴۵	۳-۷. اقدامات و راهبردهای حوزه کاهش اثرات فرونشست بر مستحذات و زیرساخت ها.....
۴۶	۴-۷. روش های اجرایی حفاظت از زیرساخت ها در مقابل فرونشست.....
۵۰	۸. جمع بندی و نتیجه گیری.....
۵۲	۹. پیوست.....
۵۶	منابع و مآخذ.....

فهرست جداول

۱۳	جدول ۱. تحلیل پیشینه پژوهشی.....
۱۵	جدول ۲. تحلیل پیشینه تقنینی.....
۲۳	جدول ۳. برنامه های کوتاه مدت و بلندمدت کاهش مصرف آب در ژاپن و آمریکا.....
۲۷	جدول ۴. کشورهای با ساختار رسمی یا وزیر مرتبط با مخاطرات زمین شناختی.....
۳۲	جدول ۵. زیرساخت ها و تأسیسات مهم متأثر از فرونشست در پایتخت و کل کشور.....
۴۷	جدول ۶. روش های مقابله با اثرات فرونشست بر زیرساخت ها در جهان.....
۴۸	جدول ۷. نمونه قواعد ساخت ساختمان ها در مناطق دارای فرونشست در جهان.....
۴۹	جدول ۸. شرح مختصر مراحل طراحی ساختمان مقاوم در برابر فرونشست.....
۵۳	جدول ۹. اقدام های ساختاری (فنی) برای کاهش فرونشست و پیامدهای فیزیکی آن در مناطق شهری.....

فهرست اشکال

شکل ۱. نمودار فراوانی نسبی مصارف اصلی آب زیرزمینی برای آبخوان‌هایی که فرونشست زمین در آنها رخ داده است (در ۱۴۶ منطقه فرونشستی مورد مطالعه در جهان).....	۱۲
شکل ۲. نمودار تأثیر قانونگذاری بر میزان برداشت آب‌های زیرزمینی.....	۱۷
شکل ۳. نقشه حوضه‌های آبریز درجه ۳ دارای پهنه‌های فرونشستی زمین.....	۲۸
شکل ۴. نمودار فراوانی نسبی میانگین نرخ فرونشست زمین در: الف) ۱۹۴ منطقه فرونشستی مورد مطالعه در جهان و ب) ایران.....	۲۹
شکل ۵. نمودار فراوانی نرخ فرونشست کشور بر حسب سانتی‌متر در سال.....	۳۰
شکل ۶. نمودار مقایسه میانگین نرخ فرونشست در استان‌های کشور.....	۳۱
شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی فرونشست در استان تهران.....	۳۳
شکل ۸. نمودار تغییرات زمانی و مکان وقوع بیشینه نرخ فرونشست در تهران.....	۳۴
شکل ۹. نقشه گسترش و نفوذ پهنه فرونشست به محدوده شهری تهران در سال‌های آبی: الف) ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ و ب) ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۳.....	۳۶



ملاحظات مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای در مواجهه با پدیده فرونشست

چکیده



فرونشست زمین پدیده‌ای تدریجی است که معمولاً در کوتاه مدت به عنوان یک مخاطره فوری تلقی نمی‌شود؛ با این حال، تداوم آن می‌تواند پیامدهای قابل توجهی بر کارکردهای محیطی، کالبدی و مدیریتی شهرها بر جای گذارد. از آنجاکه بخش قابل توجهی از توسعه شهری و استقرار جمعیت در کشور بر پهنه‌هایی متکی است که با تنش منابع آب زیرزمینی مواجه‌اند، توجه نظام‌مند به فرونشست زمین در چارچوب مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای اهمیت ویژه‌ای یافته است. بر این اساس، گزارش پیش‌رو با هدف تبیین ابعاد مسئله، بررسی پیامدها و ارائه چارچوبی برای اقدام تهیه و تدوین شده است. یافته‌های این گزارش نشان می‌دهد که فرونشست زمین در محیط‌های شهری دارای اثرات و پیامدهایی در سه حوزه اصلی محیطی، زیرساختی و اقتصادی-اجتماعی است. در حوزه محیطی، این پدیده با کاهش ظرفیت آبخوان‌ها، فرسایش خاک و بیابان‌زایی همراه است. در حوزه زیرساختی، فرونشست می‌تواند موجب بروز آسیب‌های تدریجی در مستحداثات، زیرساخت‌ها و جریان‌های حیاتی شده و کارایی و ایمنی آنها را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی ناشی از افزایش هزینه‌های نگهداشت و بازسازی و اختلال در فعالیت‌های شهری از دیگر نتایج قابل توجه این پدیده است. بر این اساس، گزارش حاضر بر ضرورت اقدامی یکپارچه و پیش‌نگر با فرونشست زمین تأکید دارد و چارچوبی از راهبردها و الزامات مدیریت شهری را به منظور کمک به تصمیم‌گیری آگاهانه‌تر در سطوح سیاستگذاری و مدیریت شهری پیشنهاد می‌کند. این راهبردها، حوزه‌هایی نظیر شناسایی و پایش فرونشست، مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی و کاهش اثرات فرونشست بر مستحداثات و زیرساخت‌ها را در بر می‌گیرد.

خلاصه مدیریتی

■ بیان / شرح مسئله

فرونشست در کوتاه مدت و بلندمدت می تواند هزینه های سنگینی به شهرها تحمیل کند و نیازمند سیاست های مؤثر مدیریت و کاهش ریسک است. این پدیده با کاهش ظرفیت آبخوان ها، تأمین پایدار آب را تهدید کرده و با آسیب به زیرساخت های حمل و نقل، شبکه های آب و فاضلاب، برق و گاز و نیز برهم زدن شیب طبیعی زمین همراه است؛ حتی نرخ های اندک آن هم در بلندمدت می تواند خسارات جدی ایجاد کند. پیامدهای فرونشست در شهرها در سه حوزه اثرات محیطی، زیرساختی و اقتصادی - اجتماعی قابل دسته بندی است. همچنین پیوند فرونشست با مدیریت منابع آب و توسعه فضایی، نقش مدیریت شهری و توسعه منطقه ای را برجسته می کند؛ زیرا سیاست گذاری و برنامه ریزی فضایی، مدیریت منابع آب، توسعه زیرساخت و ضوابط ساخت و ساز می توانند در پیشگیری یا تشدید آن مؤثر باشند و برداشت کنترل نشده آب زیرزمینی و توسعه نامتوازن کالبدی از عوامل انسانی اصلی اند. در این چارچوب، مفاهیمی مانند طراحی شهری حساس به آب، مدیریت یکپارچه منابع آب شهری، توسعه شهری کم اثر، شهر اسفنجی و... مطرح شده اند.

بررسی منابع نشان می دهد این پدیده تاکنون به حریم ۱۶ مرکز استان نفوذ کرده و در ۱۰ مرکز استان دیگر در حال پیشروی است. در این میان، استان تهران بحرانی ترین وضعیت را از نظر نرخ سالیانه دارد؛ به طوری که در سال های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ نرخ فرونشست در یافت آباد و نسیم شهر به ۳۱/۱ سانتی متر در سال رسیده و مناطق ۱۰، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۱ تهران نیز رشد قابل توجهی در این زمینه داشته اند.

■ نقطه نظرات / یافته های کلیدی

گستره و ماهیت پیامدهای فیزیکی، اجتماعی - اقتصادی و زیست محیطی پدیده فرونشست به گونه ای است که برخورد با آن صرفاً از مسیر اقدامات مقطعی امکان پذیر نبوده و مستلزم تدوین و اجرای سیاست های هدفمند کاهش ریسک است؛ سیاست هایی که به طور هم زمان دربرگیرنده رویکردهای پیشگیرانه و اقدامات کاهنده اثرات باشد.

فرونشست در کشور پیامدهایی فراتر از خسارات کالبدی متعارف داشته و علاوه بر تهدید بالقوه جان شهروندان، موجب تحمیل هزینه های سنگین اقتصادی، اختلال در عملکرد زیرساخت های حمل و نقل و شریان های حیاتی، بروز پیامدهای امنیتی - سیاسی و زیست محیطی و تشدید آسیب پذیری شهرها شده است. همچنین تداوم فرونشست به مرگ تدریجی آبخوان ها، به ویژه در دشت تهران و در نهایت به بحرانی شدن وضعیت تأمین آب انجامیده است. شواهد میدانی نشان می دهد سیل گیر شدن اراضی، خسارات سازه ای به ساختمان ها، جاده ها، بزرگراه ها، خطوط راه آهن، سازه های کنترل سیلاب، شبکه های انتقال فاضلاب شهری، شبکه های توزیع برق و گاز، دکل های برق و نیز شکل گیری ترک ها و شکاف های عمیق در سطح زمین، از بارزترین نمودهای عینی این پدیده در پهنه های شهری کشور است.

بر اساس تجارب بین المللی، مهار برداشت بی رویه آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهم ترین محرک های فرونشست نیازمند ترکیبی از ابزارهای حقوقی، اقتصادی، فنی و نهادی است و با یک مداخله منفرد محقق نمی شود. کشورها متناسب با شرایط هیدروژئولوژیکی و ساختار حکمرانی آب، از مجموعه ای از راهکارها شامل تعیین سقف برداشت و سهمیه بندی، بازارهای آب، اصلاح قیمت گذاری، ممنوعیت های قانونی، توسعه شبکه های پایش، تغذیه مصنوعی آبخوان ها و انتقال مصرف کنندگان عمده به منابع آب سطحی استفاده کرده اند.

■ پیشنهاد راهکارهای تقنینی، نظارتی یا سیاستی

با توجه به گستره، پیچیدگی و پیامدهای چندبعدی فرونشست در محیط های شهری، مواجهه مؤثر با این پدیده مستلزم مجموعه ای هماهنگ از راهبردها در حوزه شناسایی و پایش، کاهش نرخ فرونشست از طریق مدیریت منابع آب و مداخلات کالبدی و زیرساختی است (تفصیل در بخش ۸ گزارش). به دلیل پیوند عمیق فرونشست با ساختارهای کالبدی، نهادی و مدیریتی شهر، مواجهه مؤثر با این پدیده مستلزم نگاهی فراتر از اقدامات فنی مقطعی و بخشی است. مدیریت شهری با توجه به نقش کلیدی که در حوزه آمایش سرزمین، الگوی توسعه، مدیریت

منابع آب، مکان‌یابی فعالیت‌ها و ضوابط ساخت‌وساز دارد، مستقیماً بر شدت و گستره فرونشست اثرگذار است. از این رو تدوین و اجرای بسته‌ای منسجم از سیاست‌های پیشگیرانه، کاهنده آسیب‌پذیری و ارتقای تاب‌آوری ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. اهم راهکارها و پیشنهادات مقابله با پدیده فرونشست زمین و کاهش پیامدهای آن در این چارچوب عبارت‌اند از:

- تأمین آب بر مبنای اصول پایداری و مدیریت یکپارچه منابع، جلوگیری از حفر چاه جدید در محدوده‌های شهری و بازنگری فوری در سیاست‌های بهره‌برداری در مناطق بحرانی مانند منطقه ۱۸ تهران.
- اقدام قاطع وزارت نیرو برای انسداد چاه‌های غیرمجاز ظرف یک سال و ارائه گزارش عمومی پیشرفت؛ همچنین بررسی علمی رابطه تغییرات سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست.
- اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی صرفاً پس از مطالعات جامع با همکاری شهرداری، وزارت نیرو و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و تأیید علمی احیای پذیری آبخوان، با تعیین دقیق محل، روش و منبع تأمین آب.
- بررسی دقیق چگونگی بازچرخانی و استفاده هدفمند از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری با رویکرد حفظ تعادل اکولوژیک و پرهیز از نگاه توسعه‌ای مبتنی بر منابع پساب؛ همراه با مطالعات ژئوتکنیک درباره اثرات حذف چاه‌های جذبی بر ساختار زمین و مقاومت خاک.
- استفاده از رواناب‌ها و آب حاصل از ذوب برف ارتفاعات در تغذیه آبخوان‌ها، افزایش نفوذپذیری مسیل‌ها به‌ویژه در مجاورت اراضی باز، حفاظت مضاعف از اراضی باغی و فضاهای باز واقع در عرصه یا مجاورت آبخوان‌ها.
- احیای بستر طبیعی رودخانه‌ها برای تقویت تغذیه طبیعی آبخوان و ایجاد چاه‌های دهانه‌گشاد سرپوشیده جهت جذب رواناب شهری.
- مطالعه دقیق نشست نامتقارن و اثرات آن بر سازه‌ها و زیرساخت‌های خطی مانند خطوط لوله انتقال و شبکه‌های ریلی؛ توجه ویژه به نقش شکاف‌های فرونشستی در آسیب به ساختمان‌ها.
- لحاظ کردن اثرات فرونشست در تشدید ریسک زلزله و سیل در سیاست‌های بارگذاری جمعیتی و تصمیمات مدیریت شهری به‌ویژه در مناطق بحرانی.
- صیانت حداکثری از باغات و آبخوان‌ها، جلوگیری از توسعه در پهنه‌های بحرانی، مدیریت آب‌های سطحی، آبیاری فضای سبز با پساب تصفیه‌شده و تنظیم ضوابط شهرسازی متناسب با ظرفیت منابع آب در قالب سیاست‌های الزام‌آور.
- تمرکز سیاست‌های مدیریت مصرف بر آب شرب و خدمات شهری در کلان‌شهرهایی با سهم پایین صنعت و کشاورزی مانند تهران؛ از جمله رعایت الزامات حداکثر دبی خروجی شیرآلات در مبحث ۱۶ مقررات ملی ساختمان، ممنوعیت آبیگری استخرهای شخصی، محدودیت کاشت و آبیاری چمن، استفاده از پساب برای آبیاری و کاشت گیاهان کم‌آب‌بر.
- استقرار نظام نظارت مستمر، ارزیابی دوره‌ای پیشرفت اقدامات، ایجاد سازوکار بازخورد سریع و الزام دستگاه‌ها به ارائه گزارش‌های عملکرد براساس شاخص‌های کمی و کیفی مطابق وظایف مندرج در قوانین و برنامه‌ها.



۱. مقدمه

فرونشست زمین^۱ یک پدیده ژئومورفولوژیکی-هیدرولوژیکی است که به صورت کاهش تدریجی سطح زمین در اثر تغییرات در لایه‌های زیرسطحی رخ می‌دهد. این پدیده به‌ویژه در محیط‌های شهری و پهنه‌هایی با برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی دیده شده و در مطالعات علمی به‌عنوان یکی از پیامدهای جدی مدیریت ناپایدار منابع آب شناخته شده است. علل طبیعی فرونشست عمدتاً شامل تحکیم خاک‌های تراکم‌پذیر، جمع‌شدگی و تورم خاک‌های چسبنده، تجزیه خاک‌های آلی، تخلیه آب‌های زیرزمینی و فرایندهای کارستی و تکتونیکی است. در مقابل، برداشت آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیت‌های معدنی، حفاری‌ها و سازه‌های زیرزمینی و همچنین گسترش افقی شهرها و بارگذاری ناشی از ساخت‌وسازهای شهری از عوامل انسانی هستند که می‌توانند موجب ایجاد یا تشدید فرایند فرونشست شوند. افزون بر این، هم‌زمانی فرونشست با بالا آمدن سطح آب دریا و تغییرات اقلیمی، میزان در معرض خطر بودن شهرها را نسبت به مخاطرات اضافی از جمله سیلاب افزایش می‌دهد. برخلاف برخی مخاطرات زمین‌شناختی یا ژئوفیزیکی با پیامدهای فوری و فاجعه‌بار مانند زلزله و زمین‌لغزش، فرونشست فرایندی نسبتاً کند و با شدت متوسط است که ممکن است دهه‌ها بگذرد تا به یک بحران جدی تبدیل شود. از این رو، این پدیده غالباً مورد توجه قرار نگرفته و به‌عنوان یک فاجعه شناخته نمی‌شود. ضمن اینکه پیامدهای فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی آن در مناطق شهری نیز معمولاً به‌عنوان یک تهدید بالقوه جدی درک نمی‌شود. با این حال، فرونشست در مقیاس‌های کوچک تا بزرگ می‌تواند اثرات منفی پرهزینه‌ای را در کوتاه‌مدت و بلندمدت بر شهرها تحمیل کند که مستلزم سیاست‌های مناسب مدیریت و کاهش ریسک است [۱].

پیامدهای فرونشست در محیط‌های شهری چندبعدی است. کاهش ظرفیت آبخوان‌ها می‌تواند تأمین پایدار آب را به چالش بکشد، در حالی که نشست زمین می‌تواند به آسیب به زیرساخت‌های حمل‌ونقل، شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب، برق و گاز و همچنین تغییر در شیب طبیعی زمین منجر شود. حتی نرخ‌های اندک فرونشست می‌توانند در بلندمدت باعث آسیب‌های جدی به زیرساخت‌ها و سازه‌های حساس شوند، زیرا تغییرات کوچک سطح زمین ممکن است تنش‌های غیرمتقارن و شکست‌های تدریجی در سازه‌های سطحی و زیر سطحی ایجاد کند. این پیامدها نه تنها هزینه‌های اقتصادی و عمرانی سنگین به همراه دارند، بلکه می‌توانند آسیب‌پذیری شهرها را در برابر سایر مخاطرات طبیعی مانند سیل یا زلزله افزایش دهند، چرا که زیرساخت‌های کلیدی در معرض تغییرات پایداری قرار می‌گیرند [۲].

پیوند میان فرونشست زمین و مدیریت منابع آب و توسعه فضایی، اهمیت نقش مدیریت نظام شهری و توسعه منطقه‌ای را برجسته می‌سازد. مدیریت شهری در معنای کلان شامل تصمیمات سیاستی و برنامه‌ریزی فضایی، مدیریت منابع آب، توسعه زیرساخت‌ها و تنظیم ضوابط ساخت‌وساز است. این مؤلفه‌ها می‌توانند در جهت پیشگیری یا تشدید فرونشست مؤثر باشند، چرا که برداشت کنترل نشده آب زیرزمینی و توسعه نامتوازن کالبدی از مهم‌ترین عوامل انسانی فرونشست هستند.

معمولاً برای حفاظت از شهرهای بزرگ در برابر فرونشست مداخلات فنی به کار گرفته می‌شوند؛ با این حال در بسیاری از مناطق شهری روش‌های نظام‌مند و مشخصی برای تعیین و انتخاب اقدامات مقابله‌ای متناسب با فرونشست وجود ندارد. افزون بر این به دلیل تنوع روش‌های پیشگیری و کاهش اثرات، تفاوت در ویژگی‌های فرونشست و گوناگونی زیرساخت‌ها و جوامع تحت تأثیر، ارزیابی عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت اقدامات مقابله‌ای با فرونشست همچنان با چالش‌های جدی مواجه است. یک راهبرد پیشنهادی برای انتخاب اقدامات کاهش فرونشست در مناطق شهری، تمرکز بر اقدامات ساختاری (یعنی راهکارهای فنی و مهندسی) با هدف پیشگیری از فرونشست و کاهش پیامدهای فیزیکی در مناطق شهری است؛ به گونه‌ای که هم فرونشست زمین و هم پیامدهای

فیزیکی ناشی از آن از جمله آسیب به سازه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد [۳]. اما صرفاً اقدامات فنی مهندسی برای پایش و کاهش فرونشست کفایت نمی‌کند؛ بلکه مواجهه مؤثر با این پدیده نیازمند یک رویکرد یکپارچه است که شامل شناسایی دقیق، پیش‌بینی مبتنی بر داده، پایش مستمر، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آمایش سرزمین باشد.

در این گزارش، مفهوم «مدیریت شهری» و «توسعه منطقه‌ای» در معنای موسع و نظام‌مند آن به کار رفته و صرفاً ناظر بر وظایف و اختیارات یک نهاد واحد تلقی نمی‌شود. منظور از مدیریت شهری، مجموعه ساز و کارهای سیاستگذاری، برنامه‌ریزی، تنظیم‌گری و اجرا در نظام اداره شهر و قلمروهای پیرامونی آن است که در سطوح محلی، منطقه‌ای و ملی و با مشارکت نهادها و دستگاه‌های متعدد شکل می‌گیرد. از این منظر، مواجهه با پدیده‌ای پیچیده و چندبعدی همچون فرونشست زمین، مستلزم در نظر گرفتن نقش و مداخلات طیف گسترده‌ای از نهادهای مؤثر در حوزه‌هایی نظیر مدیریت منابع آب، آمایش سرزمین، توسعه کالبدی، حفاظت از زیرساخت‌های شهری و مدیریت بحران است.

تمرکز اصلی این گزارش بر تحلیل فنی پدیده فرونشست، تبیین اثرات و پیامدهای آن بر محیط‌های شهری و استخراج مجموعه‌ای از راهکارها، ملاحظات و اقدامات ضروری در حوزه مدیریت نظام شهری و توسعه کالبدی در راستای کنترل، کاهش و مدیریت اثرات این پدیده است؛ به گونه‌ای که بتواند به عنوان مبنایی کارشناسی برای تصمیم‌سازی و سیاستگذاری در سطوح مختلف مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد.

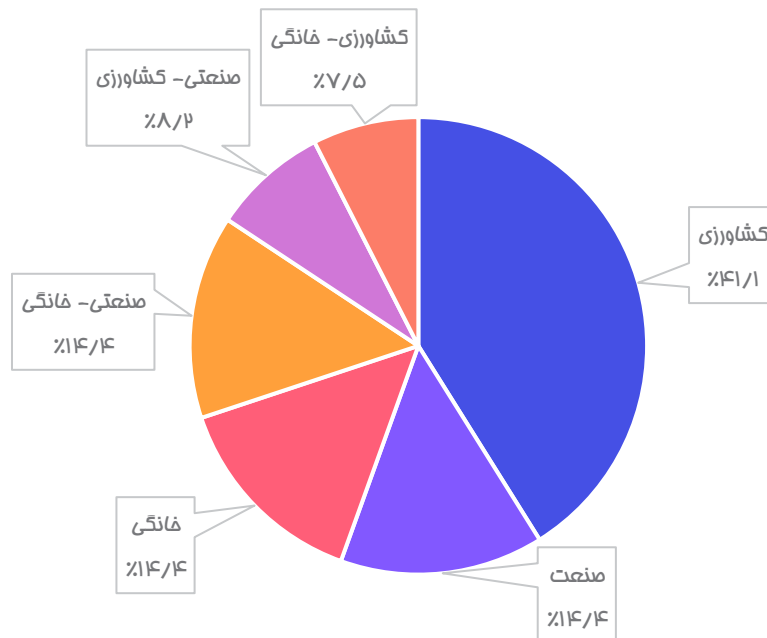
۲. پیشینه

۲-۱. سوابق مطالعاتی

در ادبیات تخصصی این موضوع، عوامل مؤثر بر پدیده فرونشست زمین به دو دسته کلی شامل عوامل انسانی و عوامل طبیعی تقسیم می‌شوند. در یک مطالعه جامع [۱] با هدف بررسی فرونشست زمین، ۲۹۰ مطالعه موردی از ۴۱ کشور جهان گردآوری شده است که عمدتاً در کلان‌شهرهای بزرگ نظیر بانکوک، پکن، کالیفرنیا، هیوستون، مکزیکوسیتی، شانگهای، جاکارتا و توکیو انجام شده‌اند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که ۷۷ درصد از رخداد‌های فرونشست دارای منشأ انسانی و تنها ۲۳ درصد منشأ طبیعی دارند. کاهش سطح آب‌های زیرزمینی عمدتاً به دلیل برداشت بی‌رویه، خشکسالی، افت بارش، کاهش نفوذپذیری خاک و تغذیه ناکافی آبخوان‌ها از مهم‌ترین محرک‌های فرونشست به‌شمار می‌رود. در این میان، بیش‌برداشت از آب زیرزمینی اصلی‌ترین عامل بروز این پدیده بوده و ۶۰ درصد موارد ثبت شده را شامل می‌شود. این مسئله به‌ویژه در کلان‌شهرهایی مانند تهران، شانگهای، پکن، مکزیکوسیتی و یونلین که منابع زیرزمینی به‌منظور تأمین آب شرب یا توسعه شهری تخلیه شده‌اند، نمود بارزی داشته است.

بررسی‌های میدانی و مدل‌سازی‌ها حاکی از آن است که الگوی مکانی افت سطح آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی با رشد سریع جمعیت و کشاورزی آبی بانواحی دچار فرونشست هم‌پوشانی بالایی دارد. براساس نتایج این مطالعات، تغییر کاربری زمین به‌ویژه بارگذاری ناشی از توسعه شهری و تبدیل اراضی بایر به کشاورزی پس از برداشت گسترده آب‌های زیرزمینی، دومین عامل مؤثر در شکل‌گیری فرونشست به‌شمار می‌رود و نزدیک به ۹ درصد از موارد را شامل می‌شود. استخراج نفت و گاز و فعالیت‌های معدنی نیز هر یک به‌طور مستقل تقریباً عامل ۴ درصد از موارد فرونشست هستند. بررسی توزیع مکانی و الگوی مصرف منابع آب زیرزمینی در ۱۴۶ منطقه ثبت شده با فرونشست نشان می‌دهد که در بسیاری از آنها نظیر دشت رفسنجان، مصارف آب زیرزمینی عمدتاً برای بخش کشاورزی بوده است. به‌گونه‌ای که تقریباً در ۴۱ درصد از سفره‌های مورد بررسی، تمامی برداشت‌ها به مصرف کشاورزی اختصاص داشته‌اند (شکل زیر).

شکل ۱. نمودار فراوانی نسبی مصارف اصلی آب زیرزمینی برای آبخوان‌هایی که فرونشست زمین در آنها رخ داده است (در ۱۴۶ منطقه فرونشستی مورد مطالعه در جهان) [۱]



مدیریت پدیده فرونشست و پیامدهای آن به‌ویژه در شهرهای واقع در نواحی ساحلی و دلتایی، یک چالش جهانی است که مستلزم اتخاذ سیاست‌های جامع کاهش ریسک شامل راهبردهای پیشگیرانه و کاهنده اثرات می‌باشد. شهرهایی مانند مکزیکوسیتی (مکزیک)، جاکارتا (اندونزی)، بانکوک (تایلند)، ونیز (ایتالیا)، نیواورلئان (ایالات متحده، لوئیزیانا)، لاگوس (نیجریه)، هوکایدو (ژاپن)، شانگهای (چین) و گودا (هلند) از جمله نمونه‌هایی هستند که تحت تأثیر پدیده فرونشست قرار گرفته‌اند. نرخ فرونشست در این شهرها دامنه‌ای از چند میلی‌متر در سال (برای مثال در گودا) تا چند ۱۰ سانتی‌متر در سال (برای نمونه در جاکارتا) را دربرمی‌گیرد و این پدیده موجب بروز فشارها و مشکلات اجتماعی-اقتصادی و همچنین خسارات زیست‌محیطی و سازه‌ای شده است. [۳].

در این راستا، چارچوب‌های متعددی برای مدیریت ریسک فرونشست ارائه شده که غالباً شامل چهار گام اصلی است. گام نخست، «تحلیل مسئله» است که گردآوری و تحلیل داده‌ها، تعیین علل فرونشست، ارزیابی خسارات و ارائه مدل پیش‌بینی را دربرمی‌گیرد. گام دوم «برنامه‌ریزی» است که شامل تدوین سناریوها، ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک، تحلیل هزینه-فایده، پیش‌بینی، به‌کارگیری سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، پیشنهاد راهکارهای نوآورانه یا جایگزین، تبادل دانش و تجارب موفق و انتخاب اقدامات پیشگیرانه و کاهنده اثرات می‌شود. گام سوم، مرحله «اجرا» است که نصب سامانه‌های پایش، آغاز پروژه‌های پایلوت و اجرای اقدامات پیشگیری و کاهش اثرات را شامل می‌شود. در نهایت، گام چهارم به «ارزیابی» اختصاص دارد که در آن چرخه مدیریت و چشم‌انداز آینده مورد سنجش و بازبینی قرار می‌گیرد. با وجود این چارچوب‌ها، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های انجام شده در ادبیات علمی (حدود ۶۳ درصد) بر اندازه‌گیری و پایش فرونشست در مناطق شهری با استفاده از روش‌های زمینی مانند ترازیابی، موقعیت‌یاب و اکستنسومترها و همچنین فناوری‌های سنجش از دور، از جمله تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و لیدار متمرکز بوده است. در مقابل، حدود ۳۰ درصد مطالعات به مدل‌سازی و پیش‌بینی اختصاص دارد و تنها حدود ۷ درصد از پژوهش‌ها نمونه‌های موردی را ارائه می‌دهند که در آنها اقدامات پیشگیرانه و کاهنده اثرات فرونشست به‌طور عملی اجرا شده است [۳].

در ادامه فهرستی از گزارش‌های منتشر شده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی که به‌طور مستقیم به موضوع فرونشست زمین، علل وقوع، آثار و پیامدهای این پدیده و اقدامات پیشنهادی در زمینه کاهش و کنترل آنها پرداخته‌اند، معرفی شده است.

جدول ۱. تحلیل پیشینه پژوهشی

ردیف	عنوان گزارش	سال انتشار	شماره مسلسل	نام دفتر / سازمان / نهاد	توضیحات
۱	اظهار نظر کارشناسی درباره: طرح کنترل فرونشست زمین و کاهش اثرات آن در کشور	۱۴۰۴	۲۱۲۲۳	دفتر مطالعات زیربنایی	تعدد قوانین و کارگروه‌ها در حوزه آب و فرونشست تاکنون نتوانسته در این بحران به‌طور ملموسی علاج‌بخش باشد. در صورت نیاز به قانونگذاری جدید، باید قانونی منسجم و یکپارچه با ضمانت‌های اجرایی کافی، بدون تداخل یا تعارض با اسناد و برنامه‌های موجود تهیه شود. پیش از آن، آسیب‌شناسی دقیق قوانین و طرح‌های موجود و شناسایی علل ناکارآمدی آنها الزامی است. نقطه قوت اصلی طرح پیشنهادی، تعیین متولی واحد است که باید با توجه به حدود وظایف، پرهیز از تمرکزگرایی، بخشی‌نگری و تعارض منافع انجام شود. با توجه به تعدد مواد این طرح، پیشنهاد شده که ساختار آن به‌صورت تک‌ماده‌ای یا با تعداد محدودی ماده تنظیم شود و جزئیات اقدامات در قالب آیین‌نامه‌های اجرایی به تصویب برسد تا انعطاف‌پذیری و امکان به‌روزرسانی آن نیز تسهیل شود. [۴]
۲	گزارش نظارتی وضعیت فرونشست شهر تهران (تقابل خطوط قرمز تأمین آب و تاب‌آوری شهر تهران)	۱۴۰۴	۲۰۹۵۴ (دسترسی محدود)	دفتر مطالعات زیربنایی	شدت فرونشست در داخل محدوده شهری پایتخت با انبوه بارگذاری ساختمانی و زیرساختی محل نگرانی عمیق و نیازمند اقدامات علاج‌بخشی فوری و کوتاه‌مدت در کنار راهکارهای میان‌مدت و بلندمدت است. درعین‌حال، استفاده گسترده از منابع آب زیرزمینی بدون انطباق با ظرفیت آبخوان به تشدید فرونشست به‌ویژه در منطقه ۱۸ تهران انجامیده است. در این میان، نقش نهادهای سیاستگذار، مدیریت شهری و سازمان‌های متولی در پیشگیری و مقابله با این پدیده بسیار حائز اهمیت است. تدوین و اجرای نقشه‌های پهنه‌بندی فرونشست در برنامه‌ریزی شهری، ممانعت قاطع از کف‌شکنی و حفر چاه‌های جدید، بازنگری در الگوی آبیاری فضای سبز، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، افزایش سطوح نفوذپذیر در سطح شهر و... از جمله راهکارهای کلیدی محسوب می‌شود. همچنین تأثیر این پدیده بر تشدید مخاطرات ثانویه (به‌خصوص در فرسودگی بافت و ابنیه) نظیر زلزله، فروچاله‌ها و آسیب‌های گسترده زیرساختی در مناطقی با محدودیت‌های اقتصادی و اجتماعی و امدادی باید در دستورکار مدیریت بحران و توسعه شهری قرار گیرد [۵].



ردیف	عنوان گزارش	سال انتشار	شماره مسلسل	نام دفتر / سازمان / نهاد	توضیحات
۳	اظهار نظر کارشناسی درباره: لایحه کنترل فرونشست زمین و کاهش اثرات آن در کشور (طرح شورای عالی استان‌ها)	۱۴۰۲	۱۹۴۲۶	دفتر مطالعات زیربنایی	کنترل پدیده فرونشست در حوزه شکل‌گیری و همچنین اثرگذاری کالبدی، نیازمند اتخاذ اقدامات ویژه است که در این لایحه مورد توجه قرار گرفته است. با این وجود، لایحه مذکور در بیشتر مواد دچار هم‌پوشانی و یا تضاد با قوانین موجود در حوزه فرونشست است که بررسی کلیات و جزئیات مواد آن در این گزارش ارائه شده است. طبق بررسی‌های کارشناسی انجام شده، پیشنهاد شد این لایحه ضمن اخذ نظرات کلیه دستگاه‌های ذی‌ربط با مواد محدود اصلاح شود [۶].
۴	تأثیر فرونشست بر زیرساخت‌ها و راهکارهای کنترل این اثرات	۱۴۰۱	۱۸۶۲۰	دفتر مطالعات زیربنایی	آثار مخرب فرونشست بر زیرساخت‌ها به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم وارد می‌شود. از جمله آثار مستقیم می‌توان به ترک خوردن، کج شدن، فروریختگی، فرسودگی بناها و تخریب و آسیب به زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی و توسعه شکاف‌های زمین، شکست زمین یا گسیختگی آن اشاره کرد. از طرفی وقوع فرونشست آثار غیرمستقیم اقتصادی نیز به جای می‌گذارد. افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها، کاهش ارزش زمین و اموال، اختلال در فعالیت‌های اقتصادی و... از جمله تبعات مالی وارده به شبکه زیرساخت در اثر فرونشست هستند. با توجه به اینکه روش‌های معقول مقابله با فرونشست مستلزم برنامه‌ریزی بلندمدت اجتماعی و مدیریتی است، در کوتاه‌مدت قابل دستیابی نیستند و لذا باید راهکارهای طراحی و تعمیر و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد [۷].
۵	فرونشست زمین، سرطان خاموش دشت‌ها و شهرهای ایران	۱۴۰۱	۲۵۰۱۸۴۷۹ (دسترسی محدود)	دفتر مطالعات زیربنایی	پدیده فرونشست بر خلاف وقایعی همچون سیل و زلزله آثار محسوس و لحظه‌ای به جای نمی‌گذارد و پیامدهای آن علی‌رغم خسارت‌بار بودن به دلیل پایین بودن سرعت وقوع و عدم بروز وجوه خارجی مشخص به راحتی قابل شناسایی نیستند. شناخت پدیده فرونشست و عوامل مؤثر بر آن با توجه به خسارت‌هایی که می‌تواند به ابنیه، تأسیسات زیربنایی و شریان‌های حیاتی وارد کند، بسیار حائز اهمیت است. انجام اقدامات لازم در جهت کنترل آسیب‌های ناشی از فرونشست خصوصاً در نواحی بحرانی فرونشست که دارای تراکم جمعیت، ابنیه و زیرساخت‌های حیاتی هستند ضرورت بالایی دارد. همچنین از آنجاکه فرونشست می‌تواند موجب افزایش آسیب‌پذیری در مقابل سیل و زلزله نیز باشد، لذا باید ارائه راهکارهای اصلاحی، پایش و برنامه‌ریزی در جهت کاهش خطر فرونشست و فروریزش در اولویت اقدامات پیشگیرانه قرار گیرد [۸].

۲-۲. سوابق تقنینی

شناسایی و احصای قوانین، آیین‌نامه‌ها، مصوبات و برنامه‌های توسعه‌ای مرتبط، به منظور تبیین چارچوب حقوقی حاکم، بررسی میزان انسجام و کفایت مقررات موجود و ارزیابی ظرفیت‌های قانونی برای مواجهه مؤثر با پدیده فرونشست زمین اهمیت ویژه‌ای دارد که در گزارش‌های پیشین [۴] [۶] به آن پرداخته شده است. بر همین اساس، آیین‌نامه‌ها، مصوبات و برنامه‌هایی که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم با موضوع این گزارش ارتباط دارند، در جدول زیر ارائه شده است. احکام تقنینی مرتبط با کنترل فرونشست و مقابله با آثار این پدیده به صورت پراکنده بوده و عمدتاً در قالب مقررات ناظر بر حوزه‌هایی مانند مدیریت منابع آب مطرح شده‌اند. از جمله معدود چارچوب‌های قانونی که به طور مستقیم به این موضوع پرداخته است، بند «ض»^۱ ماده (۱۴) قانون مدیریت بحران مصوب سال ۱۳۹۸ و برنامه ملی کاهش خطر حوادث و سوانح مصوب شورای عالی مدیریت بحران کشور در سال ۱۴۰۰ است که به طور مشخص و صریح فرونشست زمین را در زمره مخاطرات اولویت‌دار کشور طبقه‌بندی کرده و ۳۱ اقدام اولویت‌دار و زمان‌مند در این رابطه تعریف نموده است. اهم قوانین، آیین‌نامه‌ها، مصوبات و برنامه‌هایی که به طور مستقیم و غیرمستقیم با موضوع فرونشست در ارتباط هستند در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۲. تحلیل پیشینه تقنینی

ردیف	نام سند (قانون... / تصویب‌نامه... / ...)	مرجع تصویب	تاریخ تصویب
۱	قانون توزیع عادلانه آب	مجلس شورای اسلامی	۱۳۶۱
۲	آیین‌نامه اجرایی بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی	هیئت وزیران	۱۳۷۵
۳	سیاست‌های کلی نظام در بخش منابع آب	مجمع تشخیص مصلحت نظام	۱۳۷۹
۴	تصویب‌نامه هیئت وزیران در خصوص راهبردهای توسعه بلندمدت منابع آب کشور	هیئت وزیران	۱۳۸۲
۵	سیاست‌های کلی نظام برای پیشگیری و کاهش خطرات ناشی از سوانح طبیعی و حوادث غیرمترقبه	مجمع تشخیص مصلحت نظام	۱۳۸۴
۶	قانون تشکیل سازمان مدیریت بحران کشور	مجلس شورای اسلامی	۱۳۸۷

۱. بند ض ماده (۱) قانون مدیریت بحران - وزارت راه و شهرسازی (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی) موظف است:

۱. با رعایت ضوابط شورای عالی معماری و شهرسازی، نقشه حریم گسل‌ها را با اولویت کلان‌شهرها به همراه دستورالعمل‌های فنی نحوه ساخت‌وساز در حریم گسل‌ها تهیه کند.
 ۲. نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زلزله، خطرپذیری (ریسک) لرزه‌ای در سطوح ملی، استانی و شهری را تهیه و تصویب کند و نقشه‌های طرح‌های تفصیلی شهری را بر آن اساس مورد بازبینی قرار دهد.
 ۳. سامانه‌های پاسخ سریع زلزله را از طریق توسعه شبکه ملی شتاب‌نگاری کشور در کلان‌شهرها راه‌اندازی کند.
 ۴. مناطق (زون‌های) با خطر فروریزش و فرونشست را با در نظر گرفتن اثرات قنات، گودبرداری، حفاری‌های زیرسطحی و مواردی از این قبیل در حوزه‌های شهری و در مسیر سامانه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی و در فرودگاه‌ها و بنادر تعیین و تمهیدات مهندسی در خصوص مقابله با فروریزش‌های شهری و فرونشست زمین را با هدف تدوین ضوابط و آیین‌نامه‌های مرتبط فراهم کند.
 ۵. ارزیابی ایمنی ساختمان‌های مهم و بلندمرتبه با کاربری‌های مختلف را با اولویت‌بندی کلان‌شهرها در برابر آتش‌سوزی، زلزله، فرونشست و فروریزش زمین انجام دهد.
 ۶. ارزیابی آسیب‌پذیری و اولویت‌بندی نشان‌های (المان‌های) حمل و نقل هوایی، دریایی، ریلی و جاده‌ای را از دیدگاه خطر زلزله، فرونشست، فروریزش زمین با هدف شروع اقدامات اجرایی و ارتقای تاب‌آوری آنها انجام دهد.
 ۷. با همکاری وزارتخانه‌های نفت، نیرو و ارتباطات و فناوری اطلاعات، قرارگیری شریان‌های حیاتی و مجموعه‌های مرتبط با سازمان‌های دولتی و شرکت‌ها را در حریم گسل‌ها و مناطق (زون‌های) با خطر بالای زلزله، فرونشست و فروریزش زمین ارزیابی نموده و موارد را جهت شروع اقدامات اجرایی ارائه دهد.

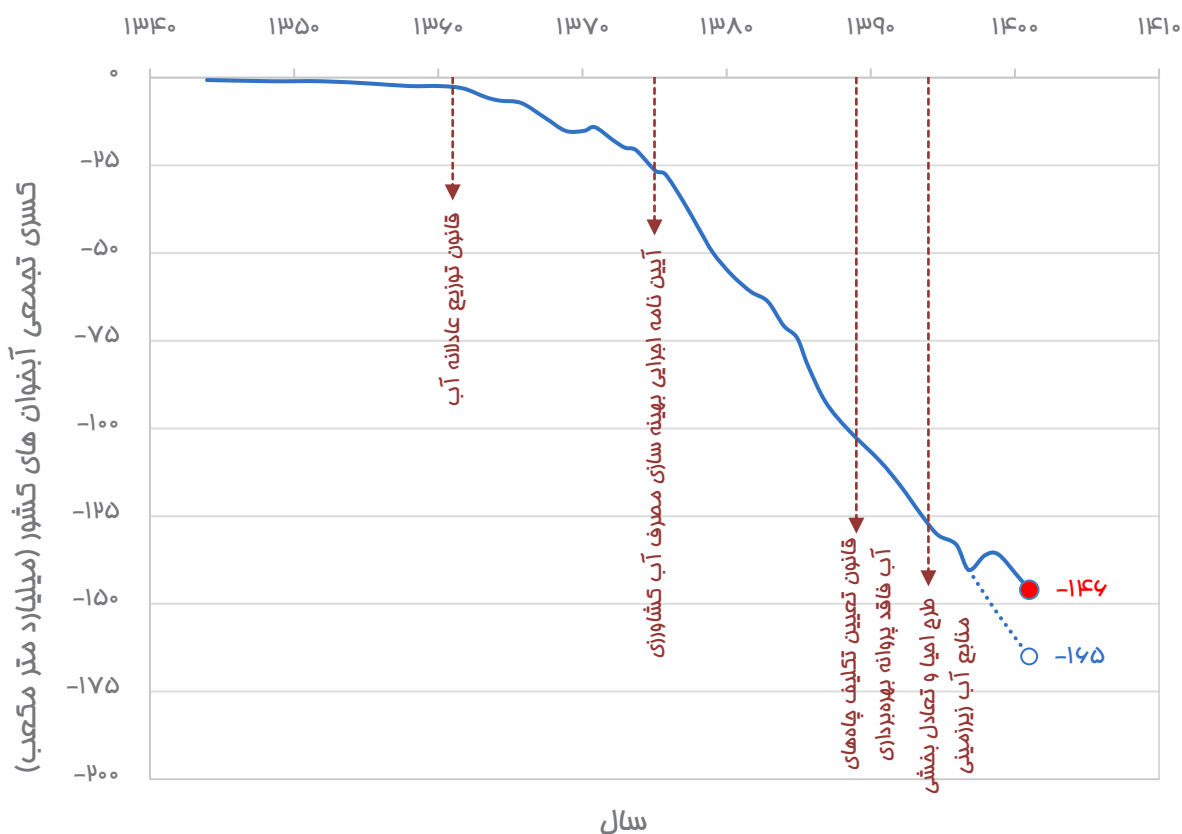


ردیف	نام سند (قانون... / تصویب‌نامه... / ...)	مرجع تصویب	تاریخ تصویب
۷	ضوابط ایجاد تعادل بین منابع و مصارف آب	هیئت وزیران	۱۳۸۷
۸	قانون افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی و منابع طبیعی	مجلس شورای اسلامی	۱۳۸۹
۹	قانون تعیین تکلیف چاه‌های آب فاقد پروانه بهره‌برداری	مجلس شورای اسلامی	۱۳۸۹
۱۰	قانون تسریع در بازسازی مناطق آسیب‌دیده در اثر حوادث غیرمترقبه	مجلس شورای اسلامی	۱۳۹۲
۱۱	طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی	شورای عالی آب کشور	۱۳۹۳
۱۲	تصویب‌نامه در خصوص تشکیل کارگروه ملی «سازگاری با کم‌آبی»	هیئت وزیران	۱۳۹۶
۱۳	قانون مدیریت بحران کشور	مجلس شورای اسلامی	۱۳۹۸
۱۴	سند راهبرد ملی مدیریت بحران کشور	شورای عالی مدیریت بحران کشور	۱۳۹۹
۱۵	برنامه ملی کاهش خطر حوادث و سوانح	شورای عالی مدیریت بحران کشور	۱۴۰۰
۱۶	قانون برنامه پنج‌ساله هفتم پیشرفت	مجلس شورای اسلامی	۱۴۰۳

مأخذ: یافته‌های پژوهش.

در شکل زیر، تأثیر چند دهه قانونگذاری بر میزان برداشت و کسری تجمعی مخازن آب زیرزمینی کشور را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود قوانین متعددی از جمله قانون توزیع عادلانه آب، آیین‌نامه اجرایی بهینه‌سازی مصرف آب، قانون تعیین تکلیف چاه‌های فاقد پروانه و... که از اوایل دهه ۶۰ تا کنون وضع شده است، اثرگذاری چندانی در کاهش روند افزایش کسری مخزن آبخوان‌ها نداشته است. در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ با متوسط کسری سالیانه مخازن معادل ۴/۹ میلیارد متر مکعب، میزان کسری تجمعی آبخوان‌های کشور به ۱۴۶ میلیارد متر مکعب رسیده است. با توجه به سیر نزولی نمودار انتظار می‌رفت میزان کسری تجمعی به حدود ۱۶۵ میلیارد متر مکعب در سال ۱۴۰۱ برسد که این اختلاف تقریباً ۲۰ میلیارد متر مکعبی می‌تواند از اثرات مثبت طرح احیا و تعادل بخشی مصوب سال ۱۳۹۳ باشد.

شکل ۲. نمودار تأثیر قانونگذاری بر میزان برداشت آب‌های زیرزمینی [۹]



توضیح: کسری تجمعی آبخوان‌های کشور تا سال ۱۴۰۴ به ۱۵۴ م.م.م رسیده است.

۳. رویکردها و نظریات شهرسازی در مواجهه با کم آبی

با آشکار شدن پیامدهای مخرب مداخلات انسانی در چرخه طبیعی آب و نقش تعیین کننده آن در بروز فرونشست، ضرورت بازنگری در الگوهای سنتی شهرسازی بیش از پیش احساس می شود. این واقعیت که مدل های متداول توسعه شهری، با ایجاد سطوح نفوذناپذیر و مدیریت دفع محور منابع آبی، ظرفیت های طبیعی بازایی آبخوان ها را از میان برده اند، رویکردهای نوین را به سمت بهره گیری از طبیعت و ادغام مدیریت آب با کالبد شهر سوق داده است. در ادامه، جهت عبور از این بحران، مهم ترین نظریات و رویکردهای جهانی طراحی شهری که با هدف مدیریت هوشمندانه منابع آب و سازگاری با کم آبی مطرح شده اند، مورد بررسی قرار می گیرند.

۳-۱. مقایسه عرصه شهر با شرایط طبیعی و خاستگاه اصلی

عرصه طبیعی شهر منابعی را به صورت طبیعی از طریق نزولات جوی دریافت می کند که جذب زمین می شوند. این منابع هم از طریق بارش های مستقیم و هم از ارتفاعات و حوزه بالادست به صورت آب های سطحی تأمین می شود که بخشی به صورت رودخانه های دائمی و فصلی



جاری می‌شود و بخشی دیگر آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی را تغذیه می‌کنند. توسعه و گسترش شهری و افزایش تراکم به‌خصوص در کلان‌شهرها و پایتخت موجب اشغال سطوح باز و نفوذناپذیری آنها می‌شود که از دو طریق اتفاق می‌افتد؛ از یک طرف با بالا رفتن تراکم، سطح بیشتری به کاربری‌های غیرباز تخصیص می‌یابد و از سوی دیگر کاربری‌های باز اعم از پارک‌ها و فضای سبز، معابر، حیاط‌ها و... به دلیل نوع مصالح و کف‌سازی به سمت نفوذناپذیر شدن می‌روند که در شبکه معابر به‌طور کامل این اتفاق می‌افتد. در کاربری‌های با الگوی رایج آپارتمانی نیز عملاً باقی‌مانده فضا به محوطه‌سازی و رمپ پارکینگ اختصاص می‌یابد و سطوح باز در فضای شهر به کمترین میزان خود می‌رسد. شایان ذکر است که در خصوص آب‌های سطحی، اعم از رواناب‌های ناشی از سیلاب یا چشمه‌سارها و رودهای جاری از ارتفاعات، به جای بهره‌برداری بهینه، عمدتاً با رویکرد «دفع» برخورد می‌شود؛ به گونه‌ای که این منابع ارزشمند پس از آلودگی در مسیر، به جای تغذیه سفره‌های زیرزمینی، به خارج از محدوده شهر هدایت می‌شوند. نکته دیگر اینکه تا چند دهه قبل که دفع فاضلاب از طریق چاه‌های جذبی بود، بخشی از آن به صورت پراکنده در سطح شهر به زمین منتقل می‌شد. ایجاد شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب اگرچه اقدامی بزرگ و ضروری بوده است اما باید این نکته را در نظر داشت که تغذیه سفره‌های زیرزمینی عملاً در بخش بزرگی از شهر به حداقل می‌رسد که به تشدید فرونشست منجر می‌شود. این مسئله اهمیت دفع بهداشتی پساب فاضلاب در راستای تغذیه آبخوان را بازگو می‌کند.

مسدود شدن جریان‌های طبیعی آب در اثر فعالیت‌های زیرزمینی یکی دیگر از دلایل وقوع فرونشست در محیط‌های شهری است که در آن مسیر جریان‌های طبیعی آب زیرزمینی و مسیر قنات‌ها به واسطه تلاقی با فعالیت‌های زیرزمینی عمیق مانند گودبرداری‌های بزرگ ساختمان‌ها و تونل‌های مترو به وفور دچار انسداد و آسیب می‌شوند و از طرفی خروج آب نیز هزینه‌ها و مشکلات دیگری ایجاد می‌کند. معضل دیگری که عمدتاً در شهرهای بزرگ به واسطه رشد و گسترش بحث مصرف انرژی در خانه‌ها، خودروها، صنایع و... رخ می‌دهد، اثر جزیره‌ای گرمایی است. در این پدیده یک گنبد حرارتی ایجاد می‌شود که بنا به بسیاری از مطالعات بر روی میزان و الگوی بارش‌ها تأثیر منفی خواهد داشت.

۲-۳. معرفی مهم‌ترین مفاهیم طراحی شهری مرتبط با آب

مفهوم طراحی شهری حساس به آب^۱ در دهه ۱۹۹۰ در استرالیا آغاز شد، باروش‌های جدید طراحی و ساخت محله‌هایی که وابسته به زهکشی مستقیم رواناب از سطوح غیرقابل نفوذ نبودند. علاوه بر این، توجه ویژه‌ای به تأمین آب جایگزین شهری، بازطبیعی‌سازی آبراهه‌ها و نواحی پیرامونی مرتبط و نصب فناوری‌های پوشش گیاهی شد که نه تنها در خیابان‌های شهری جذاب به نظر می‌رسیدند، بلکه کیفیت آب‌های سطحی را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشیدند. با توجه به اتصال جهانی جوامع، جای تعجب نیست که این مفهوم در سایر کشورهای جهان نیز پدید آمد، اگرچه هر کشور واژگان و انگیزه‌های خاص خود را داشت. از این رو اصطلاحاتی مانند: بهترین شیوه‌های مدیریتی^۲، زیرساخت سبز (GI)^۳، مدیریت یکپارچه منابع آب شهری^۴، توسعه کم اثر^۵، طراحی و توسعه شهری کم اثر^۶، کنترل منبع^۷، اقدامات کنترلی آب‌های سطحی^۸، سیستم‌های زهکشی شهری پایدار^۹، شهر اسفنجی^{۱۰} و سیستم‌های فاضلاب آزمایشی (ESS)^{۱۱} به وجود آمدند. انگیزه‌های خاص برای این نوآوری‌ها در کشورهای مختلف متفاوت بود. آمریکای شمالی ابتدا بر بهبود کیفیت آب تمرکز داشت. در بسیاری از

1. Water-Sensitive Urban Design (WSUD)
2. Best Management Practices (BMPs)
3. Green Infrastructure (GI)
4. Integrated Urban Water Management (IUWM)
5. Low Impact Development (LID)
6. Low Impact Urban Design And Development (LIUDD)
7. Source Control (SC)
8. Stormwater Control Measures (SCMs)
9. Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)
10. Sponge City (SC)
11. Experimental Sewer Systems

کشورهای اروپایی، نیاز به کاهش سیلاب‌های محلی و سرریزهای فاضلاب ترکیبی (که هم آب‌های سطحی و هم فاضلاب را حمل می‌کنند) محرک اصلی بود. استرالیا بر حفاظت از کیفیت آب، اکوسیستم آبراهه‌ها و مناطق ساحلی تمرکز داشت و در چین، کمبود آب شهری هم‌زمان با سیلاب‌های مکرر و کیفیت پایین آب‌های سطحی وجود دارد [۱۰]. در ادامه به معرفی برخی از مهم‌ترین مفاهیم و رویکردهای شهرسازی در مواجهه با کم‌آبی در جهان پرداخته شده است.

۱. طراحی شهری حساس به آب (WSUD)

همان‌طور که گفته شد اصطلاح طراحی شهری حساس به آب (WSUD) در دهه ۱۹۹۰ در استرالیا مورد استفاده قرار گرفت. باین‌حال، میان این دو اصطلاح تفاوتی ظریف اما مهم وجود دارد؛ «شهر حساس به آب» مقصد (هدف) را توصیف می‌کند، در حالی که WSUD فرایند را توصیف می‌کند. اگرچه این اصطلاح در استرالیا شکل گرفت، اکنون به‌طور فزاینده‌ای در سطح بین‌المللی، به‌ویژه در بریتانیا و نیوزیلند، مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ این تحول بازتاب همکاری قوی میان پیش‌گامان این حوزه در دو کشور است.

با وجود آن‌که تعریف اولیه WSUD نسبتاً گسترده بود، کاربرد اصلی آن در سال‌های ابتدایی توسعه‌اش عمدتاً پیرامون مدیریت آب‌های سطحی متمرکز بود. باین‌حال، در منابع جدیدتر بر ضرورت در نظر گرفتن مدیریت آب‌های سطحی در چارچوبی یکپارچه که کل چرخه آب شهری را شامل می‌شود، تأکید کرده‌اند. در گسترده‌ترین مفهوم خود، WSUD تمامی جنبه‌های مدیریت یکپارچه چرخه آب شهری از جمله تأمین آب، مدیریت فاضلاب و آب‌های سطحی را دربرمی‌گیرد. این رویکرد نمایانگر تغییری اساسی در نحوه در نظر گرفتن آب، منابع زیست‌محیطی مرتبط و زیرساخت‌های آبی در برنامه‌ریزی و طراحی شهرها و شهرک‌ها، در تمامی مقیاس‌ها و تراکم‌هاست. اصطلاح WSUD همچنین الهام‌بخش تعدادی از مفاهیم مرتبط از جمله «طراحی شهری حساس به اقلیم» بوده است.

اهداف WSUD در گزارشی که برای دولت استرالیا غربی تهیه شد، به شرح زیر فهرست شده است:

- مدیریت تراز آب (با در نظر گرفتن آب‌های زیرزمینی و جریان‌های سطحی، همراه با خسارات سیلاب و فرسایش آبراهه‌ها)،
- حفظ و در صورت امکان ارتقای کیفیت آب (شامل رسوبات، حفاظت از پوشش گیاهی حاشیه‌ای و به حداقل رساندن انتقال آلاینده‌ها به آب‌های سطحی و زیرزمینی)،

■ تشویق به صرفه‌جویی در مصرف آب (کاهش واردات آب شرب از طریق جمع‌آوری آب باران و بازیافت فاضلاب و کاهش نیاز آبیاری)،

■ حفظ فرصت‌های زیست‌محیطی و تفریحی مرتبط با آب.

رویکردهای WSUD در ساخت‌وسازهای موجود و جدید اجرا می‌شوند تا اثرات ناشی از تغییرات اقلیمی، شهرنشینی و رشد جمعیت را مدیریت کنند. ادغام WSUD به عنوان یک عملکرد اصلی در توسعه شهری می‌تواند نقش مهمی در گذار از سیستم‌های آب، فاضلاب و آب‌های سطحی کنونی به یک الگوی پایدارتر از جمله کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و شهرنشینی داشته باشد. سیستم‌های WSUD می‌توانند مزایای متعدد ارائه دهند، از جمله: تأمین آب، بهبود کیفیت آب‌های سطحی، کنترل سیلاب، زیبایی منظر شهری، محیط زندگی سالم و ارتقای سلامت اکوسیستم آبراهه‌های شهری [۱۰] [۱۱].

۲. مدیریت یکپارچه منابع آب شهری (IUWM)

مفهوم مدیریت یکپارچه آب شهری بنا به تعریف، به مراتب گسترده‌تر از آن دسته اصطلاحاتی است که صرفاً یا عمدتاً به مدیریت زهکشی شهری مربوط می‌شوند. IUWM از اصطلاح حتی گسترده‌تر «مدیریت یکپارچه منابع آب» مشتق شده است که به مدیریت یکپارچه تمامی اجزای چرخه آب در یک حوضه آبریز اشاره دارد. در بستر شهری، این مفهوم مدیریت تأمین آب، آب‌های زیرزمینی، فاضلاب و آب‌های سطحی را با یکدیگر ترکیب می‌کند و نقش‌ها و تعاملات نهادهای مختلف درگیر در مدیریت چرخه آب شهری را مدنظر قرار می‌دهد. در کاربرد امروزی، اصطلاح مدیریت یکپارچه آب شهری احتمالاً بیشترین ارتباط را با اصطلاحات WSUD، شهرهای حساس به آب و LID دارد که همگی فراتر از مدیریت زهکشی شهری گسترش می‌یابند.

اصطلاح IUWM نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ به‌طور متداول مورد استفاده قرار گرفت و در مجموعه‌ای از مقالات که رویکردهای جدیدی



برای مدیریت آب شهری پیشنهاد می‌کردند، به‌طور گسترده مورد بحث قرار گرفت. اصولی که IUWM بر آنها استوار است تا حدی در منابع مختلف متفاوت است، اما عموماً از اصول زیر پیروی می‌کند:

۱. در نظر گرفتن تمامی بخش‌های چرخه آب، طبیعی و ساخته‌شده، سطحی و زیر سطحی و شناسایی آنها به‌عنوان یک سیستم یکپارچه،
۲. در نظر گرفتن تمامی نیازهای آبی، چه انسانی و چه بوم‌شناختی،
۳. توجه به زمینه محلی با لحاظ دیدگاه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی،
۴. تلاش برای پایداری با هدف ایجاد تعادل میان نیازهای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی در کوتاه‌مدت، میان مدت و بلندمدت [۱۱].

۳. توسعه و طراحی شهری کم‌اثر (LID/LIUD)

اصطلاح توسعه کم‌اثر (LID) بیشترین کاربرد را در آمریکای شمالی و نیوزیلند داشته است. این رویکرد تلاش می‌کند با اتخاذ «رویکرد طراحی همراه با طبیعت» هزینه‌های مدیریت آب‌های سطحی را به حداقل برساند. هدف اولیه LID دستیابی به هیدرولوژی «طبیعی» از طریق طراحی سایت و استفاده از اقدامات کنترلی یکپارچه بود. منظور از هیدرولوژی طبیعی، تعادل پیش از توسعه یک سایت در حجم‌های رواناب، نفوذ و تبخیر - تعرق بود که از طریق «چشم‌انداز هیدرولوژیکی با کارکرد معادل» حاصل می‌شود. توسعه کم‌اثر به دلیل ناتوانی در برآورده کردن احیای هیدرولوژیکی در کل حوضه آبریز، راهکارهای مرسوم آن زمان در انتهای حوضه آبریز را رد کرد.

اصطلاح LID برای تمایز رویکرد طراحی سایت و مقیاس حوضه از رویکرد رایج مدیریت آب‌های سطحی در آن زمان به کار رفت؛ رویکردی که معمولاً شامل انتقال جریان به سامانه‌های بزرگ نگهداشت در انتهای لوله بود. در مقابل، LID با سامانه‌های کوچک مقیاس تصفیه آب‌های سطحی مانند سیستم‌های نگهدارنده زیستی^۱، بام‌های سبز^۲ و گودال‌ها^۳ که در منبع یا نزدیک به منبع رواناب قرار داشتند، شناخته می‌شد. در پایان دهه ۱۹۹۰ و تحت تأثیر جامعه طراحی، تفسیر LID از معنای اولیه خود فاصله گرفت و به مجموعه‌ای از اقداماتی که آب‌های سطحی را تصفیه می‌کردند (معمولاً در حوضه‌های کوچک ۱ هکتار یا کمتر) تعمیم یافت. بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰، پژوهشگران آمریکایی بار دیگر تلاش کردند LID را به مفهوم اولیه آن بازگردانند. تمرکز اولیه LID بر استفاده از طراحی سایت برای به حداقل رساندن سطوح غیرقابل نفوذ و حفظ مناطق طبیعی بوده است. جدیدترین راهنماهای LID اهداف هیدرولوژیکی را برای بازطراحی و توسعه‌های جدید شهری مجدداً برقرار کردند و گزینه‌های طراحی برای دستیابی و حفظ این اهداف ارائه دادند. در نهایت، LID به روشی رایج - هرچند نه فراگیر - برای مدیریت آب‌های سطحی در ایالات متحده و کانادا تبدیل شد.

عنوان LID خود به وجود نوعی اثر اشاره دارد، هرچند اثری که به‌طور ضمنی کمتر از تأثیر رویه‌های معمول است. تعریف این اصطلاح با روند نوظهور فشرده‌سازی بافت‌های شهری موجود در مقابل «گسترش افقی شهر» که در زمان شکل‌گیری LID رایج بود، تکامل می‌یابد. شاید به‌طور قابل توجهی، اصطلاح LID واژه «آب» را دربر ندارد. از برخی جهات، این امر ممکن است به درگیر کردن سایر رشته‌ها، مانند معماری، برنامه‌ریزی، اقتصاد، بوم‌شناسی و علوم اجتماعی، کمک کرده باشد [۱۱].

۴. شهر اسفنجی

شهر اسفنجی یکی از رویکردهایی است که کشور چین در مسیر حرکت به‌سوی مدیریت پایدار منابع آب به آن دست یافته است. این رویکرد به‌عنوان راهبردی نوین در مدیریت پایدار آب شهری، بر مبانی چرخه طبیعی آب و فرایندهای مرتبط با آن استوار است و با تلفیق مفاهیم و فناوری‌های موجود و بهره‌گیری از زیرساخت‌های سبز - آبی، بر مقابله با کمبود آب و کاهش مخاطرات سیلاب تمرکز دارد. واژه «اسفنجی» استعاره‌ای از ساختاری متخلخل است که در راستای اهداف اصلی این مفهوم - یعنی مدیریت آب باران و کنترل سیلاب شهری - قابلیت جذب، ذخیره و رهاسازی تدریجی آب را دارد. در چارچوب شهر اسفنجی، با به کارگیری عناصر زیرساختی نظیر روسازی‌های نفوذپذیر، بام‌های

1. Bioretention Systems

2. Green Roofs

3. Swales

سبز، سامانه‌های زهکشی، باغچه‌های باران،^۱ تالاب‌ها و دریاچه‌های احیا شده و موارد مشابه، فرایندهایی همچون جذب، نفوذ، جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تصفیه و استفاده مجدد از آب باران محقق می‌شود. این اقدامات به کنترل و کاهش حجم رواناب و سیلاب‌های شهری، کاهش آب‌گرفتگی معابر، بازسازی جریان‌های طبیعی، ارتقای تنوع زیستی، تلطیف کیفیت هوا، کاهش انتشار کربن و ایجاد منبع پایدار آب منجر می‌گردد.

شهر اسفنجی در ابتدا با هدف اتخاذ و ترویج مفاهیم و اقدامات توسعه کم‌اثر شکل گرفت؛ رویکردی که موجب بهبود کنترل رواناب شهری و فراهم‌سازی امکان ذخیره، باز یافت و تصفیه موقت آن می‌شود. افزون بر این، ارتقای سامانه‌های زهکشی سنتی از طریق بهره‌گیری از زیرساخت‌های مقاوم‌تر در برابر سیلاب - مانند احداث مخازن و تونل‌های ذخیره آب در زیرزمین - و افزایش استانداردهای حفاظتی سامانه‌های زهکشی موجود با استفاده از راهکارهای توسعه کم‌اثر، به‌منظور کاهش و تخلیه سریع مازاد رواناب، از دیگر ارکان این مفهوم به‌شمار می‌رود. در نهایت، ادغام و یکپارچه‌سازی پهنه‌های آبی طبیعی و مصنوعی نظیر تالاب‌ها و دریاچه‌ها، با عناصر سبز شهری با هدف طراحی چندمنظوره و ارائه خدمات اکوسیستمی و رفاهی بیشتر در بستر شهرها، چارچوب اجرایی این رویکرد را تکمیل می‌کند.

زیرساخت‌های شهر اسفنجی، از جمله گودال‌های زیستی،^۲ باغچه‌های باران، روسازی‌های نفوذپذیر و بام‌های سبز براساس واکنش‌های طبیعی هیدرولوژیکی طراحی شده‌اند. این اقدامات می‌توانند دبی اوج در سامانه زهکشی شهری را کاهش داده و از طریق نفوذ، جذب و ذخیره، رواناب شهری را کنترل کنند و در عین حال به تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی کمک نمایند. توسعه باغچه‌های باران موجب افزایش سرانه فضای سبز شهری می‌شود که این امر به نوبه خود با ایجاد زیستگاه‌های جدید برای گونه‌های مختلف، تنوع زیستی شهری را ارتقا می‌دهد. بر این اساس، مفهوم شهر اسفنجی را می‌توان گامی پیشرو در حوزه برنامه‌ریزی شهری دانست؛ چراکه این رویکرد و سیاست‌های وابسته به آن، ظرفیت ارتقای اصل پایداری را از طریق توجه هم‌زمان به ابعاد بوم‌شناختی، اجتماعی و اقتصادی داراست و زمینه را برای ادغام مؤثرتر مدیریت پایدار آب شهری و مدیریت خطر سیلاب با فرایندهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری فراهم می‌سازد [۱۲].

۴. مروری بر تجربیات جهانی مدیریت شهری در مواجهه با فرونشست

در این بخش، مروری بر تجارب برخی کشورها در مواجهه با پدیده فرونشست زمین ارائه می‌شود که کانون اصلی مداخلات آنها، مدیریت برداشت از منابع آب زیرزمینی و کنترل پیامدهای ناشی از آن در محیط‌های شهری بوده است. کشورهای منتخب عمدتاً از جمله نمونه‌های نسبتاً موفق در مهار یا کاهش نرخ فرونشست به شمار می‌روند؛ کشورهایی که در مقاطعی با نرخ‌های بالای فرونشست ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی مواجه بوده‌اند و توانسته‌اند از طریق اصلاح سیاست‌های بهره‌برداری، استقرار نظام‌های پایش، به‌کارگیری ابزارهای قانونی و اقتصادی و توسعه منابع جایگزین آب، روند این پدیده را کنترل کنند. وجه اشتراک این تجارب، تمرکز بر رویکردهای نظام‌مند و تدریجی به جای اقدامات مقطعی و اتکای هم‌زمان بر پایش علمی، محدودسازی برداشت و هدایت مصرف‌کنندگان عمده آب است. بررسی این نمونه‌ها با هدف استخراج الگوها و درس‌آموخته‌هایی انجام شده است که نشان می‌دهد کنترل فرونشست در شهرها بیش از هر چیز به نحوه مدیریت منابع آب زیرزمینی، انسجام سیاستی و تداوم اقدامات در بلندمدت وابسته است.

ژاپن: توکیو و اوزاکا از این در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ با بحران شدید فرونشست مواجه بودند که به علت برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی ایجاد شده بود. فرونشست توکیو در سال ۱۹۶۸ به اوج خود یعنی ۲۴ سانتی‌متر در سال رسید. در آن زمان روزانه ۱/۵ میلیون متر

1. Rain Gardens
2. Bioswales



مکعب آب از منابع زیرزمینی استخراج می‌شد. اقدامات کلیدی دولت وقت در مهار این پدیده شامل ممنوعیت و محدودیت برداشت آب زیرزمینی برای مصارف صنعتی، گسترش شبکه آب‌رسانی سطحی و ارتقای آموزش فرهنگی، مشارکتی و دقیق بود. پایش مستمر سطح زمین با استفاده از سامانه‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و موقعیت‌یاب (GPS) و تصویب قوانین خاص برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی مانند «قانون کنترل آب‌های زیرزمینی» از مهم‌ترین ابزارهای مدیریتی به کار رفته در این فرایند بوده است. همچنین در قوانین ملی مانند «قانون آب صنعتی» (۱۹۵۶) و «قانون محدودیت پمپاژ آب زیرزمینی برای ساختمان‌ها» (۱۹۶۲)، مناطق مشمول مقررات را مشخص و برای هر چاه، نصب کنتور حجمی و رعایت استانداردهای فنی را الزامی کرده‌اند؛ شهرداری‌ها نیز با آیین‌نامه‌های محلی، این ضوابط را به صورت سخت‌گیرانه‌تری اجرا می‌کنند. هم‌زمان، دولت با احداث خطوط انتقال آب سطحی و پرداخت بارانه، مصرف صنایع و ساختمان‌ها را از چاه‌های زیرزمینی به منابع رودخانه‌ای منتقل کرده و در کنار آن، طرح‌های تغذیه مصنوعی آبخوان و پایش سراسری فرونشست را گسترش داده است. اعمال محدودیت در استخراج آب‌های زیرزمینی از طریق اجرای ضوابط سخت‌گیرانه از جمله اجرای ضوابط و مقررات پمپاژ برای هزاران حلقه چاه، استفاده از تأسیسات جهت نفوذ آب باران به زمین، ارائه طرح‌هایی در خصوص ملاحظات محیط‌زیستی شامل استفاده از فاضلاب باز یافتی و استفاده و توسعه تصفیه‌خانه انجام شد. در پی انجام این اقدامات و مدیریت این پدیده، نرخ فرونشست تا دهه ۲۰۰۰ کاهش یافت و به یک سانتی‌متر در سال رسید [۱۳].

آمریکا: ایالت‌های مختلف آمریکا نیز از سال‌های دور در معرض اثرات فرونشست ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی قرار داشته‌اند. شهر سن واکین در ایالت کالیفرنیا با مصرف بالای آب برای کشاورزی مواجه بوده و یکی از مناطق دارای بیشترین نرخ فرونشست در آمریکاست. مهم‌ترین راهکاری‌های اجرا شده در این منطقه شامل پایش دقیق با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سامانه موقعیت‌یاب (GPS)، اجرای برنامه‌های مدیریت مشارکتی منابع آب در سطح حوضه، تشویق کشاورزان به تغییر الگوی کشت و استفاده از فناوری‌های آبیاری نوین، اجرای طرح بانک آب (تخصیص و انتقال مجازی آب بین کاربران از طریق بازارهای آب) و آموزش عملی و پروژه محور در مدارس ابتدایی بوده است. در راستای مدیریت منابع آب در مناطق دره سانتا کلارا، دره لاس وگاس و هوستن از تزریق آب سطحی به آبخوان‌ها استفاده شد. برای مقابله با فرونشست در شهر سنواکین کالیفرنیا با نرخ سالیانه ۶۰ سانتی‌متر که عمده فعالیت منطقه کشاورزی است، مقرر شد در کاشت محصولات انتخابی تجدیدنظر شود و از آب‌های سطحی به جای آب‌های زیرزمینی بهره‌برداری شود. همچنین در بخش‌هایی از شهر ویرجینیا هم که فرونشست زمین گسترش یافته بود از راهکار تصفیه آب و استفاده مجدد از پساب آن استفاده شد. میدان نفتی Wilmington در جنوب کالیفرنیا نمونه دیگری از کنترل فرونشست است که توسط تزریق آب به چاه صورت گرفت. طی این عملیات در سال ۱۹۶۹ با تزریق روزانه ۱۷۵ هزار متر مکعب آب به زون نفتی، مساحت فرونشست از ۵۸ به ۸ کیلومتر مربع کاهش یافت [۱۴]. شایان ذکر است، در کالیفرنیا قانون SGMA (۲۰۱۴) با الزام تشکیل نهادهای محلی و تدوین طرح‌های پایداری تا سال ۲۰۴۰ و با تکیه بر شبکه پایش نشست و افت آب «سازمان زمین‌شناسی آمریکا» (USGS) اجرایی شده و در آریزونا و تگزاس، مدیریت فعال با سهمیه‌بندی برداشت، نصب کنتورهای حجمی هوشمند و رهگیری GPS دستگاه‌های حفاری برای رسیدن به شرایط مطلوب در آینده، ایجاد شده است [۱۵].

هم‌راستایی سیاست‌های کلان با مشارکت مردمی و تقویت ظرفیت‌های محلی (شهرداری‌ها) عامل موفقیت در کشورهایی مانند ژاپن و آمریکاست. راهکارهای صرفاً فنی بدون همراهی اجتماعی، اثربخشی محدودی دارند. در جدول زیر مهم‌ترین اقدامات به کار گرفته شده در این دو کشور به منظور کاهش مصرف آب و کنترل پدیده فرونشست ارائه شده است.

جدول ۳. برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت کاهش مصرف آب در ژاپن و آمریکا [۱۵]

کشور	کوتاه‌مدت		بلندمدت	
	راهکار	اقدام	راهکار	اقدام
ژاپن	آگاهی‌بخشی عمومی و آموزش	کمپین‌های گسترده برای فرهنگ‌سازی مصرف بهینه آب در مدارس، محل کار و جامعه اطلاع‌رسانی مستمر درباره وضعیت منابع آب و اهمیت صرفه‌جویی	بازچرخانی و استفاده مجدد از آب	توسعه سیستم‌های تصفیه و بازچرخانی آب فاضلاب شهری و صنعتی استفاده از آب بازچرخانی شده در کشاورزی، فضای سبز و صنایع
	استفاده از فناوری‌های صرفه‌جویی	نصب تجهیزات کم‌مصرف در ساختمان‌ها مانند شیرآلات کم‌مصرف، توالت‌های دوحالت و دوش‌های بهینه توسعه سیستم‌های هوشمند مدیریت مصرف آب در ساختمان‌ها و صنایع	تحقیق و توسعه فناوری‌های نوین آب	سرمايه‌گذاري در فناوری‌های نوین مانند شیرین‌سازی آب دریا با انرژی کم‌مصرف توسعه سنسورهای هوشمند برای پایش دقیق مصرف و نشت
	تعمیر و بهسازی شبکه توزیع آب	شناسایی و رفع نشت‌های شبکه آب شهری در کوتاه‌ترین زمان ممکن اجرای برنامه‌های نگهداری و بازسازی خطوط انتقال	برنامه‌ریزی یکپارچه مدیریت منابع آب	هماهنگی میان نهادهای مختلف (دولت، شهرداری و بخش خصوصی) در مدیریت جامع منابع آب تدوین سیاست‌های بلندمدت مبتنی بر داده‌های علمی و مدل‌سازی
	محدودیت مصرف در مواقع بحران	اعمال سیاست‌های محدودکننده مصرف آب در فصل‌های خشک یا زمان بحران تعیین سهمیه مصرف آب برای مشترکین	اقتصاد آب و اصلاح تعرفه‌ها	اعمال تعرفه‌های پلکانی بر اساس میزان مصرف برای تشویق صرفه‌جویی تشویق استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف با یارانه و حمایت مالی
			توسعه زیرساخت‌های پایدار	سرمايه‌گذاري در شبکه‌های مدرن آب‌رسانی و کاهش هدررفت ارتقای سیستم‌های جمع‌آوری آب باران در شهرها و روستاها



کشور	کوتاه مدت	بلند مدت
آمریکا	کمپین‌های آگاهی‌بخشی و آموزش عمومی	اطلاع‌رسانی گسترده درباره اهمیت صرفه‌جویی آب به شهروندان تشویق به رفتارهای صرفه‌جویانه در خانه و محل کار
	اعمال محدودیت‌های مصرف در مواقع بحران	تعیین سهمیه‌های مصرف آب در مناطق با تنش آبی محدودیت شست‌وشوی خودرو، آبیاری فضای سبز و پر کردن استخرها در فصل‌های خشک
	بازرسی و تعمیر سریع نشت‌های شبکه	اجرای برنامه‌های شناسایی نشت و تعمیر سریع در شبکه‌های شهری آب استفاده از فناوری‌های نوین مانند حسگرهای نشت آب
	تشویق استفاده از تجهیزات کم‌مصرف	توزیع و حمایت از نصب شیرآلات، دوش‌ها و توالت‌های کم‌مصرف ارائه تخفیف مالی یا پاداش برای خرید تجهیزات بهینه
		ایجاد فضای سبز با گیاهان کم‌مصرف جمع‌آوری و استفاده از آب باران در سطح شهرها
		حمایت از تحقیق در زمینه فناوری‌های نوین کاهش مصرف و تصفیه آب توسعه سیستم‌های هوشمند پایش مصرف و مدیریت از راه دور
	تحقیق و توسعه	سرمايه‌گذاري در فناوری‌های مدیریت آب
	اصلاح تعرفه‌ها و سیاست‌های اقتصادی	توسعه سیستم‌های بازیافت و استفاده مجدد از آب فاضلاب ارتقای شبکه‌های انتقال آب برای کاهش هدررفت

چین: در کشور چین به دلیل استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی، فرونشست در برخی از شهرهای این کشور مانند شانگهای ایجاد شده است. از سال ۱۹۲۱ تا ۱۹۶۵ حداکثر نشست زمین تجمعی در مناطق شهری چین به ۲٫۶ متر رسید که به خسارات اقتصادی زیادی برای این شهر منجر شد. بعد از گذشت حدود نیم قرن، مقررات پیشگیری و کنترل فرونشست زمین شهرداری شانگهای در سال ۲۰۱۳ منتشر شد که شامل ترکیب شبکه پایش فرونشست و شبکه پایش آب زیرزمینی به دلیل اثرات برداشت از منابع زیرزمینی بود. علاوه بر این، راه‌اندازی یک سیستم نظارت نیز در این آیین‌نامه گنجانده شد که سه منطقه کنترل فرونشست زمین را در شانگهای مشخص می‌کرد. در این مناطق تدابیر ویژه‌ای از جمله توقف برداشت از آب‌های زیرزمینی و تزریق آب‌های مازاد سطحی به سفره‌های آب زیرزمینی اجرا شد. بعد از گذشت ۶ سال اثربخشی این مقررات و مدیریت منابع آب در کاهش فرونشست مشاهده گردید [۱۶].

اندونزی: در جاکاتای اندونزی فرونشست زمین با فزاینده مصرف آب، الزامی شدن ساخت چاه‌های نفوذی برای دریافت مجوزهای ساختمانی و اعمال مالیات بر منابع آب، کاهش داده شد. همچنین این موضوع شامل توسعه منبع تأمین آب جایگزین برای کاربران صنعتی یا خانمایی

مجدد مصرف‌کننده‌های بزرگ در خارج از ناحیه بحرانی بود [۱۷] [۱۸].

تایلند: کلان‌شهر بانکوک از سال ۱۹۵۰ شاهد بهره‌برداری گسترده از آب زیرزمینی بوده است. در راستای کنترل این مسئله، «قانون آب زیرزمینی» (۱۹۷۷) با ایجاد مناطق کنترل آب زیرزمینی در بانکوک و حومه، نظام مجوزدهی، محدودیت عمق چاه و تعرفه پلکانی برای هر متر مکعب پمپاژ را برقرار کرد. در ادامه، سیاست قیمت‌گذاری و اتصال تدریجی صنایع به شبکه آب سطحی باعث شد برداشت از چاه‌ها به سطحی نزدیک به برداشت ایمن کاهش یافته و نرخ فرونشست به‌طور محسوسی افت کند. اداره منابع آب زیرزمینی نیز با بهره‌گیری از شبکه پیزومترها و تصاویر ماهواره‌ای، نشست زمین را به‌صورت مستمر پایش کرده و در صورت اعلام زون‌های بحرانی، برداشت را موقتاً متوقف و پروژه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان را فعال می‌کند. بهای آب زیرزمینی در محدوده‌های بحرانی بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۴ از ۳۵ به ۲۹۷/۵ دلار آمریکا به ازای هر متر مکعب افزایش یافت.

مکزیک: حذف یارانه برق در کشور مکزیک در کوتاه‌مدت به ۱۵ درصد و در بلندمدت به ۱۹ درصد پمپاژ کمتر آب از چاه‌ها انجامید. در شهر موریای این کشور نیز با استفاده از پایش مستمر سرعت فرونشست از طریق فناوری InSAR و محاسبه شاخص AGF، مناطق اولویت‌دار برای محدودسازی برداشت آب زیرزمینی شناسایی و هم‌زمان سازوکاری برای جبران اقتصادی مالکان متأثر از این محدودیت‌ها طراحی شد. هند: این کشور برای مهار برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، «برنامه ملی تغذیه مصنوعی آبخوان» (Manual 1994 و Guide 2000) را تدوین کرد و با تخصیص یارانه دولتی، اجرای حوضچه‌های نفوذ و چاه‌های تزریق را به اجرا درآورد. همچنین اصلاح مرحله‌ای یارانه برق پمپ‌های کشاورزی در ایالت‌هایی مانند گجرات و آندرا پرادش در دستور کار قرار گرفت تا پمپاژ بی‌رویه کاهش یابد. همچنین کاهش ۱۰ درصدی یارانه آب به افت ۴/۴ درصدی در برداشت منابع آب زیرزمینی در این کشور منتهی شد.

ایتالیا: پس از ثبت نرخ هشداردهنده ۶/۵ میلی‌متر نشست در سال در ونیز و دلتای پو طی دهه ۱۹۶۰، دولت با ممنوعیت پمپاژ صنعتی در اوایل دهه ۱۹۷۰، صنایع را ملزم به استفاده از آب سطحی رودخانه پو کرد که منجر به توقف افت آبخوان شد. در سطح ملی نیز، اصلاحات قانونی دهه ۱۹۹۰ (از جمله قانون لگه گالی) با اعلام عمومی بودن منابع آب زیرزمینی و تعیین اولویت برای مصارف شرب، هرگونه برداشت را مشروط به اخذ مجوز، پایش مستمر کمی و کیفی و رعایت سهمیه‌های تعیین شده کرد. امروزه، نهادهای حوضه‌ای و آژانس‌های منطقه‌ای (ARPAE) با بهره‌گیری از شبکه‌های چاه‌نگاری و نقشه‌برداری ماهواره‌ای InSAR، ضمن تعیین سهمیه‌های محلی، مناطق ممنوعه برداشت را جهت مدیریت دقیق منابع و مقابله با فرونشست پایش می‌کنند.

استرالیا: مدیریت منابع آب در حوضه «ماری-دارلینگ» بر پایه تعیین سقف برداشت کل برای هر آبخوان و ایجاد بازاری رسمی جهت مبادله حقبه‌ها استوار است. در این چارچوب، دولت با اجرای برنامه‌های «بازخرید حقبه» (Buy-back)، حقبه‌های مازاد را از بهره‌برداران خریداری می‌کند تا فشار بر سفره‌های زیرزمینی کاهش یابد. همچنین، نصب کنتورهای دیجیتال و پایش برخط برای تمامی بهره‌برداران به منظور تضمین رعایت سقف‌های قانونی برداشت، الزامی شده است.

فرانسه: در منطقه لورن، راهبرد مدیریت بر پایه وضع مالیات محلی بر برداشت آب و اعمال مقررات سخت‌گیرانه برای حفاظت از آبخوان‌های کارستی در نواحی معدن‌زده متمرکز است که به کنترل مؤثر برداشت و کاهش مخاطرات ناشی از فرونشست کمک شایانی کرده است.

تجربه‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که مهار برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محرک‌های فرونشست زمین در محیط‌های شهری و پیرامونی نیازمند ترکیبی از ابزارهای حقوقی، اقتصادی، فنی و نهادی است و صرفاً با یک مداخله منفرد قابل تحقق نیست. کشورهای مختلف متناسب با شرایط هیدروژئولوژیکی، ساختار حکمرانی آب، الگوی مصرف و سطح توسعه زیرساخت‌های پایش، مجموعه‌ای از راهکارها را برای کنترل برداشت، افزایش شفافیت مصرف، ایجاد انگیزه‌های اقتصادی برای کاهش پمپاژ و جایگزینی منابع آب زیرزمینی با منابع پایدارتر به کار گرفته‌اند. این راهکارها از تعیین سقف برداشت و سهمیه‌بندی، ایجاد بازارهای رسمی آب و اصلاح نظام قیمت‌گذاری تا ممنوعیت‌های قانونی، توسعه شبکه‌های پایش کمی و کیفی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و انتقال مصرف‌کنندگان عمده به منابع آب سطحی



را در برمی گیرد. جدول زیر با مرور گزیده‌ای از این تجارب جهانی، نمونه‌هایی از سیاست‌ها و ابزارهای اجرایی به کار رفته در کشورهای مختلف را ارائه می‌کند که هر یک به نحوی در کاهش فشار بر آبخوان‌ها، مهار نرخ فرونشست و ارتقای پایداری منابع آب زیرزمینی مؤثر بوده‌اند و می‌توانند به عنوان مبنایی برای تحلیل تطبیقی و استخراج درس‌آموخته‌ها در مواجهه با مسئله فرونشست در ایران مورد توجه قرار گیرند.

• ارتباط سیاست‌های تأمین و قیمت‌گذاری آب با میزان مصرف

غالباً تأمین بیشتر به مصرف بیشتر منجر می‌شود؛ پدیده‌ای که در اقتصاد به آن «اثر بازگشتی»^۱ یا «پارادوکس جونز»^۲ گفته می‌شود. از نمونه‌های مؤید این پدیده در زمینه مصرف آب می‌توان به تجربه کشورهای آمریکا، هند و عربستان اشاره کرد. ایالت کالیفرنیا در دهه ۱۹۹۰ با توسعه سیستم‌های انتقال آب و سدسازی با افزایش چشمگیری در مصرف شهری و کشاورزی مواجه شد. به این ترتیب دولت مجبور شد پس از چند سال مجدداً به محدودیت مصرف و جریمه‌های سنگین روی بیاورد. در نهایت فقط زمانی مصرف کاهش یافت که قیمت آب، فناوری آبیاری و فرهنگ مصرف تغییر کرد. کشور هند به دلیل وابستگی شدید کشاورزان به برداشت آب زیرزمینی، اکنون با بحران شدید افت سطح آب زیرزمینی مواجه است. دولت با یارانه‌های سنگین، چاه‌های عمیق و پمپ‌های برقی را گسترش داد و با راحت‌تر شدن دسترسی به منابع آب، برداشت غیرمسئولانه نیز بیشتر شد. در مورد کشور عربستان، اگرچه شیرین‌سازی آب دریا به طور گسترده انجام شد اما به دلیل پایین نگه داشتن قیمت آب، مردم و صنایع رفتار صرفه‌جویانه نداشتند. اخیراً این کشور اقدام به اصلاح تعرفه‌ها و آموزش همگانی کرده تا از مصرف بیش از حد جلوگیری کند.

از طرفی در مواردی که افزایش تأمین آب با کنترل مصرف همراه بوده به نتایج متفاوتی منتهی شده است. از جمله در کشور هلند، هم‌زمان با بهبود تأمین آب، سیستم کنترل مصرف، تعرفه‌های واقعی، آبیاری هوشمند و آموزش مردم نیز اجرا شد. در نتیجه تعادل بین تأمین پایدار و مصرف هوشمند برقرار گردید. نمونه دیگر دولت استرالیا است که پس از بحران شدید در حوضه موری-دارلینگ محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌ای برای مصرف آب کشاورزی قرار داد و به این ترتیب اجازه برداشت بیش از حد از بین رفت و سامانه «بازار آب»^۳ در این کشور ایجاد شد.

• ساختار رسمی مدیریت بحران ناشی از فرونشست در کشورهای مختلف

علاوه بر سیاست‌ها و اقدامات اجرایی به کار گرفته شده در کشورهای مختلف برای کنترل برداشت آب زیرزمینی و مهار فرونشست، بررسی ساختار نهادی و سازمانی این کشورها نیز نشان می‌دهد که نحوه سامان‌دهی مسئولیت‌ها در سطح ملی نقش مهمی در اثربخشی مداخلات ایفا می‌کند. در بسیاری از کشورهایی که در بخش‌های پیشین به عنوان نمونه‌های موفق یا نسبتاً موفق معرفی شدند، مدیریت مخاطرات زمین‌شناختی - از جمله فرونشست زمین - در قالب نهادها یا وزارتخانه‌های مشخص و با اختیارات روشن تعریف شده است. این نهادها معمولاً وظیفه تلفیق پایش‌های زمین‌شناختی و ژئوتکنیکی با برنامه‌ریزی سرزمینی و شهری، مدیریت منابع آب، تدوین سیاست‌های کنترلی و هدایت دستگاه‌های اجرایی را بر عهده دارند. جدول زیر با هدف تکمیل بحث تجارب جهانی، به معرفی کشورهایی می‌پردازد که در ساختار رسمی حکمرانی خود دارای نهاد یا وزیر مرتبط با مخاطرات زمین‌شناختی هستند و رویکردهای کلان آنها در مواجهه با فرونشست و سایر مخاطرات هم‌پیوند ارائه شده است. این مرور نهادی نشان می‌دهد که کنترل فرونشست، علاوه بر ابزارهای فنی و مدیریتی، نیازمند پشتیبانی سازمانی منسجم و تعریف روشن مسئولیت‌ها در سطح ملی و محلی است.

1. Rebound Effect
2. Jevons Paradox
3. Water Market

بازار آب: سازوکاری اقتصادی برای خرید و فروش حق بهره‌برداری از آب بین مصرف‌کنندگان (کشاورزان، صنایع، شهرداری‌ها) با هدف افزایش کارایی تخصیص آب به بخش‌هایی که بهره‌وری بیشتری دارند.

جدول ۴. کشورهای با ساختار رسمی یا وزیر مرتبط با مخاطرات زمین‌شناختی [۱۵]

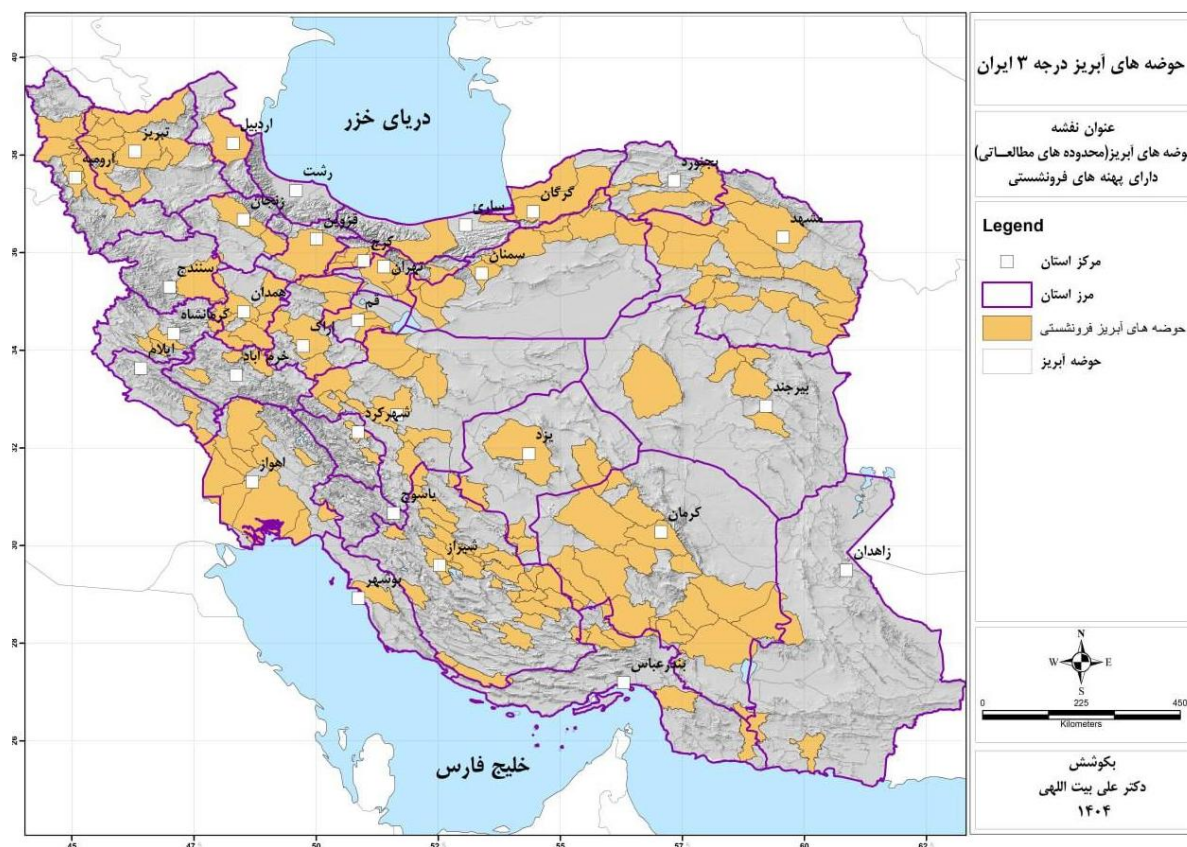
کشور	نهاد مسئول	رویکرد
ژاپن	وزارت زمین، زیرساخت، حمل‌ونقل و گردشگری (MLIT) سازمان اطلاعات جغرافیایی ژاپن (Geospatial Information Authority of Japan)	تلفیق پایش زمین‌شناسی با برنامه‌ریزی شهری نقشی کلیدی وزیر در تدوین سیاست‌های مقابله با فرونشست و زمین لغزش توجه ویژه به فرونشست، زلزله، زمین لغزش و آب‌های زیرزمینی
آمریکا	وزارت کشور (Department of the Interior) با نقش محوری سازمان زمین‌شناسی (USGS) به‌عنوان بازوی تخصصی و سیاستگذار فدرال در این زمینه	توجه ویژه به فرونشست، خشکسالی، زلزله، فروچاله و شور شدن منابع
نیوزیلند	وزارت مدیریت اضطراری و اقلیم همکاری با مؤسسه علوم زمین‌شناسی و هسته‌ای (Science GNS)	دولت وزیر مستقلی برای مدیریت بلایای طبیعی دارد که در تصمیمات زمین‌شناختی مؤثر است. توجه ویژه به آتشفشان‌ها، زلزله و فرونشست
چین	وزارت منابع طبیعی چین که بخشی از آن مختص مخاطرات زمین‌شناسی و فرونشست است. دولت چین دارای دیپارتمان مستقل مدیریت بلایای زمین‌شناختی است.	طرح‌های ملی کنترل فرونشست زمین و مدیریت پایدار خاک و آب
ایتالیا	وزارت محیط‌زیست و امنیت انرژی؛ زیرمجموعه‌ای به نام دیپارتمان دفاع از خاک و منابع زمین‌شناسی	ساختار رسمی دولتی برای مدیریت مخاطرات زمین‌شناختی از جمله فرسایش خاک، لغزش زمین و زلزله نقش شهرداری‌ها در اجرای سیاست‌ها بسیار پررنگ است.

۵. وضعیت فرونشست در کشورهای پیامدهای ناشی از آن



براساس جدیدترین بررسی‌های انجام شده [۱۹]، حوضه‌های آبریز درجه ۳ دارای پهنه‌های فرونشستی حدود ۳۰ درصد مساحت کشور را در برمی‌گیرد که در شکل زیر نشان داده شده است. واضح است که در تمامی مساحت این حوضه‌های آبریز فرونشست زمین توسعه ندارد اما اثر کاهش منابع آبی کاملاً مشهود است. از کل ۶۰۷ حوضه آبریز درجه ۳ در کشور، ۴۶ حوضه دارای پهنه‌های فرونشستی با نرخ بیشینه بالای ۱۰ سانتی‌متر در سال بوده که مجموع وسعت این حوضه‌ها بیش از ۲۰۰ هزار کیلومتر مربع برآورد می‌شود. همچنین در این ۴۶ حوضه جمعیتی حدود ۳۱ میلیون نفر در ۲۵۵ شهر و بالغ بر ۸ هزار روستا ساکن هستند که مطابق آمار مرکز آمار ایران مجموعاً بیش از دو میلیون و ۶۰۰ هزار واحد مسکونی واقع در این حوضه‌ها فاقد اسکلت هستند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود با حذف محدوده‌های کوهستانی و کویری، می‌توان گفت که عموماً فرونشست زمین در تمامی دشت‌های قابل سکونت و کشاورزی ایران در حال وقوع است.

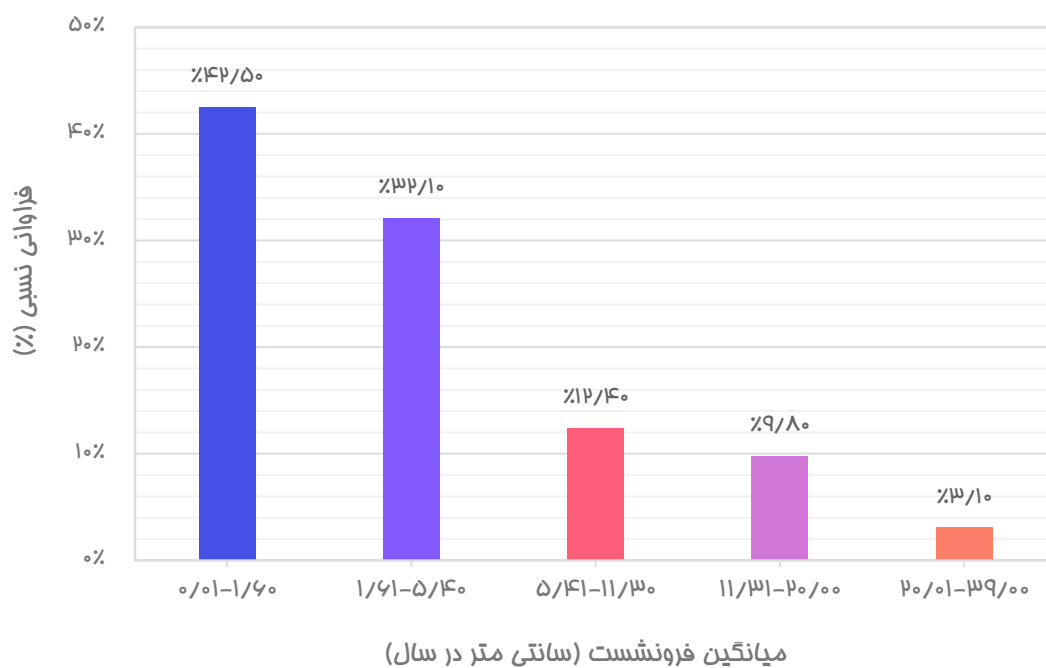
شکل ۳. نقشه حوضه‌های آبریز درجه ۳ دارای پهنه‌های فرونشستی زمین [۱۹]



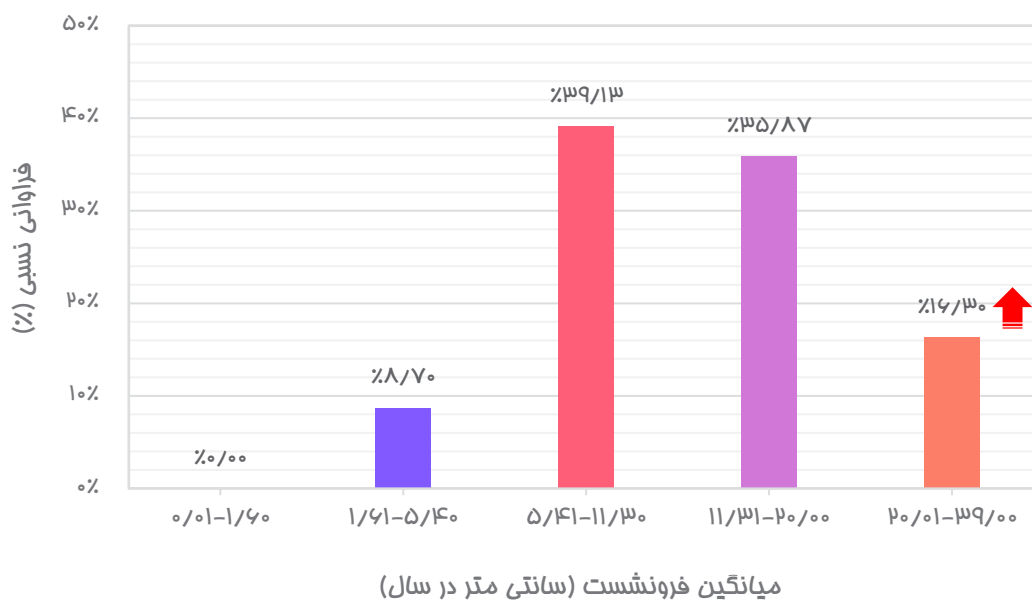
مطالعه داده‌های ۱۹۴ منطقه فرونشستی در جهان [۱] نشان می‌دهد که ۴۲/۵ درصد از آبخوان‌های مورد بررسی دارای نرخ فرونشستی کمتر از ۱/۶۰ سانتی‌متر در سال بوده‌اند و تنها ۳/۱ درصد از آنها نرخ فرونشستی بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال را تجربه کرده‌اند. این در حالی است که وضعیت در ایران به مراتب بحرانی‌تر است. طبق گزارش سازمان نقشه‌برداری کشور، تاکنون دست‌کم ۴۸ منطقه در کشور، از جمله شهرهای تهران، مشهد، کرمان، رفسنجان، یزد، آزادشهر و بسیاری دیگر از نقاط کشور تحت تأثیر پدیده فرونشست قرار گرفته‌اند. این سازمان از سال ۱۳۹۵ با انجام پردازش‌های گسترده، موفق به شناسایی ۲۵۴ پهنه فرونشستی در ۳۰ استان کشور شده و پایگاه داده و نقشه جامع فرونشست زمین در ایران را تهیه کرده است. برآوردهای کلی، وسعت این پهنه‌ها را حدود ۹۰ هزار کیلومتر مربع عنوان می‌کند که معادل ۵ درصد از کل مساحت کشور است.

همان‌طور که در نمودار (ب) شکل زیر نشان داده شده، فراوانی نسبی میانگین فرونشست در ایران با نرخ بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال، بیش از پنج برابر میانگین جهانی آن گزارش شده است [۲۰].

شکل ۴. نمودار فراوانی نسبی میانگین نرخ فرونشست زمین در: الف) ۱۹۴ منطقه فرونشستی مورد مطالعه در جهان [۱] و ب) ایران [۲۰]



(الف)

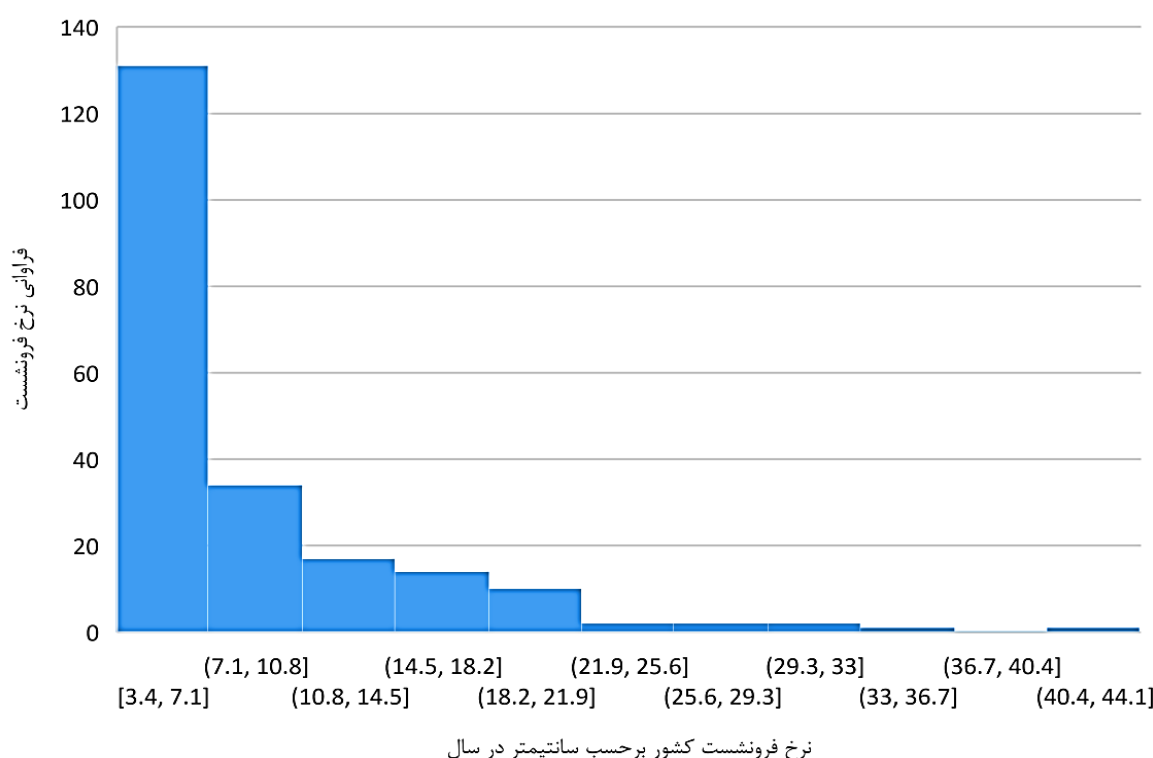


(ب)

تحلیل‌های انجام شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور پیرامون نرخ بیشینه فرونشست در ایران (شکل زیر) نشان می‌دهد که بیشینه نرخ فرونشست سالیانه تقریباً در ۷ درصد از موارد از ۱۹ سانتی‌متر فراتر رفته است؛ امری که ضرورت مداخله و رسیدگی فوری را به روشنی گوشزد می‌کند. همچنین، حدود ۱۷ درصد از مناطق شناسایی شده دارای نرخ بیشینه‌ای در بازه ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر در سال هستند که در دسته نواحی بحرانی جای می‌گیرند. از سوی دیگر، ۴۳ درصد از مناطق دچار فرونشست نرخ بیشینه‌ای بین ۲ تا ۵ سانتی‌متر در سال دارند که بیانگر ورود آنها به مراحل اولیه فرونشست است. در چنین مناطقی اتخاذ رویکردهای مبتنی بر بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی می‌تواند از پیشرفت و بحرانی شدن فرونشست جلوگیری به عمل آورد.

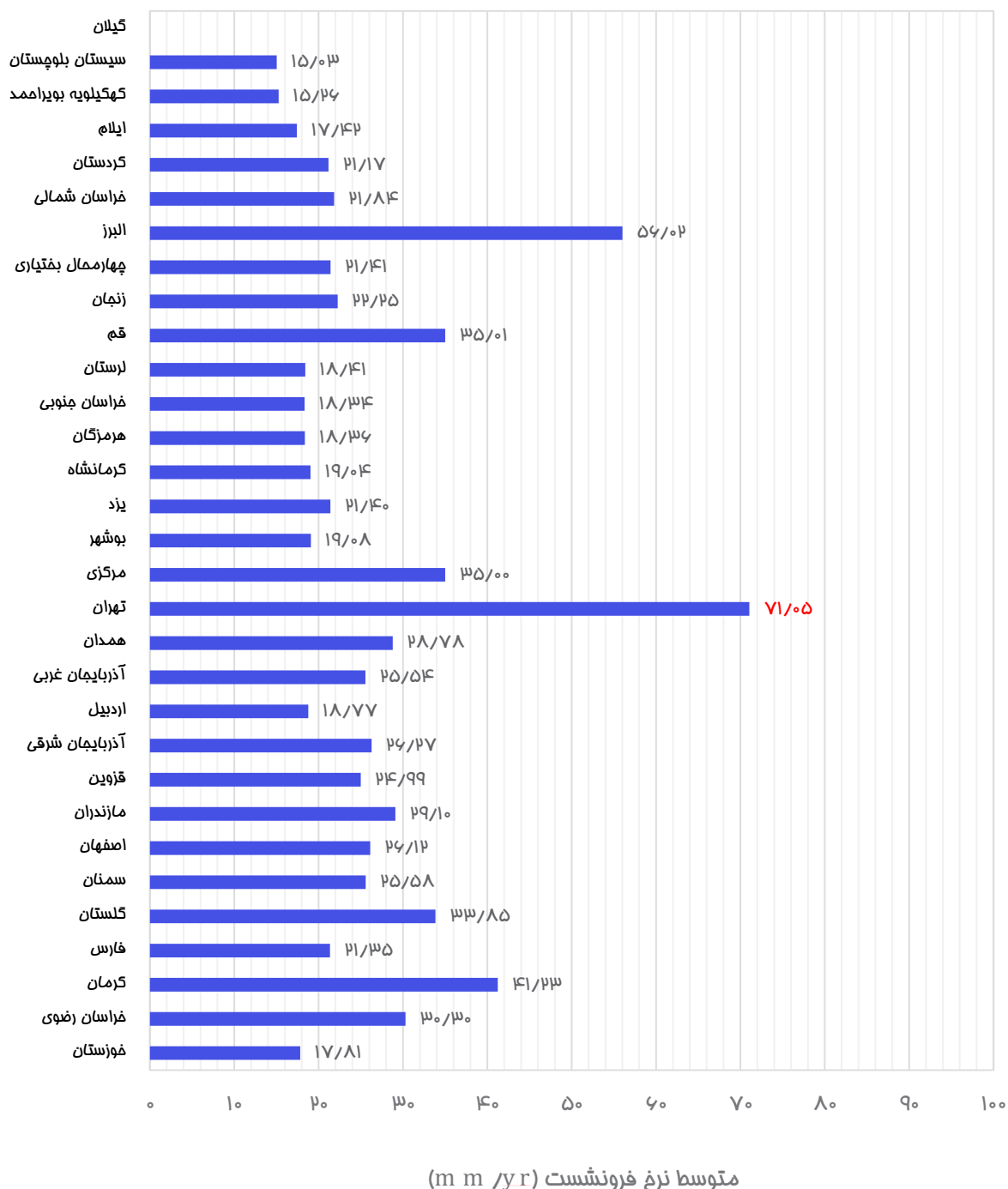
نکته مهم آن است که اغلب این پهنه‌ها در مجاورت شهرها واقع شده‌اند و در بسیاری موارد، حریم فرونشست به تدریج به سمت محدوده‌های مسکونی توسعه یافته است. طبق آمار ارائه شده براساس نقشه‌های پهنه‌بندی این سازمان، پهنه‌های فرونشستی در ۱۶ کلان‌شهر کشور به درون محدوده شهری نفوذ کرده‌اند و در ۱۰ کلان‌شهر دیگر در حومه و اطراف شهرها گسترش یافته است. به عنوان نمونه، در استان تهران بیش از ۳۰ شهر با پدیده فرونشست درگیر هستند؛ به گونه‌ای که مجموع پهنه‌های فرونشستی این استان به ۱۶۳۰ کیلومتر مربع رسیده که معادل ۱۲/۵۵ درصد از کل مساحت استان را تشکیل می‌دهد.

شکل ۵. نمودار فراوانی نرخ فرونشست کشور برحسب سانتی‌متر در سال [۲۱]



مطابق پایش‌های انجام شده تا سال ۱۳۹۹، میانگین نرخ سالانه فرونشست در استان تهران بیش از ۷ سانتی‌متر برآورد شده که بالاترین مقدار میانگین در میان تمامی استان‌های کشور به شمار می‌رود (شکل زیر).

شکل ۶. نمودار مقایسه میانگین نرخ فرونشست در استان‌های کشور [۲۰]



براساس آمارها و داده‌های رسمی سازمان نقشه‌برداری کشور، وسعت مناطقی از ایران که تحت تأثیر پدیده فرونشست قرار دارند به بیش از ۹۲ هزار کیلومتر مربع می‌رسد. از این میزان، بالغ بر ۱۲۰۰ کیلومتر مربع از پهنه‌های دچار فرونشست در محدوده بلوک‌های ساختمانی واقع شده‌اند که حدود ۷۶ کیلومتر مربع از آن مربوط به بلوک‌های ساختمانی استان تهران است. جزئیات آماری مرتبط با زیرساخت‌ها و تأسیسات حساس تحت تأثیر این پدیده در جدول زیر ارائه شده است.



جدول ۵. زیرساخت‌ها و تأسیسات مهم متأثر از فرونشست در پایتخت و کل کشور [۲۱] [۲۲]

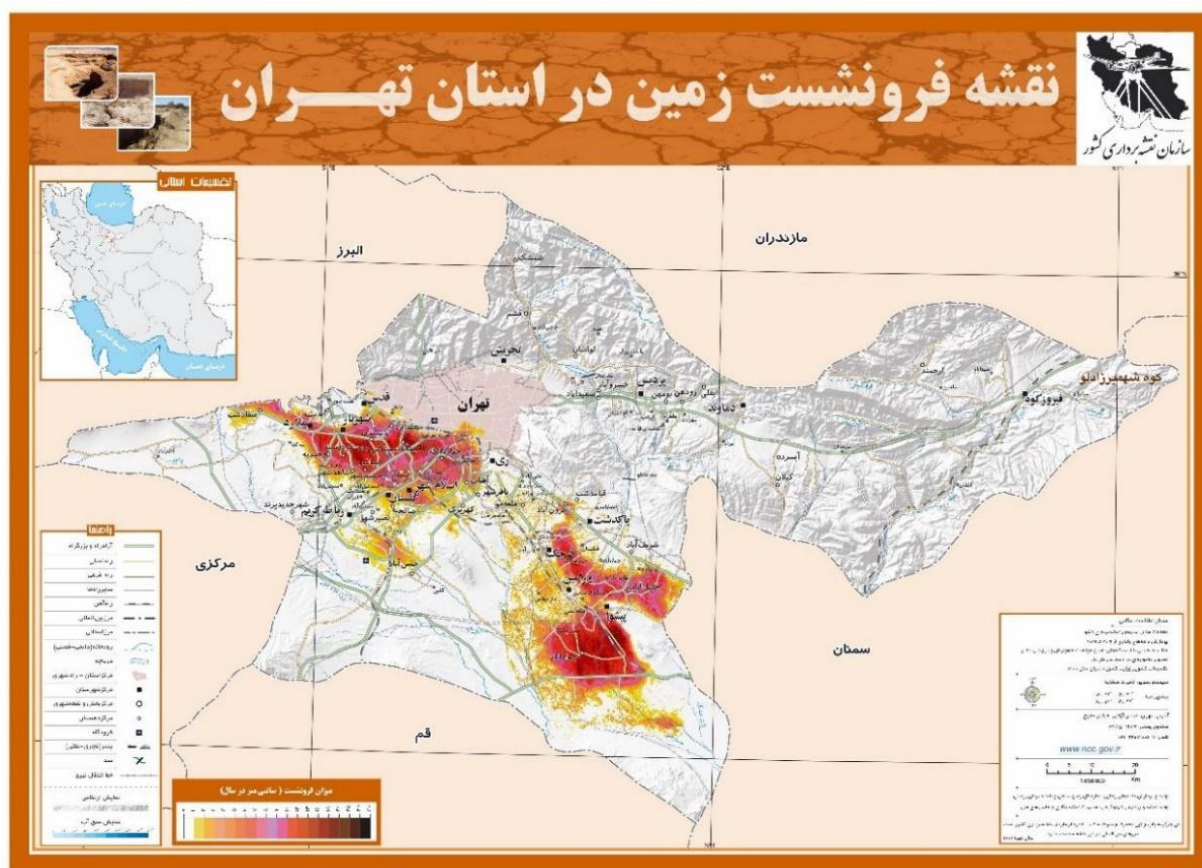
عنوان	آمار کل کشور	آمار استان تهران	واحد
بلوک‌های ساختمانی	۱۲۲۹	۷۶	کیلومتر مربع
آزادراه	۲۸۹	۷۷	کیلومتر
بزرگراه	۸۸۲	۱۰۳	کیلومتر
جاده آسفالت‌ه	۲۳۱۶۲	۱۰۴۷	کیلومتر
مسیر ریلی	۱۶۸۳	۱۸۹	کیلومتر
خط انتقال نیرو	۷۲۴۰	۴۰۴	کیلومتر
خط تلفن	۲۷۹	—	کیلومتر
خط لوله	۹۷۲	—	کیلومتر
قنات	۱۴۵۷۴	۴۹۲	کیلومتر
سد	۱۶	—	کیلومتر
فرودگاه	۱۳	۱	تعداد
نیروگاه	۱۵	۳	تعداد
تصفیه‌خانه	۴۲	۲	تعداد
مجتمع صنعتی	۲۸۸	۱۰۳	تعداد
کارخانه	۳۵۱۰	۴۷۳	تعداد
انبار مواد سوختی	۱۶۸	۱۳	تعداد
جایگاه سوخت	۳۰۴	۲۸	تعداد
مناطق باستانی	۱۵۳	۵	تعداد
مراکز درمانی	۳۹	۷	تعداد
آتش‌نشانی	۵۳	۷	تعداد
مراکز اداری	۱۴۱۵	۸۷	تعداد
مراکز آموزشی	۱۰۱۷۲	۷۴۳	تعداد
پایانه حمل‌ونقل	۴۴	۷	تعداد
استادیوم ورزشی	۸۲	۵	تعداد

همان‌طور که در بالا اشاره شد، استان تهران از نظر میانگین نرخ سالیانه فرونشست، بحرانی‌ترین استان در بین استان‌های کشور به شمار می‌رود. لذا نظر به موقعیت استراتژیک پایتخت و همچنین تشدید بحران فرونشست و کم‌آبی در این استان، در ادامه این بخش به صورت متمرکز به وضعیت فرونشست در استان و به‌ویژه کلان‌شهر تهران پرداخته شده است.

۵-۱. وضعیت فرونشست در تهران

بر اساس پردازش‌های صورت گرفته توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با استفاده از داده‌های راداری در استان تهران حدود ۱۲/۵ درصد از کل مساحت استان در پهنه فرونشست قرار دارد. دو منطقه اصلی فرونشست در استان شناسایی شده‌اند که نقشه پهنه‌بندی مربوط به این گستره در شکل زیر ارائه شده است. منطقه اول ناحیه‌ای به وسعت تقریبی ۸۶۰ کیلومتر مربع در ورامین و شهرهای اطراف است که ۸۰۰ کیلومتر مربع آن در محدوده استان تهران قرار دارد و بیشینه نرخ فرونشست در این ناحیه ۲۳/۷ سانتی‌متر در سال برآورد شده است. منطقه دیگر به وسعت ۹۰۰ کیلومتر مربع در جنوب غرب شهر تهران و حومه است که حدود ۸۳۰ کیلومتر مربع آن در داخل استان تهران قرار دارد [۲۱].

شکل ۷. نقشه پهنه‌بندی فرونشست در استان تهران [۲۱]

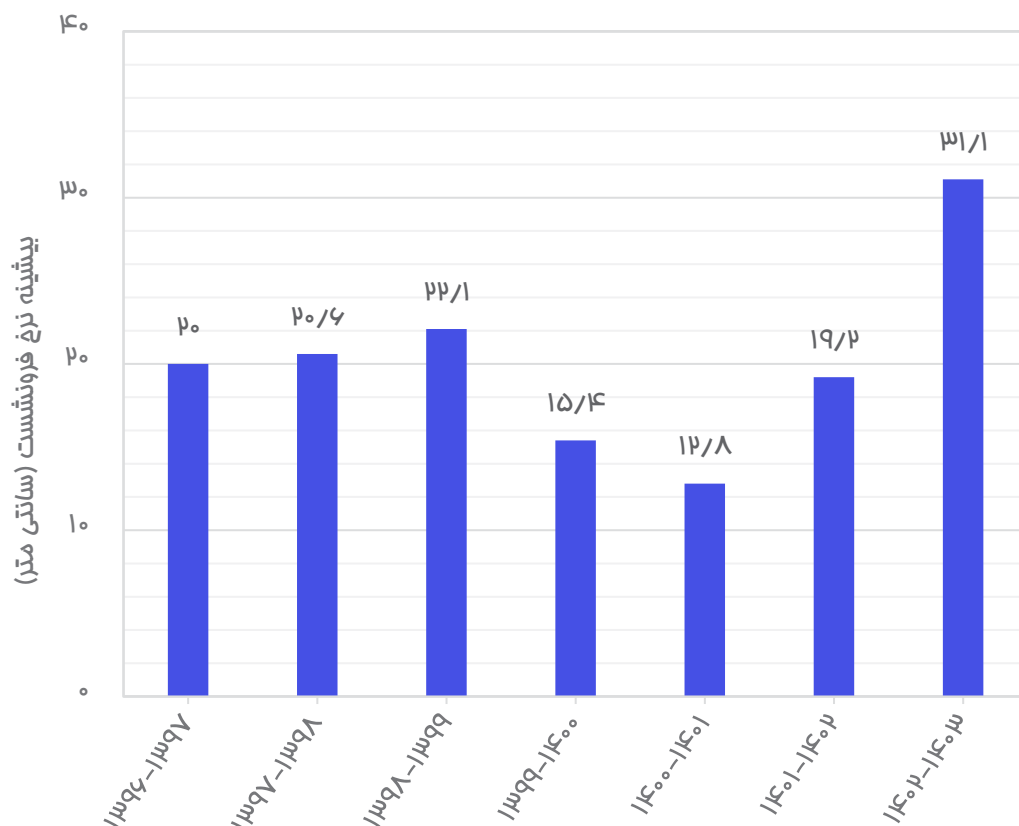


سابقه شناسایی و پایش پدیده فرونشست در ایران توسط این سازمان به سال ۱۳۸۰ بازمی‌گردد، زمانی که نخستین بار فرونشست در دشت تهران از طریق بررسی تغییرات ارتفاعی در مسیرهای ترازیبی درجه یک به صورت کمی آشکارسازی شد. در بررسی مشاهدات سال‌های ۱۳۷۱ و ۱۳۸۰ مشخص شد که در امتداد بزرگراه آزادگان بیشینه نشست تجمعی معادل ۱/۲ متر در طی ۹ سال رخ داده و در سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۹ ضمن اطمینان از وقوع پدیده فرونشست، بیشینه نرخ سالانه فرونشست در این منطقه برابر با ۲۰/۷ سانتی متر ثبت شد. همچنین در امتداد بزرگراه آزادگان، در برخی نواحی بیشینه فرونشستی معادل ۱/۷۵ متر طی ۱۴ سال ثبت شده است.

• تغییرات زمانی و گرادیان نرخ فرونشست در تهران

نتایج حاصل از پردازش داده‌های راداری سازمان نقشه‌برداری کشور (شکل زیر) نشان می‌دهد که بیشینه نرخ فرونشست در جنوب غرب تهران از حدود ۲۰ سانتی متر در سال طی سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ به ۱۲/۸ سانتی متر در سال در بازه ۱۴۰۱-۱۴۰۰ کاهش یافته که این افت موقتی عمدتاً ناشی از افزایش بارندگی در آن بازه زمانی بوده است. با این حال، بررسی‌های اخیر این سازمان نشان می‌دهد که در سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، نرخ فرونشست مجدداً روند افزایشی یافته و بیشینه نرخ فرونشست به ۱۹/۲ سانتی متر در سال رسیده است؛ به طوری که در برخی نقاط، نرخ فرونشست تا ۱۰ سانتی متر در سال افزایش یافته است. متأسفانه، تداوم روند تشدید فرونشست در پایتخت به ثبت بیشینه نرخ بی‌سابقه و بحرانی ۳۱/۱ سانتی متر در سال در بازه زمانی شهریور ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۳ منجر شده است. تغییرات زمانی بیشینه نرخ فرونشست در تهران در شکل زیر قابل مشاهده است و جزئیات این روند افزایشی در ادامه ارائه شده است.

شکل ۸. نمودار تغییرات زمانی و مکان وقوع بیشینه نرخ فرونشست در تهران [۲۲]



۱. منظور از گرادیان فرونشست نسبت حداکثر اختلاف فرونشست بین دو پیکسل مجاور به فاصله بین دو پیکسل است.

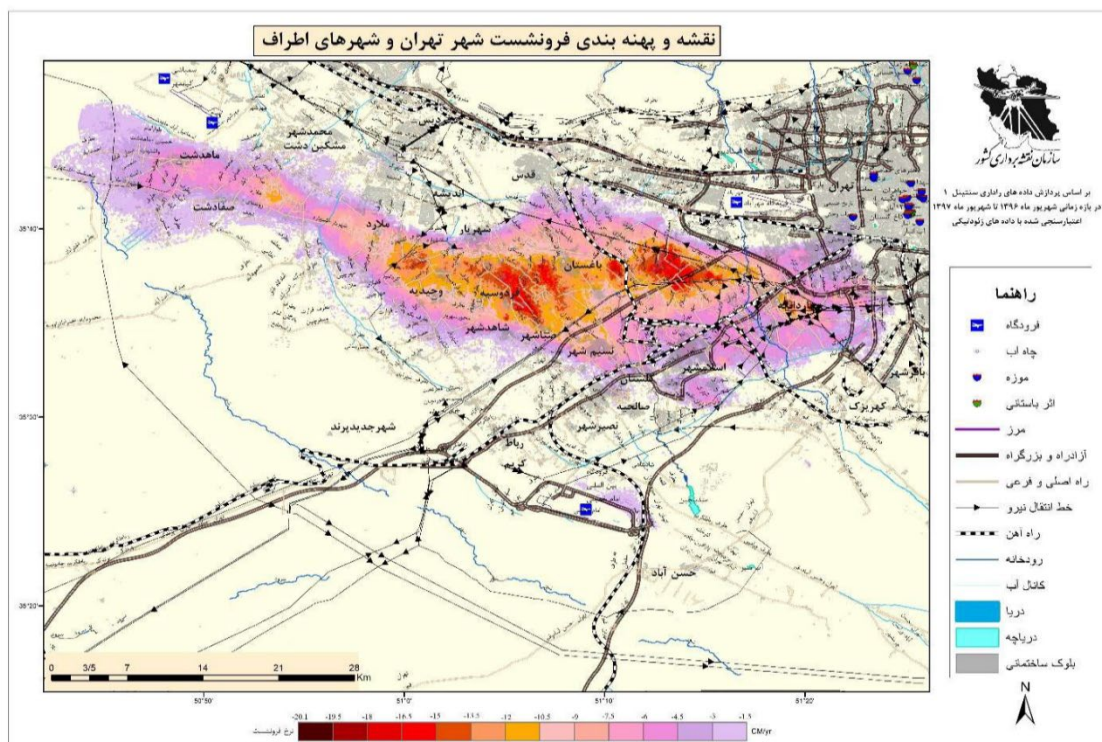
* توضیحات نمودار:

سال آبی	بیشینه نرخ فرونشست (سانتی‌متر)	مکان وقوع بیشینه فرونشست
۱۳۹۶-۱۳۹۷	۲۰	اراضی کشاورزی چهار دانگه
۱۳۹۷-۱۳۹۸	۲۰/۶	اراضی کشاورزی احمدآباد مستوفی
۱۳۹۸-۱۳۹۹	۲۲/۱	منطقه ۱۹ شهرداری
۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۵/۴	اراضی کشاورزی چهار دانگه، شهریار و احمدآباد مستوفی
۱۴۰۰-۱۴۰۱	۱۲/۸	اراضی کشاورزی چهار دانگه، شهریار و احمدآباد مستوفی
۱۴۰۱-۱۴۰۲	۱۹/۲	یافت‌آباد، نسیم‌شهر، اراضی کشاورزی چهار دانگه، شهریار و احمدآباد مستوفی
۱۴۰۲-۱۴۰۳	۳۱/۱	یافت‌آباد و نسیم‌شهر

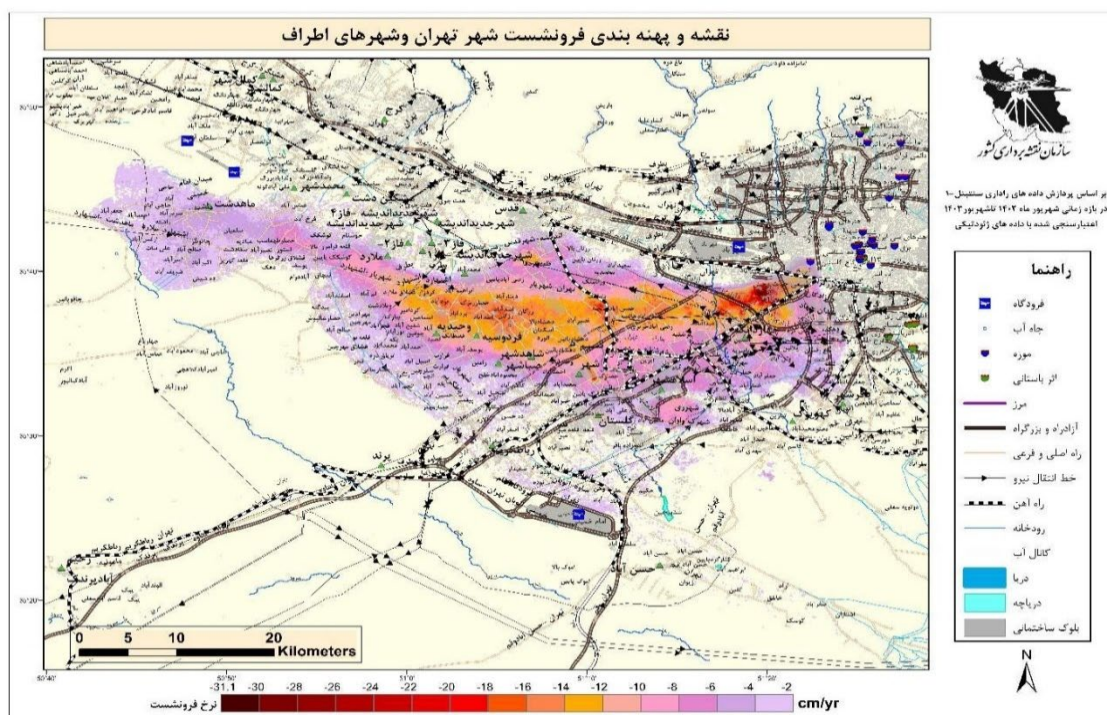
بررسی سری زمانی بیشینه نرخ فرونشست تهران در شکل فوق نشان می‌دهد که در فاصله سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰، بیشینه نرخ در بازه‌ای بین ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متر در سال نوسان داشته است. در سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، بیشینه نرخ فرونشست در دشت تهران به ۱۹/۲ سانتی‌متر در سال رسید که عمدتاً در مناطق یافت‌آباد، نسیم‌شهر، چهار دانگه، شهریار و احمدآباد مستوفی رخ داده است. نتایج محاسبات حاکی از آن است که از سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱ نرخ فرونشست هم در بافت مسکونی (به‌ویژه منطقه ۱۸ و یافت‌آباد) و هم در اراضی کشاورزی اطراف روند صعودی داشته است.

براساس پردازش‌های انجام شده در بازه شهریور ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۳ بیشینه نرخ فرونشست تهران به نرخ بی‌سابقه ۳۱/۱ سانتی‌متر در سال در منطقه مسکونی یافت‌آباد و نسیم‌شهر رسیده است. همچنین، نرخ فرونشست در اراضی کشاورزی چهار دانگه، شهریار و احمدآباد مستوفی نیز با افزایش مواجه بوده و به بیشینه ۲۰ سانتی‌متر در سال رسیده است. در عین حال، مناطق شهری ۱۰، ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۱ نیز با رشد قابل توجه نرخ فرونشست مواجه هستند [۲۲].

شکل ۹. نقشه گسترش و نفوذ پهنه فرونشست به محدوده شهری تهران در سال‌های آبی: الف) ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ و ب) ۱۴۰۲ تا ۱۴۰۳ [۲۲]



(الف)



(ب)

اگرچه فرونشست در کلیت خود تمامی پهنه‌های درگیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما مناطق واقع در پهنه‌های دارای فرونشست نامتقارن به دلیل تفاوت نرخ جابه‌جایی بیشترین پتانسیل ایجاد شکاف و فروچاله و در نتیجه آسیب به سازه‌های سطحی و زیرسطحی را دارند. در واقع، نرخ فرونشست به تنهایی معیار کافی برای ارزیابی خطر نیست؛ بلکه فاکتورهای نظیر جنس خاک، تغییرات گرادیان نرخ فرونشست و هم‌گرایی نرخ جابه‌جایی قائم نیز در شدت خطر نقش دارند. بسیاری از شکستگی‌ها ناشی از تفاوت نرخ گرادیان فرونشست است که در واقع به رخداد فرونشست نامتقارن اشاره دارد. این پدیده عمدتاً در لبه‌های پهنه‌های فرونشست با نرخ بالا رخ می‌دهد و ریسک تخریب سازه‌ها در این نواحی به مراتب بیشتر از دیگر مناطق است [۲۰] [۲۳].

در این راستا و با هدف تهیه نقشه مخاطره فرونشست، نقشه گرادیان سرعت فرونشست زمین نیز تهیه می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات نرخ جابه‌جایی قائم است. این نقشه در واقع مشتق اول نقشه نرخ جابه‌جایی قائم بوده و در ارزیابی خطر نقش کلیدی ایفا می‌کند. مطابق با نتایج حاصل از بررسی این نقشه‌ها، بیشینه درصد تغییرات نرخ جابه‌جایی در دشت تهران معادل ۲۹ درصد می‌باشد که در مناطق نسیم‌شهر و اسلامشهر مشاهده شده است. همچنین، در محدوده شهری تهران، بیشینه گرادیان نرخ فرونشست در منطقه ۱۸ (محله یافت‌آباد) برابر با ۲۴ درصد و در منطقه ۱۹ بیش از ۲۰ درصد گزارش شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که مؤلفه گرادیان در مناطق ۱۷، ۱۸ و ۱۹، به‌ویژه از منظر پایداری سازه‌های نگران‌کننده ارزیابی می‌شود [۲۲].

• حفر و برداشت بی‌رویه چاه‌های آب

براساس شواهد میدانی، تعداد زیادی چاه بهره‌برداری از آب زیرزمینی در منطقه ۱۸ تهران فعال هستند که محل استقرار آنها با مرکز فرونشست شناسایی شده هم‌پوشانی دارد. به گفته کارشناسان شرکت آب و فاضلاب تهران، برداشت آب از این چاه‌ها در دو سال گذشته به‌صورت مداوم و بدون وقفه صورت گرفته است، در حالی که در سنوات گذشته، برداشت‌ها براساس برنامه‌ریزی گردشی (فعال‌سازی متناوب برخی چاه‌ها و غیرفعال‌سازی موقت برخی دیگر) انجام می‌شد. این تغییر در شیوه بهره‌برداری، هم‌زمان با ورود تهران به یک دوره خشکسالی ممتد و کم‌سابقه (پنجمین سال متوالی) رخ داده که در ۵۰ سال اخیر بی‌سابقه بوده است. در نتیجه، فرضیه اثرگذاری مستقیم برداشت متمرکز و بی‌رویه از چاه‌های آب در بروز فرونشست موضعی در این منطقه تقویت می‌شود. برای اثبات دقیق‌تر این فرضیه، لازم است ارتباط سری‌های زمانی نرخ فرونشست با تغییرات سطح آب در چاه‌ها مورد تحلیل دقیق قرار گیرد [۲۳] [۲۴].

بنا به اذعان منابع رسمی، تعداد چاه‌های حفاری شده برای تأمین آب پایتخت در طی ۱۵ سال گذشته از ۳۶۵ حلقه به حدود ۷۰۰ حلقه افزایش یافته است. این در حالی است که با وجود ممنوعیت مصوب شورای شهر تهران در تاریخ ۲۸ شهریور ۱۴۰۲ مبنی بر جلوگیری از حفر چاه‌های جدید در مناطق ۲۲گانه تهران، طی سال‌های ۱۴۰۲ و ۱۴۰۳ بیش از ۱۰۰ حلقه چاه عمیق جدید در این مناطق حفر شده است. همچنین، سهم تأمین آب پایتخت از منابع زیرزمینی (چاه و قنات) از ۲۶ درصد در اوایل دهه ۱۳۹۰ به حدود ۴۵ درصد در حال حاضر رسیده و حجم برداشت از سفره‌های زیرزمینی حدود ۸۰ درصد رشد کرده است. در همین حال طبق آمار کمیته ایمنی شورای شهر تهران (۱۴۰۴)، ۱۵ تا ۳۵ درصد از آب تأمین شده در تهران دچار هدررفت می‌شود. ضمن اینکه براساس آمار رسمی دفتر محیط‌زیست شهرداری تهران سالیانه حدود ۲۰۰ میلیون مترمکعب آب برای آبیاری فضای سبز شهر تهران مصرف می‌شود [۲۴].

براساس آمار و نقشه پراکنش چاه‌های پایتخت در سال ۱۳۹۱، بیش از ۲۱۰۰ حلقه چاه آب در منطقه ۱۸ و اطراف آن وجود دارد. از این تعداد، ۹۳۰ حلقه چاه دارای عمق ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر، حدود ۹۰۰ حلقه با عمق ۵۰ تا ۱۰۰ متر و مابقی کمتر از ۵۰ متر عمق دارند. در این شرایط، پمپاژ مداوم و بدون وقفه آب از چاه‌ها به شکل‌گیری مخروط افت پایستار سطح آب زیرزمینی منجر شده و در ادامه، اثر ضربه‌ای فرونشست در سطح زمین ظاهر می‌شود. بی‌تردید این پدیده، تأثیر مستقیم و مخربی بر پایداری سازه‌های مستقر در زون‌های فرونشست خواهد داشت [۲۵].

در محدوده‌ای به شعاع تقریبی ۱/۲ کیلومتر در حوالی پارک قائم و پارک نرگس در منطقه ۱۸ تهران که به‌عنوان یکی از نواحی با بالاترین نرخ فرونشست در کلان‌شهر تهران شناسایی شده، ۱۳ حلقه چاه عمیق فعال وجود دارد که موقعیت این چاه‌ها تقریباً با مرکز فرونشست ایجاد شده در این محدوده انطباق دارد. بررسی سری‌های زمانی مربوط به نرخ فرونشست در این ناحیه نشان می‌دهد که ۵ حلقه از این چاه‌ها



بیشترین میزان نشست زمین را تجربه کرده‌اند، به گونه‌ای که مجموع میزان فرونشست آنها در دوره‌ای هشت ساله به بیش از ۷۰ سانتی‌متر رسیده است. همچنین، نرخ فرونشست در چاه‌هایی که در حاشیه یا لبه کاسه فرونشستی قرار دارند، در همین بازه زمانی حدود ۴۰ سانتی‌متر گزارش شده است [۲۶].

در این میان، اقدامات پیشگیرانه‌ای که با هدف کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی برنامه‌ریزی شده بودند نیز عمدتاً بدون نتیجه مانده‌اند. شهرداری تهران طی سال‌های ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱ سه تفاهم‌نامه با وزارت نیرو و به منظور کاهش مصرف آب زیرزمینی و جایگزینی آن با پساب تصفیه شده منعقد کرده است؛ اما مفاد هیچ‌یک از این تفاهم‌نامه‌ها به طور کامل اجرا نشده است. از دلایل عدم اجرای این موضوع می‌توان به عدم تأمین زمین از سوی شهرداری به منظور تأسیس تصفیه‌خانه و تحویل آب حاصل از تصفیه پساب توسط شرکت آب و فاضلاب اشاره کرد که طبق مفاد تفاهم‌نامه باید صورت می‌گرفت [۲۴].

• دوگانه تأمین آب شهر تهران در شرایط اضطراری و تشدید فرونشست

در حال حاضر، سه مورد از پنج سد اصلی تأمین‌کننده آب تهران، در خارج از مرزهای استان قرار دارند. افت چشمگیر حجم مخازن سدهای کشور و برداشت بی‌رویه از ذخایر آب زیرزمینی به منظور تأمین آب شهرها، به ویژه تهران، نه تنها به کاهش خطرناک سطح آبخوان‌ها منجر شده بلکه در نهایت به خشکی زمین و بروز پدیده فاجعه‌بار فرونشست انجامیده است. فرونشست در دشت‌های هشتگرد، شهریار، ورامین و پاکدشت و حتی در بخش‌هایی از استان مازندران مشاهده شده است. اولویت اصلی در بهره‌برداری از این سدها، تأمین آب شرب شهر تهران بوده و سهم بخش کشاورزی به حداقل رسیده و به طور کلی سهم مصرف صنعت و کشاورزی در داخل شهر تهران به نسبت مصرف شرب اندک است. در عین حال، استان‌های تأمین‌کننده (البرز و مازندران) نیز با رشد جمعیت و افزایش نیاز آبی مواجه‌اند و تداوم این روند در آینده می‌تواند منجر به کشمکش شود. از این رو، بازنگری جدی در شیوه مدیریت منابع آبی موجود، امری اجتناب‌ناپذیر است [۲۷].

بر اساس اظهارات استاندار تهران، سرانه مصرف آب در این کلان‌شهر بیش از دو برابر استاندارد ملی (۲۵۰ لیتر در برابر ۱۳۰ لیتر) است و ۶۳ درصد جمعیت شهر تهران بیش از الگوی مجاز مصرف دارند. در گذشته، نسبت تأمین آب شرب تهران از منابع سطحی (سدها) به منابع زیرزمینی ۷۰ به ۳۰ بود، اما این نسبت اکنون به شدت تغییر کرده و به ۳۸ درصد از سدها و ۶۲ درصد از منابع زیرزمینی رسیده است [۲۸]. با توجه به تحلیل‌هایی که ارائه شد، شرایط بحرانی تأمین آب و هم‌زمانی آن با تشدید فرونشست در جنوب تهران، چالشی چندبعدی و پیچیده پدید آورده که مستلزم تدوین و اجرای راهکارهایی جامع، پایدار و مبتنی بر همکاری نهادهای مختلف است. هر چند تأمین آب شرب اولویتی انکارناپذیر است، اما پیامدهای فاجعه‌آمیز فرونشست نیز باید با همان درجه اهمیت در نظر گرفته شود. حفر چاه‌های عمیق، اگرچه ممکن است راه‌حلی موقت برای تأمین آب باشد، اما در شرایط کنونی با افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، روشی پرخطر و ناپایدار است. لذا باید به دنبال راهکارهای اصولی مدیریت بحران آب بود که علاوه بر کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی، منجر به تشدید فرونشست زمین نشود. بحران آب تهران تنها با اتخاذ رویکردی چندجانبه قابل مدیریت است؛ رویکردی که از یک سو به مدیریت تقاضا و کاهش مصرف بپردازد و از سوی دیگر، منابع موجود را حفظ و بازتوانی کند. بدون اقدام‌های فوری هماهنگ و اصولی، نه تنها امنیت آبی به مخاطره می‌افتد، بلکه فرونشست زمین می‌تواند به بحرانی جبران‌ناپذیر در مقیاس ملی تبدیل شود.

بدیهی است با گذشت پنج سال پیایی خشکسالی، منابع آبی موجود دیگر پاسخ‌گوی نیازهای روزافزون استان و شهر تهران نیست. توسعه سریع و کنترل نشده در مناطق پیرامونی استان هم‌زمان با افزایش تراکم جمعیت، فشار سنگینی بر منابع آبی آبخوان‌ها وارد ساخته و نظام تأمین آب در سطح استان به ویژه در کلان‌شهر تهران را با بحرانی جدی و پیچیده روبه‌رو کرده است. امنیت آبی در این منطقه اکنون به یک چالش اساسی و چندوجهی تبدیل شده است. در حال حاضر وابستگی شدید به منابع آب سطحی خارج از استان، کاهش نگران‌کننده ذخایر سدها و برداشت فزاینده و مداوم از منابع آب زیرزمینی برای تأمین آب شهر منجر به افت شدید سطح آبخوان‌ها، گسترده لایه‌های خاک و بحران فرونشست شده است. این وضعیت به ویژه در جنوب تهران چالشی چندبعدی و پیچیده پدید آورده که مستلزم تدوین و اجرای راهکارهایی جامع، پایدار و مبتنی بر همکاری نهادهای مختلف است. ناگفته نماند که افزایش کم‌آبی، گسترش فرونشست، فشار بر شبکه فرسوده آب و

فاضلاب، رشد بی‌رویه شهرها و اتکای گسترده به کشاورزی پرمصرف در کنار هم به بحرانی تبدیل شده‌اند که ریشه‌های آن بیش از آنکه در کمبود بارش باشد، در تصمیم‌گیری‌های انسانی، مدیریت ناهماهنگ و توسعه بی‌برنامه (از جمله احداث سدها بدون بررسی دقیق اثرات زیست‌محیطی و مطالعات مکان‌یابی) نهفته است.

۵-۲. وضعیت فعلی و مهم‌ترین چالش‌های حکمروایی موجود

براساس آمار ارائه شده از سوی شرکت مدیریت منابع آب ایران (۱۴۰۲) در ۱۷ استان کشور برای تأمین آب، بیش از ۶۰ درصد وابستگی به آب‌های زیرزمینی وجود دارد و در ۸ استان خراسان رضوی، خراسان جنوبی، کرمان، فارس، یزد، هرمزگان، البرز و همدان این میزان به بیش از ۸۰ درصد می‌رسد. به‌طور دقیق‌تر میزان وابستگی تأمین آب شرب شهری و روستایی به منابع آب زیرزمینی در کشور به ترتیب ۵۷ و ۸۳ درصد اعلام شده است. همچنین سهم منابع آب زیرزمینی در تأمین آب مورد نیاز در حوزه کشاورزی و صنایع به ترتیب ۵۲ و ۶۳ درصد در سال ۱۴۰۳ گزارش شده است.

در بخش کشاورزی سالانه بیش از ۵/۶ میلیارد متر مکعب از طریق نزدیک به ۳۲۰ هزار حلقه چاه غیرمجاز و حدود ۵/۳ میلیارد متر مکعب توسط چاه‌های مجاز برداشت می‌شود (جمعاً حدود ۱۱ میلیارد متر مکعب برداشت سالانه). این در شرایطی است که راندمان بهره‌وری آب در کشور حدود ۲/۸ کیلوگرم در هر متر مکعب است که ۵۵ درصد پایین‌تر از متوسط جهانی می‌باشد. از سوی دیگر سالانه درصد بالایی از مواد غذایی تولیدی در کشور هدر می‌رود و ۳۵ درصد از ۱۰۰ میلیون تن تولید شده در اراضی کشاورزی تلفات و دورریز هستند. از منظر تأمین مواد غذایی در کشورهای تقریباً خشک عمده تولیدات باید معطوف به محصولات کم‌آب طلب استراتژیک (راهبردی) شده و محصولات به‌طور معمول کم‌ارزش و پر آب طلب از طریق واردات تأمین گردد. در واقع منابع آبی کمیاب و با ارزش کشور باید به جای تولید محصولات غیراستراتژیک، برای تولید محصولات اصلی کشاورزی که نقش مهمی در تأمین انرژی و امنیت غذایی کشور دارند، به مصرف برسند.

مطابق با آمار درگاه رسمی مرکز آمار ایران در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰ در حدود ۵ میلیون نفر (۷ درصد از جمعیت کشور) در داخل کشور مهاجرت کرده‌اند. از این میزان، ۸۰ درصد به مناطق شهری (بیش از ۵۰ درصد به حاشیه شهرها) و ۲۰ درصد به مناطق روستایی نقل مکان کرده‌اند که از جمله دلایل آن معضلات مربوط به تغییرات اقلیم، خشکسالی، کمبود دسترسی به منابع آبی و آسیب‌های ناشی از آن است. به‌طور متوسط میزان بارش در کشور نسبت به ۲۰ سال گذشته ۱۰ میلی‌متر کاهش داشته که طی این مدت درجه هوا حدود ۱ درجه و میزان تبخیر ۲۳۰ میلی‌متر افزایش داشته است [۹].

با توجه به بررسی‌های انجام شده چالش‌هایی که کشور در حوزه حکمروایی آب با آن مواجه است و علل عدم اجرایی شدن برنامه‌ها و راهکارهای حوزه آب و فرونشست را می‌توان در موارد زیر برشمرد:

ظرفیت نهادی و اجرایی ناکافی: در بسیاری از کشورها قوانین لازم وجود دارد، اما دستگاه‌های متولی نیروی انسانی، بودجه و اختیار کافی برای اجرای مقررات برداشت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی را در اختیار ندارند.

پیچیدگی مقیاس‌ها و ضعف هماهنگی: آبخوان‌ها مرز هیدروژئولوژیک دارند، در حالی که نظام اداری مبتنی بر حوضه یا تقسیمات استانی است؛ نبود سازوکارهای هماهنگ‌کننده میان آب سطحی و زیرزمینی و بین سطوح ملی و محلی تصمیم‌گیری را دشوار می‌کند.

مالکیت خصوصی چاه‌ها و ماهیت کالای مشترک: وابستگی حقوق آب زیرزمینی به مالکیت زمین کنترل بالا به پایین را دشوار می‌سازد و این منبع را در معرض تراژدی منافع مشترک قرار می‌دهد.

فقدان داده و نظام پایش منسجم: کمبود شبکه‌های اندازه‌گیری و محدودیت دسترسی آزاد به اطلاعات، تصمیم‌سازی مبتنی بر شواهد و پاسخ به‌موقع در برابر افت یا آلودگی منابع را محدود می‌کند.

اقتصاد سیاسی نامطلوب: یارانه‌های انرژی و آب و منافع ریشه‌دار برخی گروه‌ها انگیزه کاهش برداشت را تضعیف می‌کنند و مقاومت

سیاسی در برابر اصلاحات را افزایش می‌دهند.

ناهماهنگی سیاست‌های بخشی: اهداف بخش‌های کشاورزی، انرژی و کاربری اراضی اغلب با الزامات پایداری آب زیرزمینی در تعارض قرار می‌گیرند و گفت‌وگوی بین‌بخشی و یکپارچگی سیاستی به ندرت محقق می‌شود.

مشارکت محدود ذی‌نفعان محلی: نبود یا ضعف تشکلهای بهره‌بردار موجب می‌شود تصمیم‌ها بدون اجماع و تعهد عملی کاربران اتخاذ شوند و حکمرانی مشارکتی همچنان ضعیف باقی بماند.

کمبود منابع مالی پایدار: بودجه‌های دولتی برای پایش، اجرای مقررات و برنامه‌های احیا ناکافی و وابسته به اعتبارات کوتاه‌مدت باقی می‌مانند و سازوکارهای تأمین مالی مشارکتی نهادینه نمی‌شوند.

فقدان راهبرد جامع یکپارچه‌سازی آب‌های سطحی و زیرزمینی: برنامه‌ریزی منابع همچنان در دو بخش مجزا انجام می‌شود که پیامد آن بروز تضاد در تخصیص و باز تخصیص آب و نادیده گرفتن نیازهای اکوسیستم‌های وابسته است [۲۰].

۶. آثار و پیامدهای فرونشست بر محیط‌های شهری

فرونشست زمین در محیط‌های شهری پدیده‌ای چندبعدی با دامنه‌ای گسترده از پیامدهای محیطی، کالبدی، زیرساختی، اقتصادی و اجتماعی است که می‌تواند به‌طور هم‌زمان کارکردهای طبیعی و انسانی شهرها را تحت تأثیر قرار دهد. این پدیده از یک سو با ایجاد تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی زمین، تعادل محیط طبیعی و ظرفیت‌های سرزمینی را مختل می‌سازد و از سوی دیگر، با آسیب به مستحقات، زیرساخت‌ها و شریان‌های حیاتی، زمینه‌ساز بروز خسارات گسترده اقتصادی و پیامدهای اجتماعی می‌شود. از این رو، شناخت نظام‌مند ابعاد و پیامدهای فرونشست زمین در محیط‌های شهری، پیش‌شرط ضروری برای ارزیابی سطح مخاطره و تدوین سیاست‌ها و اقدامات مؤثر کاهش ریسک به شمار می‌رود. براساس بررسی منابع مختلف ([۹] [۲۹] [۳۰] [۲] [۳۱]) می‌توان اثرات و پیامدهای فرونشست زمین در محیط‌های شهری را در سه حوزه اصلی شامل آثار محیطی، زیرساختی و اقتصادی - اجتماعی دسته‌بندی و بررسی کرد:

• بروز مخاطرات ثانویه / اثرات محیطی

فرونشست زمین به‌ویژه هنگام برداشت بی‌رویه از آبخوان‌های زیرزمینی تنها به نشست سطحی محدود نمی‌شود بلکه با مجموعه‌ای از تغییرات هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی همراه است که پایداری محیط طبیعی و شهری را به خطر می‌اندازد. با کاهش فشار در لایه‌های آبرفتی، رسوبات زیرسطحی فشرده می‌شوند و فضاهای متخلخل جهت ذخیره و انتقال آب کاهش می‌یابد. در نتیجه ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی به‌طور چشمگیری کاهش یافته و احیا طبیعی آبخوان به سختی انجام می‌پذیرد. این وضعیت نه تنها تأمین پایدار آب برای مصارف شهری، شرب، کشاورزی و فضای سبز را با مخاطره مواجه می‌کند، بلکه اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی مانند چشمه‌ها، نهرها، تالاب‌ها و آبراهه‌های محلی را نیز در معرض خشکی یا کاهش جریان قرار می‌دهد که به نوبه خود منجر به کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه‌های طبیعی می‌شود.

فرونشست همچنین ساختار طبیعی زمین را دگرگون کرده و منجر به تغییر در شیب طبیعی سطح زمین، گرا دیان رودخانه‌ها، زهکش‌ها و شبکه‌های انتقال آب می‌شود. این امر می‌تواند عملکرد این شبکه‌ها را مختل سازد و به عنوان مثال جمع‌آوری و هدایت رواناب سطحی به نحو مؤثر انجام نشود و احتمال آب‌گرفتگی، رواناب نامنظم یا تجمع آب در نقاطی که پیش‌تر کم‌خطر بودند افزایش یابد. علاوه بر این، نشست زمین و فشردگی خاک باعث کاهش نفوذپذیری سطح خاک می‌شود. در نتیجه احتمال افزایش رواناب سطحی، تسریع در فرسایش خاک می‌شود و بیابان‌زایی یا گسترش پهنه‌های خشک بیشتر می‌شود. این فرایند به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی حساس یا خاک‌های سبک می‌تواند کاربری اراضی را تحت تأثیر قرار دهد. در مجموع، این پیامدها فراتر از حوزه فنی یا مهندسی هستند و با سلامت محیط زیست، امنیت زیستی

و پایداری بلندمدت مناطق شهری و پیرامونی ارتباط مستقیم دارند. با توجه به توضیحات ارائه شده، مهم‌ترین اثرات محیطی فرونشست عبارت‌اند از:

- تخریب و کاهش ظرفیت آبخوان‌ها و مرگ آبخوان‌ها شامل کاهش برگشت‌ناپذیر مخازن آب زیرزمینی و از بین رفتن تخلخل مفید نهشته‌ها،
- ایجاد مسیل‌های سیلابی، گسترش مناطق سیل‌گیر و آب‌گرفتگی مناطق،
- افزایش سطح مطلق آب دریا و پیشروی امواج در مناطق پست ساحلی همراه با نفوذ آب شور به آبخوان‌های ساحلی،
- کاهش تنوع زیستی و تخریب اکوسیستم‌ها،
- آسیب به اراضی کشاورزی و کاهش بهره‌وری محصولات زراعی،
- کاهش نفوذپذیری سطحی خاک، فرسایش و گسترش پهنه‌های بیابانی و مستعد سیلاب،
- افزایش خطر سیل خیزی به علت توسعه مناطق با ارتفاع کمتر از سطح آب دریا و مستعد شدن منطقه به خطر سیل حاصل از جزر و مد و تغییر در سیستم زهکشی مناطق مورد نشست،
- تغییرات نامتقارن در ارتفاع و گرادیان کانال رودخانه‌ها، آبراهه‌ها، زهکش‌ها و سازه‌های انتقال آب،
- توسعه فیشرها (Earth Fissures) یا شکاف‌های کششی کم‌وبیش بلند و فرسایش یافته،
- افزایش دی اکسید کربن خروجی به دلیل افزایش اکسیداسیون مناطق توری و باتلاقی،
- افزایش خطر سیل خیزی و تشدید آسیب‌پذیری در برابر زمین‌لرزه.

• آسیب به مستحقات و زیرساخت‌ها/اثرات زیرساختی

زیرساخت‌ها جزء بنیان‌های اصلی و چارچوب‌های پایه‌ای هر جامعه به شمار می‌آیند که دربرگیرنده تمامی تأسیسات و تسهیلات مورد نیاز آن جامعه‌اند. اگر خطر طبیعی ناشی از یک فعالیت زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و یا آب‌وهوایی به‌طور مستقیم بر فعالیت‌های انسانی و زیرساخت‌ها تأثیر گذارد به یک بحران تبدیل می‌شود. مخاطرات طبیعی با توجه به مجاورتشان با بستر کانون‌های فعالیت انسانی، از یک سو تحدیدی برای زیرساخت‌ها محسوب شده و از سوی دیگر تشدید آسیب‌پذیری در برابر مخاطره به واسطه اقدامات فاقد برنامه‌ریزی و مخرب انسان، در اغلب موارد فاجعه به همراه دارد. فرونشست زمین فرایندی است که وقوع آن عاملی در ایجاد و تشدید ناپایداری و آسیب‌پذیری کانون‌های استقرار جمعیت و فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شود.

مناطق شهری به سبب تراکم جمعیت، وجود ساختمان‌ها و جریان‌های حیاتی به‌طور ویژه در برابر فرونشست آسیب‌پذیرتر می‌باشند. این پدیده می‌تواند به خیابان تا پل تا و بزرگراه تا آسیب وارد آورده، خطوط آب‌رسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده، به پی ساختمان تا آسیب رسانده و موجب ترک خوردگی در آنها شود. این اثرات زیرساختی در مقایسه با دیگر اثرات قابل تشخیص‌تر است که هم بناها و هم جریان‌های حیاتی (شبکه حمل‌ونقل، خطوط انتقال برق و مخابرات، شبکه فاضلاب لوله‌های آب و گاز و نفت، شبکه جمع‌آوری فاضلاب و آب‌های سطحی و...) را درگیر می‌کند. جریان‌های حیاتی شاه‌رگ بقای شهرنشینی در دنیای امروز هستند و ایمنی آنها در پیش و پس از بحران‌های طبیعی برای جلوگیری از تخریب و حتی به تأخیر افتادن عملکرد جریان‌ها و بررسی‌های دقیق در جهت ارتقای ایمنی آنها امری ضروری است.

براساس مطالعات صورت گرفته در شهر تهران حدود ۱۲۰ کیلومتر خط راه‌آهن و ۲۵ کیلومتر از خطوط مترو، حدود ۲۰۰ کیلومتر اتوبان‌های بین‌شهری، حدود ۲۳۰۰ کیلومتر راه‌ها و معابر شهری و بین‌شهری اصلی و فرعی، ۲ انبار مواد نفتی و سوختی و ۴۴ جایگاه پمپ‌بنزین و ۱۵ جایگاه پمپ گاز، ۷ ایستگاه گاز، ۳۰ کیلومتر طول لوله نفت و نیز بیش از ۷۰ کیلومتر خطوط فشار قوی و بیش از ۲۰۰ کیلومتر خطوط اصلی گاز در محدوده فرونشست قرار دارد [۲۹]. تشدید فرونشست به‌ویژه در مناطق جنوب و جنوب غرب پایتخت تهدیدی جدی برای سامانه‌های حمل‌ونقل به‌ویژه خطوط راه‌آهن، شبکه آب‌رسانی، ساختمان‌ها، تأسیسات زیرسطحی و جریان‌های حیاتی به شمار می‌رود. مهم‌ترین اثرات فرونشست زمین در زیرساخت‌های حمل‌ونقل و جریان‌های حیاتی به شرح زیر می‌باشد:

- آسیب به زیرساخت‌های شبکه حمل‌ونقل (جاده‌ها، خطوط ریلی، پل‌ها، تونل‌ها، فرودگاه‌ها و...) به‌ویژه خطوط راه‌آهن به دلیل خطی بودن



این نوع سازه،

- تخریب و ایجاد شکستگی در خطوط انتقال برق و مخابرات (دکل‌ها، آنتن‌های مخابراتی، تیرهای برق و...)
- صدمه به شبکه و خطوط انتقال سوخت و جابه‌جایی آنها از مسیر اصلی، افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و گسیختگی لوله‌های انتقال نفت، بنزین و گاز در اثر تشدید فرونشست،
- آسیب به خطوط انتقال آب و کانال‌های فاضلاب، نشت آب به دلیل فرسودگی شبکه آبرسانی و تشدید وقوع بحران در اثر سستی خاک و حفره‌های خالی قنات،
- وقوع ترک و آسیب‌های شدیدتر از جمله نشست نامتقارن در ساختمان‌ها و آسیب به سازه در اثر توسعه تنش‌های کششی یا فشارشی،
- تهدید ساختمان‌های مهم و حیاتی از جمله بیمارستان‌ها و مراکز حساس، آسیب به کارگاه‌ها و مراکز تجاری و صنعتی،
- گسیختگی یا بیرون زدگی لوله جدار چاه‌ها در نتیجه تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها و ایجاد اختلال در سیستم پمپاژ، تخریب، ماسه دهی و کاهش عمر چاه‌های آب زیرزمینی،
- تهدید و تخریب اماکن تاریخی و آثار باستانی،
- کاهش تاب‌آوری سازه‌ها و مناطق مسکونی در برابر زلزله.

• اثرات مخرب اقتصادی و اجتماعی

خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند و می‌تواند هزینه‌های سنگینی به بخش‌های مختلف تحمیل کند که همه این هزینه‌ها به‌طور مستقیم به‌عنوان آسیب ناشی از این پدیده شناخته نمی‌شود. به‌عنوان نمونه، از بین رفتن و تخریب مناطق و مراکز حساس اقتصادی از جمله بازار و... باعث تعلیق معاملات کلان می‌گردد. تخریب و آسیب دیدن زیرساخت‌های حمل‌ونقل، شریان‌های حیاتی، ساختمان‌ها، سازه‌های مهم و مراکز تجاری و صنعتی واقع در پهنه‌های فرونشست زمین، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر راندمان تولید، اشتغال و هزینه‌های نوسازی و مکان‌یابی دوباره این مستحقات تأثیرگذار خواهد بود. علاوه بر آن بسیاری از نهادها و سازمان‌ها را نیز در گیر خود می‌سازد و در نهایت می‌تواند منجر به نارضایتی عمومی گردد.

رویداد مخاطره فرونشست در سکونتگاه‌ها علاوه بر ایجاد خسارت فراوان به ساختمان‌ها و تأسیسات، جمعیت‌های انسانی ساکن را نیز تهدید می‌کند. به‌نحوی که بروز آن می‌تواند با ایجاد تلفات انسانی از طریق تخریب ساختمان‌ها به فاجعه تبدیل شود. فروریزش ناگهانی زمین و تخریب و ریزش سازه‌های آسیب‌پذیر از سوانح محتمل ناشی از عوارض فرونشست است که در نواحی شهری به سبب تراکم جمعیت و یا گسترش شعاعی اراضی فروریخته می‌تواند با ایجاد تلفات انسانی و پیامدهای اجتماعی ناشی از آن فاجعه‌آفرین باشد. همچنین افت سطح آب‌های زیرزمینی به سبب برداشت بیش از حد و در نتیجه کاهش کیفیت آب، بر سلامت ساکنین منطقه نیز تأثیر می‌گذارد. به‌علاوه، اختلال در فعالیت ساکنین در پی تعمیر شریان‌های حیاتی و آسیب به ساختمان‌های مسکونی، منجر به بروز نارضایتی اجتماعی خواهد شد. مهم‌ترین اثرات اقتصادی و اجتماعی ناشی از فرونشست زمین را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها،
- ضرر مالی به دلیل آسیب یا تخریب مستحقات،
- کاهش ارزش زمین و املاک،
- اختلال در فعالیت‌های اقتصادی و روزمره،
- کاهش راندمان تولید و اشتغال و توقف کسب‌وکار،
- از دست دادن نیروی کار مولد با تلفات و صدمات،
- هزینه‌های تحمیل‌شده برای بازسازی امداد رسانی،
- تلفات جانی و مالی،

- در معرض خطر قرار گرفتن ارزش‌های فرهنگی، تاریخی و معنوی در اثر تخریب فیزیکی و آسیب به اماکن تاریخی و آثار باستانی و اثرات سوء آن بر حوزه گردشگری و درآمدزایی،
- افزایش مهاجرت ساکنین شهرهای درگیر خشکسالی به سمت شهرهای شمالی و در نتیجه ازدیاد جمعیت در این مناطق،
- تهدید سلامت ساکنین به دلیل افت کیفیت آب،
- نارضایتی اجتماعی در پی آسیب به شریان‌های حیاتی و بعضاً قطع آب شرب به دلیل کمبود منابع.

۷. راهبردها و الزامات مدیریت شهری در کنترل و مواجهه با فرونشست

با توجه به گستره، پیچیدگی و پیامدهای چندبعدی پدیده فرونشست زمین در محیط‌های شهری، مواجهه مؤثر با این مخاطره مستلزم مجموعه‌ای از راهبردها و الزامات هماهنگ در سطوح شناسایی و پایش، کاهش نرخ فرونشست از طریق مدیریت منابع آب و مداخلات کالبدی و زیرساختی است که در ادامه این بخش تشریح شده‌اند. مدیریت شهری در این میان نقشی محوری دارد؛ چرا که از یک سو مسئول برنامه‌ریزی فضایی، کنترل توسعه و حفاظت از زیرساخت‌ها و از سوی دیگر متولی بخشی از سیاست‌ها و اقدامات مرتبط با مصرف آب، ساخت و ساز و ارتقای تاب‌آوری شهری است. بر این اساس، راهبردهای مدیریت فرونشست باید به صورت مرحله‌ای و یکپارچه، از شناسایی و پایش دقیق پدیده آغاز شده و با کنترل عوامل تشدیدکننده، کاهش نرخ فرونشست و در نهایت کاهش اثرات آن بر مستحداثات، زیرساخت‌ها و دارایی‌های شهری ادامه یابد. در همین چارچوب و با بررسی منابع و تجارب مختلف ([۳۲] [۳۳] [۹] [۲۹] [۳۴])، راهبردها و الزامات مدیریت شهری در کنترل و مواجهه با فرونشست زمین در محورهای زیر تبیین شده است. همچنین در پیوست (۱)، برخی از اقدامات و تجربیات جهانی [۳] در مقابله با اثرات فرونشست در محیط‌های شهری ارائه شده که در سه حوزه مدیریت آب‌های زیرزمینی، مداخلات در خاک و زمین و مداخلات ساختمانی و سازه‌ای دسته‌بندی شده‌اند.

۷-۱. اقدامات و راهبردهای حوزه شناسایی، پیش‌بینی و پایش فرونشست

- اندازه‌گیری فرونشست زمین با استفاده از ایستگاه‌های GPS به صورت نقطه‌ای و تصاویر ماهواره‌ای در ساختمان‌ها و مستحداثات با درجه اهمیت بسیار بالا در پهنه‌های با خطر بالای فرونشست،
- تکمیل شبکه پایش بر خط تراز آب‌های زیرزمینی و انجام مطالعات ژئوفیزیک،
- تجهیز سامانه‌های پایشی برای پایش فرونشست در شهرها و گستره اطراف آنها و شناسایی زون‌های فرونشست،
- استفاده از روش‌های نوین اندازه‌گیری رقوم ارتفاعی و پایش مداوم پنج‌مارک‌های موجود در سال‌های متوالی به منظور مدل‌سازی و بررسی دقیق و پیوسته فرونشست منطقه،
- بررسی سهم تغییرات تراز آب زیرزمینی بر فرونشست با بررسی دقیق‌تر مشخصات خاک از طریق حفر گمانه‌های عمیق و مقایسه فرونشست مدل‌سازی شده با فرونشست موجود،
- پیش‌بینی میزان فرونشست در سال‌های آتی در مناطق مورد مطالعه بر اساس ارتباط بین میزان افت سطح آب زیرزمینی و میزان فرونشست،
- پایش اثرات فرونشست در سایت‌های واقع در پهنه‌های فرونشست با استفاده از روش‌های ترازیابی دقیق، سامانه تعیین موقعیت جهانی و تکنیک تداخل سنجی راداری،
- تهیه و به‌روزرسانی نقشه پهنه‌بندی خطر فرونشست ضمن لحاظ نمودن عوامل تشدیدکننده ثانویه و اولویت‌بندی مناطق مستعد فرونشست در محدوده‌های شهری.



۷-۲. اقدامات و راهبردهای حوزه کاهش میزان و نرخ فرونشست زمین از طریق مدیریت منابع آب

الف) کاهش و کنترل بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی

- ایجاد بازار آب با استفاده از تجارب سایر کشورها با هدف اقتصادی کردن بهره‌برداری از منابع آب،
- اصلاح نظام قیمت‌گذاری آب و اعمال قیمت پلکانی برای مصارف بالاتر از استاندارد جهانی،
- پر و مسلوب‌المنفعه کردن چاه‌های غیرمجاز مشمول انسداد وفق قانون در کنار نصب کنتور هوشمند برای چاه‌های مجاز و سهمیه‌بندی مصارف،
- جداسازی آب شرب و آب بهداشتی و تفکیک انشعاب واحدهای مسکونی،
- آمایش سرزمین و توزیع متوازن جمعیت از طریق مکان‌یابی شهرهای جدید و توسعه شهرهای موجود بر مبنای میزان دسترسی به منابع آب به‌عنوان زیرساخت اصلی در توسعه پایدار شهرها،
- بازسازی و نوسازی خطوط انتقال آب و شبکه آب‌رسانی شهری و کاهش هدررفت آب از طریق لوله‌کشی‌های قدیمی،
- بازنگری در روش‌های آبیاری فضای سبز و تغییر گونه‌های گیاهی،
- اعمال الگوی مصرف آب در بخش خانگی متناسب با شرایط اقلیمی،
- کاهش استحصال آب زیرزمینی از چاه‌ها در پهنه‌های فرونشستی شهرها و یا در مجاورت آن،
- ممنوعیت ایجاد صنایع آب‌بر در پهنه‌های فرونشستی و کاهش مصرف آب‌های زیرزمینی، سطحی یا پساب‌ها در کارخانه‌ها و تأسیسات و صنایع پر مصرف در پهنه‌های فرونشستی و جابه‌جایی آنها در صورت عدم امکان کاهش مصرف،
- ممنوعیت مکان‌یابی صنایع و کارخانه‌ها و تأسیسات آب‌بر در پهنه‌های فرونشستی و محدوده ۲ کیلومتری آنها،
- افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی با رویکرد یکپارچه‌سازی اراضی، جایگزینی کشت روباز با کشت‌های گلخانه‌ای، تراکم کشت و کاهش تلفات تبخیر، جلوگیری از کشت محصولات آب‌بر در مناطق بحرانی و اجرای سامانه‌های آبیاری نوین.

ب) حفظ و تغذیه منابع آب زیرزمینی

- توسعه دفع بهداشتی فاضلاب شهری و روستایی از طریق شبکه‌های عمومی و تزریق آب تصفیه شده پساب‌ها و فاضلاب‌ها به آبخوان (از طریق مسیل‌ها و آبراهه‌ها نه کانال‌های غیرقابل نفوذ) و عدم انتقال آن به سایر مناطق و صنایع،
- حفر چاه‌های جذبی و یا گودال‌های نفوذپذیر تجمع آب، نفوذپذیر ساختن سطوح شهری، حفظ و گسترش جوی باغچه‌ها و اجرای نوار جاذب آب با هدف تزریق آب‌های سطحی به آبخوان‌ها در محدوده‌های شهری به‌ویژه در گستره‌های فرونشستی،
- تشدید نظارت بر اجرای بند «۴۲» از الزامات ۵۸ گانه ذیل پروانه‌های ساختمانی در خصوص لزوم تفکیک سیستم دفع آب باران از فاضلاب و لحاظ آن در پروانه ساختمانی،
- جلوگیری از برداشت شن و ماسه در مناطق بالادست و در داخل محدوده فرونشست به علت اثر منفی این برداشت‌ها در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی،
- احیا و ساماندهی رودخانه‌ها و مسیل‌ها به صورت مستمر،
- احیا، مرمت، لایروبی قنوات و صیانت از آنها با هدف کاهش ریسک فروریزش زمین در اثر شکل‌گیری حفرات و تونل‌های بزرگ در زیر سطح در اثر آب شستگی‌های فصلی،
- جلوگیری از انسداد مسیر قنوات و رگاب‌های زیرسطحی در حفاری‌های زیرسطحی و گودبرداری‌ها و ادامه یافتن جریان آب زیرسطحی با روش‌های مهندسی،
- ممنوعیت احداث سد و هرگونه تأسیسات مانع جریان آزاد آب در آبراهه‌ها و مسیرهای منتهی به پهنه‌های فرونشستی و رهاسازی مستمر

جریان آب در سدهای موجود در بالادست پهنه‌های فرونشستی با هدف تغذیه آبخوان‌های پایین دست.

۷-۳. اقدامات و راهبردهای حوزه کاهش اثرات فرونشست بر مستحذات و زیرساخت‌ها

الف) بررسی و پایش اثرات فرونشست بر زیرساخت‌ها و دارایی‌ها

- انجام بررسی‌های دقیق ژئوتکنیکی، ژئوفیزیکی و آب‌زمین‌شناختی به منظور تهیه و به‌روزرسانی دوره‌ای نقشه‌های پهنه‌بندی خطر فرونشست،

- حفر گمانه‌های بیشتر و عمیق در نزدیکی شکاف‌ها و ترک‌ها برای انجام مطالعات ژئوتکنیکی و تعیین دقیق رفتار لایه‌های تحکیم پذیر ضمن توجه به مسئله تحکیم ثانویه در خاک‌های رسی،

- ایجاد ایستگاه‌های موقعیت‌یاب جهانی GPS در نواحی حساس و استراتژیک منطقه و پایش ماهانه میزان فرونشست در این مناطق و مقایسه نتایج حاصله با نتایج تداخل سنجی راداری،

- پایش سازه‌های خطی مهم و بررسی تغییرات در این سازه در جهت شناخت تأثیرات فرونشست و جلوگیری از ورود آسیب به این سازه‌ها،

- برآورد اثر فرونشست و ترک‌ها و شکاف‌های ناشی از آن بر سازه‌ها و شریان‌های حیاتی در محدوده فرونشست.

ب) کاهش در معرض قرارگیری المان‌های آسیب‌پذیر در برابر فرونشست در طرح‌های آتی

- لحاظ کردن خطر فرونشست زمین در تهیه نقشه‌های طرح‌های تفصیلی و طرح جامع شهرهای واقع در پهنه‌های فرونشستی و یاد در مجاورت آن،

- تدوین و تصویب مقررات ملی فرونشست زمین،

- تدوین برنامه جامع فرونشست زمین در برنامه‌های توسعه کشور و افزایش هماهنگی میان دستگاه‌ها و استقرار نظام جامع مدیریت بحران،

- ممنوعیت احداث ساختمان‌های بلند مرتبه و ساختمان‌های با اهمیت بسیار بالا در پهنه‌های با خطر بالای فرونشست و الزام به مطالعات ویژه فرونشست زمین و بررسی پتانسیل فرسایش تونلی، حفرات زیر سطحی و احتمال فروریزش زمین در سایر پهنه‌ها،

- ممنوعیت عبور شریان‌های حیاتی از پهنه‌های فرونشست و ساخت سازه‌های مهم و استراتژیک در محلی به دور از محدوده فرونشست،

- طراحی خطوط ریلی و فرودگاه‌ها در مقابل فرونشست تجمعی و گرادیان آن و پایدارسازی خطوط ریلی و فرودگاه‌های واقع در پهنه‌های فرونشست،

- طراحی پی‌های نواری دو طرفه (در صورت عدم توصیه به طراحی پی گسترده با صلبیت کافی) و پرهیز از به کارگیری پی‌های منفرد با شناژ در نواحی با خطر بالای فرونشست،

- صرف نظر از به کارگیری سیستم صرفاً قاب خمشی تا جای ممکن و استفاده از سیستم‌های ترکیبی با دیوارهای باربر و افزایش تعداد ستون‌ها جهت افزایش صلبیت،

- استفاده از دیوارهای حائل محیطی در ساختمان‌های دارای طبقات زیرزمین یا یک طبقه مدفون جهت افزایش صلبیت سازه،

- سبک‌سازی سازه و تعبیه درز انقطاع با فواصل مناسب جهت امکان جابه‌جایی هر یک از بخش‌های ساختمان‌های با پلان بزرگ،

- الزام به اجرای تدابیر تاب‌آوری در برابر فرونشست در صورت اجتناب ناپذیر بودن عبور شریان‌های حیاتی از پهنه‌های فرونشست.

ج) کاهش آسیب‌پذیری المان‌های واقع در معرض خطر فرونشست زمین

- پایش پی سازه‌های مهم شریان‌های حیاتی در پیرامون و داخل محدوده فرونشست تا زمان کنترل این پدیده در جهت کاهش مخاطرات ناشی از تغییرات ناگهانی و تخریب شریان‌های حیاتی،

- جلوگیری از فروریزش زمین در مسیر المان‌های حمل و نقل و شریان‌های حیاتی و سایر مستحذات،

- جلوگیری از توسعه فیشره‌های فرونشستی با تمهیدات مهندسی به منظور جلوگیری از فروریزش زمین،



- پایدارسازی قنوات در برابر فروریزش زمین،

- اصلاح روش‌های آبیاری غیراصولی فضا‌های سبز شهری به‌ویژه در محدوده‌های فرونشستی و پهنه‌های با خاک‌های سست که موجب تشدید نشست نامتقارن می‌شود،

- اتخاذ تدابیر لازم جلوگیری از تشدید مخاطرات ژئوتکنیکی ضمن شناسایی خاک‌های مسئله‌دار از جمله خاک‌های واگرا، رمبنده و حساس به آب شستگی.

۴-۷. روش‌های اجرایی حفاظت از زیرساخت‌ها در مقابل فرونشست

اگرچه تلاش اصلی باید بر مدیریت مصرف و احیای سفره‌های آب زیرزمینی باشد اما مقاوم‌سازی به‌عنوان یک روش علاج بخش میان‌مدت باید در دستور کار قرار گیرد، به‌بیان دیگر با ایجاد تغییراتی در ساختار خاک یا طراحی زیرساخت‌ها از آسیب و خرابی زیرساخت‌ها جلوگیری شود. این دسته از راهکارها شامل همان روش‌های بهسازی زمین به‌وسیله تغییر در خصوصیات و جنس خاک (با مخلوط کردن مصالح مناسب - اختلاط عمیق و تراکم سطحی یا استفاده از مواد افزودنی) و یا اضافه کردن المان‌های غیرخاکی به خاک (مانند تزریق با فشار بالا، یا ژئوسنتتیک‌ها،^۱ ستون‌های شنی، شمع‌های عمیق و ریز شمع‌ها، انکراژ^۲ یا میخکوبی، ژئوفوم^۳) می‌باشد. همچنین در برخی از راهکارها، تغییر در روند طراحی سازه براساس فرونشست یا اضافه کردن المان‌های تقویتی پیشنهاد می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های بهسازی خاک عبارت‌اند از روش تزریق، روش میکروپایل،^۴ روش شمع‌گذاری، روش نیلینگ،^۵ بهسازی به کمک ژئوگرید^۶ و ژئوتکستایل،^۷ بهسازی با هدایت و تزریق آب‌های سطحی به داخل زمین و بهسازی پی زیرساخت‌ها و ساختمان‌های در معرض فرونشست. برخی روش‌های پیشنهادی و اقدامات جهانی در مقابله با اثرات فرونشست بر زیرساخت‌ها در ادامه ارائه شده است.

1. Geosynthetics
2. Anchorage
3. Geofoam
4. Micropile
5. Nailing
6. Geogrid
7. Geotextile

جدول ۶. روش‌های مقابله با اثرات فرونشست بر زیرساخت‌ها در جهان [۷] [۳۱]

ردیف	روش	شرح
۱	بهسازی خاک به روش تزریق	این روش جهت افزایش ظرفیت باربری خاک، افزایش مقاومت بارگذاری جانبی شمع‌ها، جلوگیری از نشست آب و نشست در سازه به کار می‌رود. به این صورت که چاله‌هایی به فواصل معین حفر شده و درون چاله‌ها با دوغاب همراه با فشار و سرعت بالا پر می‌شود. این روش پرهزینه بوده و در مواقع خاص به کار می‌رود و به چهار دسته تزریق تراکمی، تزریق نفوذی، تزریق جت و تزریق شکست هیدرولیکی در خاک تقسیم می‌شوند.
۲	بهسازی خاک به روش میکروپایل	از پیشرفته‌ترین روش‌های بهسازی بوده که بانام روش ریز شمع نیز معروف است. در این روش، میکروپایل به عنوان یک عضو باربر اضافه شده و علاوه بر افزایش مقاومت خاک، با تزریق دوغاب سیمان خصوصیات مکانیکی خاک را اصلاح می‌کند.
۳	بهسازی خاک به روش شمع گذاری	در شرایط کمبود ظرفیت باربری خاک، باید به کمک روش شمع گذاری (درجا و پیش ساخته)، نیرو به سطوح پایین تر خاک منتقل شود؛ زیرا در سطوح زیرین، تراکم و اصطکاک بیشتر موجب مقاومت بیشتر خاک می‌شود و شمع گذاری بار ناشی از سازه را به خاک زیرین مقاوم تر منتقل می‌کند.
۴	بهسازی خاک به روش نیلینگ	یکی از پرکاربردترین روش بهسازی خاک در محیط شهری نیلینگ یا همان میخ کوبی در جدار دیوار است. از مزایای آن می‌توان افزایش ظرفیت باربری خاک، کاهش تغییر شکل، پایدارسازی شیب‌ها و ترانشه‌ها و شیروانی‌ها، امکان اصلاح طرح در طی اجرا، همزمانی عملیات خاکبرداری و پایدارسازی را نام برد. نیاز به نیروی کار متخصص، ایجاد آلودگی صوتی و نیاز به تجهیزات ویژه حفاری از معایب این روش است.
۵	بازرسی و نگهداری خطوط انتقال گاز	تأثیر جابه‌جایی افقی ناشی از فرونشست بر روی لوله‌ها بیشتر از جابه‌جایی قائم است. لذا نگهداری و بررسی‌های دوره‌ای برای کنترل فرونشست و اندازه‌گیری آن ضروری است. هنگام فرونشست لوله‌ها وارد تغییر شکل پلاستیک می‌شوند. اگرچه لوله‌ها کارایی خود را حفظ می‌کنند اما تأثیر نگهداری‌های دوره‌ای و کنترل دوره‌ای تنش‌های وارده بر لوله بر کاهش تغییر شکل پلاستیک باید دقیق‌تر بررسی شود.
۶	بهسازی فرونشست با انحراف مسیر آب	در نقاطی که فرونشست در اثر برداشت منابع آب زیرزمینی ایجاد شده، اجرای طرح انحراف آب می‌تواند موجب کاهش میزان استخراج آب‌های زیرزمینی و کاهش نرخ فرونشست شود.
۷	بهسازی بستر خطوط راه آهن به روش شمع گذاری	یکی از راه‌های کنترل فرونشست خطوط راه آهن، ساخت مسیر انحرافی بر روی شمع‌های بتنی در نقاط درگیر فرونشست است. در برخی مناطق زمین محل احداث خط راه آهن جوابگوی ظرفیت و بارهای مورد انتظار از سازه فوقانی و قطار نیست که در این صورت باید در صدد بهسازی وضعیت زمین (خاک زیر سازه ریلی) برآمد.
۸	بهسازی بستر خطوط راه آهن به روش تزریق	یکی از روش‌های کاهش فرونشست در خطوط ریلی، بهسازی زمین بستر به کمک تزریق مصالح و ایجاد لایه محافظ است. این روش تا حدودی می‌تواند از خسارت بیشتر جلوگیری کند که بسته به شرایط در مقایسه با خسارت‌هایی وارد شده ممکن است قابل توجیه نباشد.
۹	کاهش نشست پایه پل با تزریق آب به آبخوان	یکی از روش‌های کنترل و علاج بخشی فرونشست در پایه‌های پل، تزریق آب به آبخوان‌های نزدیک پل بوده است که برای میزان اثرگذاری این روش باید مراحل و میزان نشست پایه پل در بازه چند سال بعد از تزریق آبخوان مورد پایش قرار بگیرد.
۱۰	مقاوم سازی خطوط لوله انتقال آب یا گاز در برابر فرونشست	برای کاهش اثر فرونشست بر لوله‌ها در جابه‌جایی افقی لوله‌های باریک، حداقل نصف بالای مسیر لوله‌ها نباید پر نشود تا اجازه حرکت کوتاهی را به لوله بدهد. در لوله‌های بزرگ انتقال آب یا گاز باید در چاله خط لوله، آب ریخته شود زیرا آب باعث کاهش اصطکاک خاک و لوله خواهد شد. برای جلوگیری از آسیب رسیدن به لوله‌ها در اثر نشست زیاد در راستای قائم، باید لوله‌ها با مقداری فاصله از سطح (رواداری ۲۰.۵ الی ۵ سانتی متر) اجرا شود.



ردیف	روش	شرح
۱۱	بهسازی پی ساختمان‌ها در برابر فرونشست	در مناطق دارای فرونشست و فاقد آیین‌نامه در دسترس باید فرونشست مجاز بر مبنای بررسی محلی تعیین شود. در مناطق دارای فرونشست توصیه شده که پی منفرد به‌کار نرود و برای ابعاد بیش از ۲۰ متر از درز جدایی استفاده شود. همچنین در مناطق با احتمال شکاف از پی عمیق استفاده شود. به دلیل عدم قطعیت در میزان مصرف آب زیرزمینی و تغییرات تراز آب زیرزمینی در آینده، طراحی پی در این مناطق بر اساس ریسک توصیه شده است.
۱۲	استفاده از بتن یا مصالح متخلخل در پیاده‌روها و خیابان‌ها	به منظور هدایت نزولات جوی و جلوگیری از هدر رفت و خروج آنها از منطقه باید از مصالح با درصد تخلخل بالا مانند بتن‌های متخلخل یا آسفالت متخلخل در اجرای پیاده‌رو یا خیابان‌های شهری استفاده شود. به این ترتیب می‌توان روان آب‌های سطحی و حتی فاضلاب‌های خاکستری را جمع‌آوری و در محل‌های مورد نظر به لایه‌های زیرین خاک تزریق کرد.
۱۳	استفاده از ژئوگرید در لایه‌بندی بستر و روسازی	به منظور جلوگیری از نشست در جاده‌ها، باند فرودگاه، خطوط راه‌آهن و پی‌های گسترده و سطحی از ژئوگریدها در لایه‌بندی بستر و روسازی راه‌ها و پی‌ها استفاده می‌شود.
۱۴	تزریق و استحکام‌بخشی بستر زیرساخت‌ها	این روش تثبیت نیازی به حفاری ندارد و عملیات بهسازی را می‌توان در زمان کوتاهی انجام داد. از تزریق رزین‌های ویژه می‌توان برای بهسازی و جبران نشست در خطوط راه‌آهن، شمع‌ها، زیرساخت فرودگاه‌ها، تراز کردن سریع دال‌ها، پایه پست‌های انتقال برق، بهسازی لوله‌های زیرزمینی مدفون و غیره استفاده کرد. در روش MICP نیز از فاز باکتریایی خاک برای رسوب کلسیم در محل و استحکام بستر استفاده می‌شود.

شایان توجه است که در اکثر کشورها مقررات و ضوابط ساخت ساختمان‌ها در مناطق دارای فرونشست وجود ندارد و قوانین کنترل و مقابله با فرونشست معطوف به کنترل و حفظ تراز آب زیرزمینی است. برخی مراجع و مطالعات قبلی مرتبط با قواعد ساخت ساختمان‌ها در مناطق دارای فرونشست در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۷. نمونه قواعد ساخت ساختمان‌ها در مناطق دارای فرونشست در جهان [۳۵]

موضوع	نمونه‌ها
ساخت مسکن در مناطق دارای فرونشست معدنی (۱۹۸۱)	راهنمای NIST
راهکارهایی برای ساخت در مناطق فرونشستی	Paniagua and Rangel, 2009
مراحل طراحی ساختمان‌های جدید یا مقاوم‌سازی در مناطق دارای فرونشست	تحقیقات فاخر و همکاران (۱۴۰۱)

روشی که فاخر و همکاران (۱۴۰۱) [۳۶] برای علاج بخشی ساختمان‌های موجود در مناطق دارای فرونشست و همچنین طراحی پی ساختمان‌های جدید مبتنی بر ریسک ارائه دادند شامل ۶ مرحله اصلی می‌باشد که در جدول ۹ به صورت خلاصه بیان شده است. برای طراحی پی در مناطق دارای فرونشست پیشنهاد شده که فرونشست مجاز تا زمان تدوین آیین‌نامه مربوطه باید بر مبنای بررسی محلی تعیین شود. در طراحی و انتخاب پی در مناطق دارای فرونشست توصیه شده که پی منفرد به کار نرود. ضمن اینکه برای ابعاد بیش از ۲۰ متر از درز جدایی و در مناطق با احتمال شکاف از پی عمیق استفاده شود. باید توجه شود که عدم قطعیت‌های مختلف در متغیرهای ژئوتکنیکی وجود دارد اما مهم‌ترین متغیر نامطمئن در طراحی پی در مناطق دارای فرونشست استفاده مصرف آب زیرزمینی در یک منطقه و تغییرات تراز آب زیرزمینی در آینده است، به همین دلیل طراحی پی بر اساس ریسک توصیه شده است.

جدول ۸. شرح مختصر مراحل طراحی ساختمان مقاوم در برابر فرونشست [۳۶]

ردیف	اقدام	شرح
۱	جمع‌آوری اطلاعات	- مقدار فرونشست در منطقه تاکنون - تاریخچه پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در منطقه - مشخصات لایه‌های زمین و عمق سنگ‌بستر
۲	تهیه مدل کالیبره شده پیش‌بینی فرونشست	- تهیه مدل محاسبه فرونشست - کالیبره کردن مدل با استفاده از اطلاعات فرونشست تهیه شده - پیش‌بینی فرونشست در سال‌های آتی
۳	تهیه مدل غیر قطعی فرونشست باروش‌های قابلیت اعتماد	- تعریف هندسه مسئله فرونشست و تشکیل مدل عددی مناسب - انتخاب متغیرهای ورودی مدل عدم قطعیت - انجام آنالیز حساسیت به منظور شناسایی متغیرهای تأثیرگذار سیستم - تشکیل ماتریس محاسبات - تهیه تابع توزیع مقادیر فرونشست محاسبه شده از مدل عدم قطعیت
۴	تعیین معیارها و مبانی طراحی پی	- انتخاب نسبت نشست غیر یکنواخت سازه به فرونشست در منطقه انتخاب - اعوجاج مجاز سازه با توجه به نوع سازه و خاک - انتخاب فرونشست حداکثر مجاز در محل پروژه
۵	طراحی گزینه‌های مختلف برای پی و سازه	- پرهیز از پی منفرد در مناطق دارای فرونشست - توصیه به استفاده از پی شبکه‌ای و پی گسترده صلب - توصیه به استفاده از پی عمیق در مناطق مستعد شکاف فرونشست - توصیه به استفاده از پی گسترده به علاوه توده بهسازی شده - توصیه به استفاده از درز جدایی در سازه - تهیه گزینه‌های طرح سازه و تأسیسات و بهسازی زمین
۶	انتخاب گزینه برتر	- انتخاب گزینه‌های مختلف طراحی پی و سازه - وارد کردن گزینه‌های مختلف طراحی پی و سازه در مدل عدم قطعیت و تهیه تابع توزیع احتمالاتی فرونشست برای هر یک از گزینه‌ها - تعیین فرونشست با بیشترین احتمال وقوع برای هر یک از گزینه‌ها - تخمین خسارت سازه در هر گزینه بر مبنای مقدار فرونشست با بیشترین احتمال وقوع - محاسبه هزینه چرخه عمر گزینه‌های طراحی - ترسیم نمودار هزینه چرخه عمر بر حسب هزینه اولیه برای گزینه‌های مختلف انتخاب طرح منتخب - تکمیل طراحی گزینه منتخب

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری



گستره و ماهیت پیامدهای فیزیکی، اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی پدیده فرونشست به گونه‌ای است که برخورد با آن صرفاً از مسیر اقدامات مقطعی امکان‌پذیر نبوده و مستلزم تدوین و اجرای سیاست‌های هدفمند کاهش ریسک است؛ سیاست‌هایی که به‌طور هم‌زمان دربرگیرنده رویکردهای پیشگیرانه و اقدامات کاهنده اثرات باشد.

براساس یافته‌های این گزارش، فرونشست در کشور پیامدهایی فراتر از خسارات کالبدی متعارف داشته و علاوه بر تهدید بالقوه جان شهروندان، موجب تحمیل هزینه‌های سنگین اقتصادی، اختلال در عملکرد زیرساخت‌های حمل‌ونقل و جریان‌های حیاتی، بروز پیامدهای امنیتی-سیاسی و تشدید آسیب‌پذیری شهرها در برابر خطر زمین‌لرزه شده است. همچنین تداوم فرونشست به مرگ تدریجی آبخوان‌ها، به‌ویژه در دشت تهران و در نهایت به بحرانی شدن وضعیت تأمین آب انجامیده است. شواهد میدانی نشان می‌دهد سیل‌گیر شدن اراضی، خسارات سازه‌ای به ساختمان‌ها، جاده‌ها، بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن، سازه‌های کنترل سیلاب، شبکه‌های انتقال فاضلاب شهری، شبکه‌های توزیع برق و گاز، دکل‌های برق و نیز شکل‌گیری ترک‌ها و شکاف‌های عمیق در سطح زمین، از بارزترین نمودهای عینی این پدیده در پهنه‌های شهری کشور است.

براساس بررسی‌های انجام شده [۲۱]، فرونشست زمین تاکنون در ۱۶ شهر مرکز استان به حریم شهری نفوذ کرده و در ۱۰ شهر مرکز استان دیگر نیز روند پیشروی آن به سمت مراکز شهری همچنان ادامه دارد. ثبت نرخ بی‌سابقه ۳۱ سانتی‌متر در سال در برخی مناطق شهری تهران طی سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲، به‌روشنی بیانگر ورود این پدیده به مرحله‌ای بحرانی است. در چنین شرایطی، فرونشست زمین دیگر یک مسئله موضعی یا بخشی تلقی نمی‌شود، بلکه ماهیتی ملی یافته و مواجهه با آن مستلزم رویکردی نظام‌مند مبتنی بر سه رکن اساسی «پیش‌بینی»، «تشخیص و شناسایی» و «پایش مستمر» است. تنها از طریق انسجام نهادی، مشارکت اجتماعی و اتکا به مبانی علمی می‌توان از گسترش فرونشست کاست، از نابودی آبخوان‌ها جلوگیری کرد و زمینه را برای آمایش بهینه سرزمین فراهم ساخت.

باید تأکید کرد که مسئله فرونشست به‌طور مستقیم با الگوی آمایش سرزمین، توزیع جمعیت و نحوه مدیریت منابع و مصرف آب در کشور پیوند خورده است. از این‌رو، توزیع منطقی جمعیت، مدیریت صحیح مصرف آب و بهره‌برداری اصولی از منابع آب زیرزمینی نقشی تعیین‌کننده در مهار فرونشست زمین دارد. تحقق این هدف، مستلزم تدوین و استقرار یک برنامه جامع فرونشست زمین در چارچوب برنامه‌های توسعه کشور، ارتقای هماهنگی میان دستگاه‌های مسئول و استقرار یک نظام جامع و کارآمد مدیریت بحران است.

با توجه به ابعاد گسترده و چندلایه پدیده فرونشست و پیوند عمیق آن با ساختارهای کالبدی، نهادی و مدیریتی شهرها، مواجهه مؤثر با این مسئله مستلزم نگاهی فراتر از اقدامات فنی مقطعی و بخشی است. مدیریت شهری با توجه به نقش کلیدی که در حوزه آمایش سرزمین، الگوی توسعه شهری، مدیریت منابع آب، مکان‌یابی فعالیت‌ها و زیرساخت‌ها و ضوابط ساخت‌وساز دارد، مستقیماً بر شدت و گستره فرونشست اثرگذار است. از این‌رو، تدوین و اجرای مجموعه‌ای منسجم از راهکارهای سیاستی، مدیریتی و اجرایی در حوزه مدیریت شهری با تأکید بر پیشگیری، کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری شهری ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در همین راستا، در ادامه اهم راهکارها و پیشنهادات قابل طرح برای مقابله با پدیده فرونشست زمین و کاهش پیامدهای آن در چارچوب مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای ارائه می‌گردد:

- در راستای تأمین آب موردنیاز، راهکارهای مبتنی بر اصول پایداری و مدیریت یکپارچه منابع باید مورد توجه قرار گرفته و از حفر هر گونه چاه جدید در محدوده‌های شهری ممانعت جدی به عمل آید. به‌عنوان نمونه، در خصوص برداشت‌های فعلی در نواحی بحرانی از منظر فرونشست نظیر منطقه ۱۸ تهران، تجدیدنظر فوری و بازبینی در سیاست‌های بهره‌برداری ضرورت دارد.

- بنا به تاکید ماده (۴۰) قانون برنامه پنج ساله هفتم پیشرفت بر تعیین تکلیف چاه‌های غیرمجاز، وزارت نیرو ظرف یک سال باید نسبت به چاه‌های غیرمجاز حفر شده برخورد جدی اتخاذ کند و گزارش شفاف پیشرفت اقدامات را به‌طور عمومی ارائه دهد. ضمن اینکه در خصوص رابطه زمانی بین نرخ فرونشست و تغییرات سطح آب چاه باید بررسی علمی به عمل آید.
- اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی باید صرفاً پس از تأیید علمی احیاپذیری خاک و آبخوان و بر مبنای شرایط ژئولوژیکی واقعی منطقه صورت گیرد تا از شکست سیاست‌ها و هدررفت منابع مالی جلوگیری شود. به این منظور، انجام مطالعات جامع با همکاری شهرداری، وزارت نیرو و مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در خصوص میزان اثرگذاری تزریق آب به سفره‌های زیرزمینی بر اساس شرایط اختصاصی هر منطقه از جمله نوع و بافت خاک، عمق آب زیرسطحی، حضور آلاینده‌ها، درجه شوری خاک و به‌ویژه امکان‌سنجی احیای هر آبخوان با توجه به این متغیرها پیش از هرگونه اقدام عملی ضرورت دارد و در صورت تأیید فنی، محل و روش تغذیه و منابع تأمین آن مشخص شود.
- چگونگی نحوه استفاده از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و لزوم بازچرخانی و استفاده مناسب با رویکرد حفظ تعادل اکولوژیک منطقه و اجتناب از نگاه توسعه‌ای به منابع حاصل از پساب برای توسعه‌های جدید باید به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرند. همچنین انجام مطالعات ژئوتکنیک در خصوص تأثیر حذف چاه‌های جذبی بر ساختار زمین و مقاومت خاک ضروری است.
- تغذیه آبخوان‌ها با پساب تصفیه‌خانه‌های شهری باید به‌صورت کنترل شده انجام شود. به‌عنوان مثال برنامه تغذیه آبخوان ورامین از پساب تصفیه‌خانه‌های تهران می‌تواند تهدیدی برای آبخوان تهران باشد و باید کنترل شده باشد. از طرف دیگر انتقال پساب در شرایطی که تصفیه‌خانه در جنوبی‌ترین نقطه شهر قرار گرفته، اقتصادی نیست و تغذیه باید در جنوب شهر انجام شود یا در شرق و غرب تهران تصفیه‌خانه‌های محلی ایجاد شود. همچنین تغذیه بخشی از شن چاله‌های شهر قدس با توجه به عمق بالای آنها که در برخی موارد به بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد به منظور بهبود مخروط افت سطح آب زیرزمینی در جنوب غرب تهران باید مورد بررسی و امکان‌سنجی قرار گیرد.
- استفاده از منابع آب حاصل از ذوب برف ارتفاعات در تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، افزایش نفوذپذیری در مسیل‌ها، به‌ویژه در مجاورت اراضی بازمانند پارک‌ها، فضاهای سبز و زمین‌های بزرگ در سایر کاربری‌ها و حفاظت مضاعف از اراضی باغی و زمین‌های باز واقع در عرصه یا مجاورت آبخوان‌ها به‌عنوان بخشی از راهبردهای کاهش نرخ فرونشست باید مورد توجه قرار گیرد.
- با توجه به قطع ارتباط طبیعی رودخانه‌ها با آبخوان‌ها به سبب کف‌سازی غلط، به‌منظور تغذیه طبیعی آبخوان‌ها لازم است بستر و دیواره رودخانه‌ها به حالت طبیعی بازگردانده شود. به‌عنوان مثال، در تهران باید از حداکثر ظرفیت رودخانه کن در غرب و سرخه حصار در شرق برای تغذیه آبخوان استفاده کرد.
- احداث چاه‌های دهانه‌گشاد سرپوشیده در نقاط مناسب شهری برای جذب رواناب‌های ناشی از بارش باران و برف باید مورد توجه قرار گیرد.
- نشست نامتقارن و آثار آن بر سازه‌های سطحی و زیرسطحی به‌ویژه بر زیرساخت‌های خطی مانند خطوط لوله انتقال و شبکه‌های ریلی باید به‌طور دقیق مورد مطالعه قرار گیرد. در مورد ساختمان‌ها، به‌دلیل گستردگی پهنه‌های فرونشست، شکاف‌های فرونشستی در بسیاری موارد می‌توانند بیشتر از نرخ فرونشست آسیب‌زا باشد.
- با وجود آنکه فرونشست حتی با نرخ پایین نیز در بازه‌های زمانی بلندمدت خسارات سنگینی ایجاد می‌کند، با توجه به اهمیت مناطق و عرصه‌های ساخته شده لازم است در ارزیابی اثرات این پدیده، تفکیک روشنی بین مناطق مسکونی و زیرساختی با اراضی کشاورزی و دشت‌ها قائل شد.
- در سیاستگذاری‌های بارگذاری جمعیتی و تصمیمات مدیریت شهری به‌ویژه در مناطق بحرانی لازم است به اثرات فرونشست در تشدید آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات طبیعی مانند زلزله و سیل نیز توجه شود.
- در راستای حفظ منابع طبیعی، صیانت حداکثری از باغات و آبخوان‌ها، جلوگیری از توسعه در مناطق بحرانی، مدیریت بهینه آب‌های سطحی، آبیاری فضای سبز صرفاً با پساب تصفیه شده و تنظیم ضوابط معماری و شهرسازی متناسب با ظرفیت منابع آب باید در قالب سیاست‌های الزام‌آور شهری به‌طور جدی پیگیری شود.



- در شهرهایی که سهم مصارف صنعت و کشاورزی پایین است از جمله کلان‌شهر تهران، تمرکز سیاست‌های مدیریت مصرف باید بر آب شرب و خدمات شهری باشد. از جمله باید برای تغییر الگوی مصرف، الزامات حداکثر دبی خروجی شیرآلات در مبحث ۱۶ مقررات ملی ساختمان، ممنوعیت آبیگری استخرهای شخصی و محدودیت کاشت و آبیاری چمن در شرایط کم‌آبی و همچنین استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های شهری برای آبیاری فضای سبز و بازنگری در نوع گیاهان و کاشت گیاهان کم‌آب‌بر باید در دستور کار قرار گیرد.

- پایش مستمر نرخ فرونشست و تغییرات سطح آبخوان‌ها و انتشار عمومی این داده‌ها در ایجاد شفافیت و آگاه‌سازی افکار عمومی و ذی‌نفعان نقش مهمی دارد. همچنین از ظرفیت دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و نهادهای تخصصی مستقل در فرایند ارزیابی، پایش و اقدامات کنترلی این پدیده باید بهره‌گیری شود. در این راستا دولت باید برای پایش ملی فرونشست، انجام مطالعات جامع‌تر و اقدامات اجرایی، ردیف‌های بودجه‌ای مشخص در قوانین بودجه سنواتی اختصاص دهد.

- نظارت مستمر و ارزیابی دوره‌ای میزان پیشرفت اقدامات اجرایی کنترل و کاهش فرونشست، همراه با ایجاد سازوکارهای بازخورد سریع برای اصلاح انحرافات احتمالی، الزام دستگاه‌های مسئول به ارائه گزارش‌های دوره‌ای از عملکرد خود براساس شاخص‌های کمی و کیفی تعیین شده و برقراری نظام پاسخ‌گویی شفاف در قبال هرگونه قصور یا کوتاهی، از اقدامات ضروری در حوزه نظارتی به شمار می‌رود.

- ضروری است عملکرد وزارت نیرو و وزارت راه و شهرسازی (مرکز تحقیقات راه، مسکن و ساختمان) در راستای اجرای بندهای «پ» و «ض» ماده (۱۴) قانون مدیریت بحران در خصوص بحران آب و فرونشست مورد ارزیابی و آسیب‌شناسی قرار گیرد.

- پیشنهاد می‌شود با بررسی درس‌آموخته‌های جهانی و بهره‌گیری از تجارب کلان‌شهرهایی که با بحران آب و فرونشست مواجه بوده‌اند، از جمله کیپ‌تاون (آفریقای جنوبی)، پرت (استرالیا)، بارسلونا (اسپانیا)، سانتیاگو (شیلی) و کالیفرنیا (ایالات متحده)، مؤثرترین اقدامات برای پیشگیری و کنترل و کاهش اثرات فرونشست در پهنه شهری در مهار فرونشست شهری شناسایی و بومی‌سازی شود.

۹. پیوست



برخی روش‌های پیشنهادی اقدام‌های جهانی در مقابله با اثرات فرونشست در مناطق شهری در این بخش ارائه شده است. این اقدام‌ها در سه حوزه مدیریت آب‌های زیرزمینی، مداخلات خاک و مداخلات ساختمانی طبقه‌بندی شده‌اند.

جدول ۹. اقدام‌های ساختاری (فنی) برای کاهش فرونشست و پیامدهای فیزیکی آن در مناطق شهری [۳]

حوزه	اقدام‌ها	اصطلاحات جایگزین	شرح
مدیریت آب (زیرزمینی)	تغذیه آبخوان (پخش سطحی و ترانشه‌ها)	تغذیه برنامه‌ریزی شده، تغذیه القایی، تغذیه مصنوعی	آب روی سطح زمین پخش یا نگهداری می‌شود تا از طریق خاک‌های نفوذپذیر (شن یا ماسه) به یک آبخوان آزاد نفوذ کند. همچنین می‌توان از ترانشه‌ها برای جمع‌آوری رواناب و نفوذ آن به خاک استفاده کرد.
	بخش‌بندی		مناطق وسیع پلدر به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شوند که این تقسیم‌بندی توسط دیواره‌های عمودی آب‌بند، معمولاً از جنس دیوارهای حائل یا دیوارهای رسی، انجام می‌شود. این دیواره‌ها یک مانع هیدرولیکی در زیرسطح ایجاد می‌کنند تا سطح آب زیرزمینی در هر بخش به‌صورت پایدار حفظ شود.
	شبکه فاضلاب نشت‌دهنده	ترانشه نشت‌دهنده، لوله سورخ‌دار، جمع‌کننده آب تمیز، لوله نشت‌دهنده	لوله‌های سورخ‌دار (معمولاً از جنس PVC یا وینیل) آب اضافی سطحی یا رواناب را در حین انتقال، به خاک اطراف بازتوزیع می‌کنند. اگر سطح آب زیرزمینی اطراف لوله بالاتر از سطح آب داخل لوله باشد، سامانه مشابه یک فاضلاب معمولی عمل می‌کند. آب ناودان‌های سقف می‌تواند به جای ورود به فاضلاب، به این سامانه هدایت شود. شبکه‌های نشت‌دهنده می‌توانند به حوضچه‌های نگهدارنده و چاه‌های نفوذی متصل شوند و در صورت نیاز به انتقال آب از تراز پایین به بالاتر، پمپ مکانیکی برای گردش آب به‌کار می‌رود.
	چاه تزریقی	چاه تغذیه، تزریق مصنوعی سیال، چاه عمیق	در این روش، آبخوان‌های محصور عمیق با تزریق سیال از طریق چاه به درون سازندهای زمین‌شناسی متخلخل (ماسه، شن یا رس) مجدداً تحت فشار قرار می‌گیرند. لوله تزریق معمولاً درون غلاف پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه قرار می‌گیرد. چاه با دوغاب سیمان، ماسه، توری چاه و لایه شن محافظ تکمیل می‌شود.
	چاه نفوذی	حفره بیوپور	آب سطحی اضافی در هنگام بارندگی در یک لوله پلاستیکی سورخ‌دار با قطر معمولاً ۱۰ سانتی‌متر جمع‌آوری می‌شود و در خاک‌های فشرده با نفوذپذیری کم بازتوزیع می‌شود. چاه‌های نفوذی می‌توانند به شبکه فاضلاب نشت‌دهنده متصل شوند و همچنین با مواد آلی پر شوند تا حاصل‌خیزی خاک بهبود یابد.
	حوضچه نگهداری	حوضه آبریز / حوضه، آبگیر / حوضچه سیلابی، جمع‌آوری آب باران، بانک آب	یک حوضه آبریز دائمی مناسب برای مناطق شهری است که ظرفیت ذخیره آب را افزایش داده و رواناب سطحی را در زمان بارندگی تعدیل می‌کند. با قرار دادن مصالح زهکش درشت‌دانه در کف حوضچه، آب به خاک اطراف نفوذ کرده و سطح مطلوب آب زیرزمینی حفظ می‌شود.



حوزه	اقدام‌ها	اصطلاحات جایگزین	شرح
بهسازی خاک	تسریع در تحکیم خاک		زهکش‌های عمودی، لوله‌های ماسه و ترانشه‌ها تا عمق ۳۵ متر قرار می‌گیرند تا آب منفذی اضافی سریعتر از خاک‌های نرم یا آلی تخلیه شده و در نتیجه تحکیم خاک را تسریع بخشند. همچنین می‌توان با کاهش فشار هوا درون زهکش‌ها، فشار خلا ایجاد و بار اضافی به خاک اعمال کرد. این روش معمولاً پیش از احداث سازه‌ها به‌کار می‌رود.
	تراکم دینامیکی خاک		وزنه فولادی سنگین به‌طور مکرر بر سطح زمین رها می‌شود تا ارتعاشات ایجاد شده باعث بهبود و متراکم شدن خاک و مصالح پرکننده در زیرسطح شود. این روش عمدتاً برای بهسازی خاک زیر پی‌ها پیش از ساخت سازه‌ها استفاده می‌شود و وزنه‌ها طبق یک الگوی شبکه‌ای مشخص رها می‌شوند.
	اختلاط مکانیکی خاک	اختلاط عمیق خاک	خاک طبیعی با سیمان یا مواد چسباننده ترکیبی مخلوط می‌شود تا خواص مکانیکی و فیزیکی آن بهبود یابد. این فرایند می‌تواند در شرایط مرطوب یا خشک انجام شود که انتخاب آن به نوع خاک و ویژگی‌های موردنظر بستگی دارد.
	تزریق خاک	پر کردن حفرات، پایدارسازی بستر	مواد افزودنی از طریق یک یا چند لوله که به‌صورت عمودی در زمین نصب شده‌اند، به زیرسطح تزریق می‌شوند و در نتیجه مقاومت، ظرفیت باربری و پایداری خاک‌های نرم را بهبود می‌بخشند. مواد طبیعی مانند شن، خاکستر بادی یا پودر سنگ بیشتر برای خاک‌های نرم استفاده می‌شوند. بتن ضایعاتی خرد شده، خرده لاستیک تایر، آهک هیدراته، رزین‌ها و پلیمرها با موفقیت در خاک‌های رسی آزمایش شده‌اند. تزریق جت سیمان پرتلند یا دوغاب‌ها و فوم‌های شیمیایی بیشتر زمانی استفاده می‌شوند که حفره‌هایی در زمین تشکیل می‌شوند. مواد افزودنی از طریق یک یا چند لوله عمودی به زیرسطح تزریق می‌شوند تا مقاومت، ظرفیت باربری و پایداری خاک‌های نرم افزایش یابد. معمولاً از مصالح طبیعی مانند ماسه، خاکستر بادی یا پودر سنگ استفاده می‌شود. در خاک‌های رسی، موادی مانند بتن خرد شده بازیافتی، خرده لاستیک تایر، آهک هیدراته، رزین‌ها و پلیمرها نیز به‌کار رفته‌اند. تزریق پرفشار سیمان پرتلند یا دوغاب‌های شیمیایی و فومی بیشتر زمانی استفاده می‌شوند که حفره‌هایی در زمین تشکیل شوند.

حوزه	اقدام‌ها	اصطلاحات جایگزین	شرح
بهبود ساخت‌وساز	بالا آوردن ساختمان	بالابر سازه، بالا بردن یا بلند کردن خانه	یک سازه از روی فونداسیون موجود خود بلند می‌شود تا یک فونداسیون جدید در سطح بالاتر یا مشابه ساخته شود.
	بالا آوردن زیرساخت‌های خطی	خاک‌ریز ماسه‌ای	سطح راه‌ها و خطوط ریلی با افزودن یک لایه جدید مصالح (معمولاً ماسه یا مصالح راه‌سازی) روی لایه‌های نشست‌کرده بالا آورده می‌شود. در مورد پل‌ها، معمولاً پی‌های جدید و عمیق برای بالا بردن کوله‌ها احداث می‌شود.
	اتصالات انعطاف‌پذیر به زیرساخت‌های مدفون	اتصالات انعطاف‌پذیر	از مواد کامپوزیتی ترموپلاستیک یا اتصالات انعطاف‌پذیر برای اتصال اجزای زیرساخت‌های مدفون مانند لوله‌ها استفاده می‌شود تا امکان جابه‌جایی نسبی فراهم شده و انعطاف‌پذیری افزایش یابد.
	خانه‌های شناور و آبی-خاکی		ساختمان‌ها بر روی پهنه‌های آبی ساخته می‌شوند و دارای سامانه شناوری در پایه هستند تا امکان شناور شدن آنها روی آب فراهم شود.
	بهسازی پی‌ها	تقویت، جایگزینی، تعمیر، بازسازی یا بهبود پی‌ها	روش‌های متعددی برای ترمیم، تقویت یا جایگزینی پی‌ها برای بازیابی ظرفیت سازه‌ای وجود دارد، از جمله: تزریق زیر دال (Slab jacking): روشی برای تراز مجدد دال‌های نشست کرده که با حفاری سوراخ‌های کوچک و تزریق مخلوط‌های سیمانی، رزینی پلیمری، ماسه، شن، خاکستر یا فوم پلی‌یورتان انجام می‌شود. زیرسازی پی (Underpinning یا Piering): سامانه‌ای از المان‌های باربر عمقی برای انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر خاک با خواص ژئومکانیکی بهتر نصب می‌شود. این روش می‌تواند برای تقویت فونداسیون موجود یا برای بهبود خاک قبل از قرار دادن یک سیستم فونداسیون جدید استفاده شود. برای دستیابی به این هدف، می‌توان از تکنیک‌های مختلفی استفاده کرد. شامل زیرسازی با بتن حجیم (اجرای مرحله‌ای حفاری و بتن‌ریزی)، زیرسازی با تیر سوزنی طره‌ای، زیرسازی با شمع و تیر (با پایه‌های مارپیچی یا فشاری)، زیرسازی با میکروپایل و زیرسازی با شمع کوبیده شده. کاهش تجزیه باکتریایی شمع‌های چوبی: پوشش‌دهی شمع‌ها برای جلوگیری از تخریب در شرایط بی‌هوازی پیش‌بینی نشده. کاهش اصطکاک منفی اطراف شمع‌ها: استفاده از پوشش‌های ضد اصطکاک، بهسازی خاک با تزریق یا به‌کارگیری شمع‌های باریک‌تر برای کاهش نیروی کششی منفی. ژئوتکستایل‌های مسلح: قرارگیری ژئوتکستایل بر روی سامانه شمع‌ها برای افزایش ظرفیت باربری به‌ویژه در راه‌ها و خطوط ریلی.
	مصالح ساختمانی سبک		مصالح سبک به سیمان افزوده می‌شوند تا بار سازه‌ای کاهش یابد. از جمله این مصالح می‌توان به پوکه معدنی، اسکوریا، خاکستر آتشفشانی، توف، دیاتومیت، رس منبسط شده، شیل، اسلیت، پرلیت، ابسیدین و ورمیکولیت اشاره کرد. در راه‌سازی نیز ژئوفوم‌ها، ژئوکامب‌ها، پلی‌استایرن منبسط شده (EPS) قالبی و پلاستیک بازیافتی استفاده می‌شود.



حوزه	اقدام‌ها	اصطلاحات جایگزین	شرح
	روسازی نفوذپذیر	کفسازی نفوذپذیر یا آسفالت متخلخل	روسازی متخلخل از مصالح نفوذپذیر بتنی یا پلیمری، بتن یا آسفالت ساخته می‌شود که امکان عبور و نفوذ تدریجی آب باران به خاک را فراهم می‌کند. این روش حجم و دبی اوج رواناب را کاهش داده و بیشتر در پارکینگ‌ها، پیاده‌روها و معابر کم‌تردد استفاده می‌شود.
	ترمیم ترک‌ها		برای ترمیم ترک‌های ایجاد شده در نماهای ساختمانی یا روسازی راه‌ها از مواد فومی و رزینی مختلف استفاده می‌شود. مصالح پرکننده شامل سیمان الیافی، رزین اپوکسی، دوغاب‌های ضد انقباض، لاستیک داغ و آسفالت پلیمری است.
	جابه‌جایی سازه		ساختمان‌ها از محل اصلی خود به‌صورت فیزیکی به محل دیگری منتقل می‌شوند. این کار را می‌توان با جداسازی و موتناژ مجدد سازه یا با حمل کل آن به محل جدید انجام داد. این روش به‌ویژه برای سازه‌های عظیم استفاده می‌شود. ساختمان‌ها به‌صورت فیزیکی از محل اولیه به مکان دیگری منتقل می‌شوند. این کار می‌تواند از طریق جداسازی و موتناژ مجدد یا انتقال یکپارچه سازه انجام شود و معمولاً برای بناهای یادبود کاربرد دارد.

منابع و مأخذ

- [1] M. e. a. Bagheri-Gavkosh, "Land subsidence: A global challenge, 778, p.146193," Science of The Total Environment, 2021.
- [2] Andreas H. et al., "Insight look the subsidence impact to infrastructures in Jakarta and Semarang area; Key for adaptation and mitigation," In MATEC Web of Conferences, vol. 147, p. 08001. EDP Sciences, 2018.
- [3] Nappo, N., & Korff, M., Applicability and effectiveness of structural measures for subsidence (risk) reduction in urban areas, Natural Hazards and Earth System Sciences, 25(6), 1811-1839, 2025.
- [۴] اظهار نظر کارشناسی درباره: طرح کنترل فرونشست زمین و کاهش اثرات آن در کشور، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۴۰۴، ۲۱۲۲۳.
- [۵] گزارش نظارتی وضعیت فرونشست شهر تهران (تقابل خطوط قرمز تأمین آب و تاب‌آوری شهر تهران)، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۴۰۴، ۲۰۹۵۴.
- [۶] اظهار نظر کارشناسی درباره: لایحه کنترل فرونشست زمین و کاهش اثرات آن در کشور (طرح شورای عالی استان‌ها)، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۴۰۲، ۱۹۴۲۶.
- [۷] تأثیر فرونشست بر زیرساخت‌ها و راهکارهای کنترل این اثرات، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۴۰۱، ۱۸۶۲۰.
- [۸] فرونشست زمین، سرطان خاموش دشت‌ها و شهرهای ایران (دسترسی محدود)، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، شماره مسلسل ۱۴۰۱، ۲۵۰۱۸۴۷۹.

- [۹] رحمانی، ح. نقش منابع آب زیرزمینی در مدیریت فرونشست، دفتر توسعه نظام‌های فنی و بهره‌برداری و دیسپاچینگ برقایی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۳.
- [10] Sharma, A. et al., "Approaches to water sensitive urban design: potential, design, ecological health, urban greening, economics, policies, and community perceptions," Woodhead Publishing, 2018.
- [11] Fletcher, T. D., et al., "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage," Urban water journal, 12(7), 525-542, 2015.
- [۱۲] محبوبه نوری و همکاران، تحلیل کتاب‌سنجی و مرور ادبیات شهر اسفنجی به عنوان مفهومی نوظهور در مدیریت پایدار آب شهری، دانش شهرسازی، ۸(۲)، ۳۶-۱۷، ۱۴۰۲.
- [13] Sato, C. et al., Land Subsidence and Ground Water Management in Tokyo, International Review for Environmental Strategies, 6(2), 403-424, 2006.
- [14] Mayuga, M.N. and Allen, D.R., Subsidence in the Wilmington Oil Field, Long Beach, California, USA, Proceedings of Tokyo Symposium on Land Subsidence, Vol 1, 66-79, 1969.
- [۱۵] مجرب، م. فرونشست زمین و بحران آب؛ درس‌های جهانی و چشم‌انداز ایران، مهندسين مشاور بنیان زمین، ۱۴۰۴.
- [16] He, X. X. et al., Land Subsidence Control Zone and Policy for the Environmental Protection of Shanghai, International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(15), 2729, 2019.
- [17] Hasibuan H. S., et al., Policymaking and the spatial characteristics of land subsidence in North Jakarta, City and Environment Interactions, 18, 100103, 2023.
- [۱۸] سرباز، ح. و آقامیری، م. سیاست‌گذاری و مدیریت فرابخشی حل معضل پدیده فرونشست در ایران، فصل‌نامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۲(۹)، ۱۴۷-۱۰۶، ۱۴۰۲.
- [۱۹] بیت‌الهی، ع. حوضه‌های آبریز در جه ۳ (محدوده‌های مطالعاتی) دارای پهنه‌های فرونشستی زمین، بخش زلزله‌شناسی و خطرپذیری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۴.
- [۲۰] وضعیت فرونشست زمین در کشور و راهکارهای مواجهه با آن، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۴۰۴.
- [۲۱] گزارش جامع پهنه‌های فرونشست زمین در ایران بر مبنای پردازش تصاویر راداری و اعتبارسنجی شده با داده‌های ژئودتیکی (در بازه زمانی ۱۴۰۳-۱۳۹۵)، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۴۰۳.
- [۲۲] گزارش افزایش بی‌سابقه نرخ فرونشست شهر تهران، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۴۰۳.
- [۲۳] پایش اثرات فرونشست بر زیرساخت‌های اساسی شهر تهران بر مبنای مشاهدات تداخل سنجی و راداری و ژئودتیکی، سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران، ۱۴۰۳.
- [۲۴] بیت‌الهی، ع. فرصت کوتاه برای نجات پایتخت از فرونشست، بخش زلزله‌شناسی و خطرپذیری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۴.
- [۲۵] بیت‌الهی، ع. افزایش سه برابری نرخ فرونشست زمین در منطقه ۱۸ در دو سال اخیر، بخش زلزله‌شناسی و خطرپذیری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۴.
- [۲۶] بحران فرونشست در کلان‌شهر تهران، شورای اسلامی شهر تهران، ۱۴۰۳.
- [۲۷] کلویانی‌راد، م. فرونشست تهران: زمینه‌ها و سازوکارها، پژوهشکده مطالعات راهبردی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، ۱۳۹۸.
- [۲۸] تهران در آستانه تشنگی؛ راهکارهای عبور از تنش آبی چیست؟، خبرگزاری مهر، mehrnews.com/x37DZc1404.
- [۲۹] طباطبایی، م. بحران فرونشست؛ راهکارهای برون رفت مبنی بر سند آمایش سرزمین، انجمن علمی اقتصاد شهری ایران، ۱۴۰۰.
- [۳۰] کریمی، ن. استفاده از قابلیت‌های فناوری سنجش از دور به منظور پایش فرونشست دشت‌های کشور، مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، ۱۴۰۳.

- [۳۱] صیاف، ه. فرونشست و راهکارهای مقابله با آن، به درخواست مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۲.
- [۳۲] بیت‌اللهی، ع. مفاهیم پایه در تدوین مقررات ملی فرونشست زمین، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۳.
- [۳۳] مطالعات موردی بر روی نواحی با خطر بالای فرونشست در استان اصفهان، اداره کل بنیاد مسکن انقلاب اسلامی استان اصفهان، ۱۴۰۰.
- [۳۴] خامه‌چیان، م. فرونشست در ایران، چالش‌ها و راهکارها، نشست تخصصی بررسی روش‌های ارزیابی خطر فرونشست زمین و راهکاری مقابله با آن، پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۴۰۳.
- [۳۵] گزارش تحلیل تجارب از تدوین ضوابط ساخت ساختمان در مناطق دارای فرونشست (گزارش شماره ۱)، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۳.
- [۳۶] فاخر، ع. و همکاران، مراحل طراحی ساختمان‌های جدید یا مقاوم‌سازی در مناطق دارای فرونشست، سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران ایران، تهران، ۱۴۰۱.
- [37] Erkens, G., et al., "Sinking coastal cities," Proc. IAHS, 372, 189–198, 2015.

عنوان: ملاحظات مدیریت شهری و توسعه منطقه‌ای در مواجهه با پدیده فرونشست



DOI: [10.22034/mrc.report.21653](https://doi.org/10.22034/mrc.report.21653)

[Permanent Link:](#)

Publisher : Islamic Parliament Research Center of Iran

گزیده سیاستی

فرونشست زمین نتیجه ناپایداری در مدیریت منابع آب و الگوی توسعه سرزمین است که کنترل آن مستلزم رویکردی یکپارچه در مدیریت شهری و منطقه‌ای با تأکید بر پایش مستمر، حفاظت از آب‌های زیرزمینی و کاهش اثرات فرونشست بر مستحقات به‌عنوان محورهای اصلی سیاستی است.



مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

تهران، خیابان پاسداران، روبروی پارک نیاوران (ضلع جنوبی، پلاک ۸۰۲)

تلفن: ۷۵۱۸۳۰۰۰ صندوق پستی: ۵۸۵۵-۱۵۸۷۵ پست الکترونیک: mrc@majles.ir

وبسایت: rc.majles.ir