مرکز پژوهش‌های
مجلس شورای اسلامی

گروه عمران و شهرسازی

مشخصات گزارش:

تهیه و تدوین کنندگان:
مهسا پایاب
هیوا صیاف

ناظر علمی:
علیرضا رهایی

شماره مسلسل:
۲۵۰۱۸۶۲۰

تاریخ انتشار:
۱۴۰۱/۱۰/۱۲

دفتر مطالعات زیربنایی

# «تأثیر فرونشست بر زیرساخت‌ها و راهکارهای کنترل این اثرات»

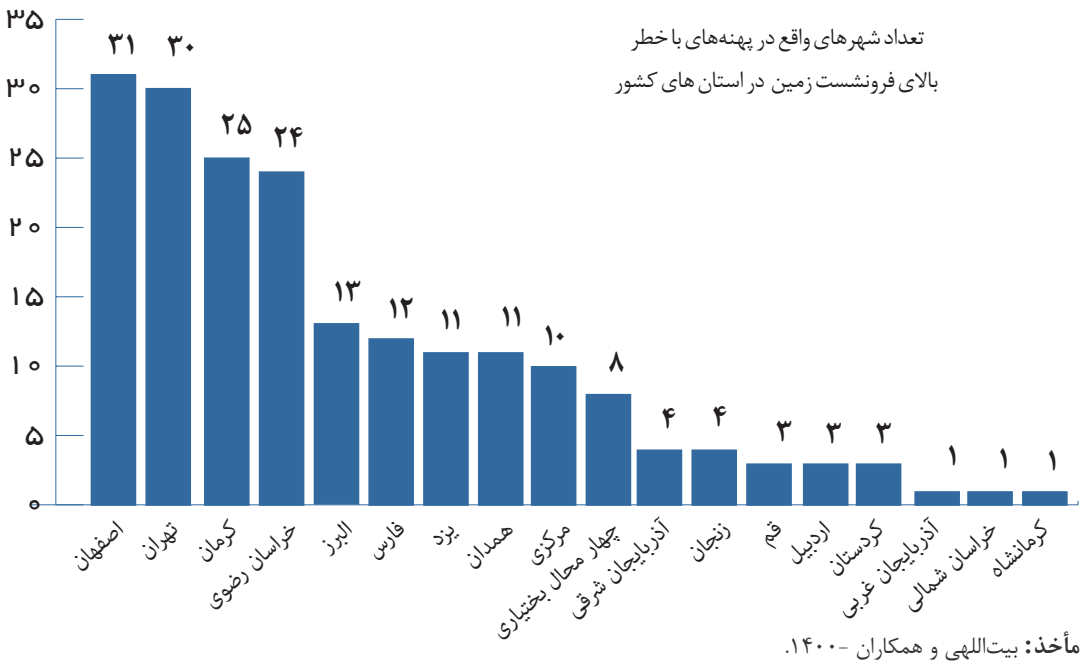
## مقدمه

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 شریان‌های حیاتی شامل خطوط حمل‌ونقل (مترو، جاده، راه‌آهن)، خطوط انتقال برق و مخابرات، شبکه فاضلاب، لوله‌های آب و گاز و نفت، کانال‌های دفع آب‌های سطحی، سازه‌های زیرزمینی (تونل و خطوط مترو)، پایه پل‌ها و شمع‌های مدفون در خاک و توسعه شکاف‌های زمین، شکست زمین یا گسیختگی آن اشاره کرد. از طرفی وقوع فرونشست آثار غیرمستقیم اقتصادی نیز به‌جای می‌گذارد. افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری زیرساخت‌ها، کاهش ارزش زمین و اموال، رها کردن ساختمان‌ها و اماکن، اختلال در فعالیت‌های اقتصادی، توقف کسب‌وکار به‌دلیل آسیب به ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، از دســـت دادن نیروی کار مولد با تلفات و صدمات و هزینه‌های تحمیل‌شده برای امدادرسانی ازجمله 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 قابل‌دستیابی نیستند و لذا باید راهکارهای طراحی و تعمیر و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد.

## ۱. وضعیت فرونشست و آسیب به زیرساخت‌ها در ایران و جهان

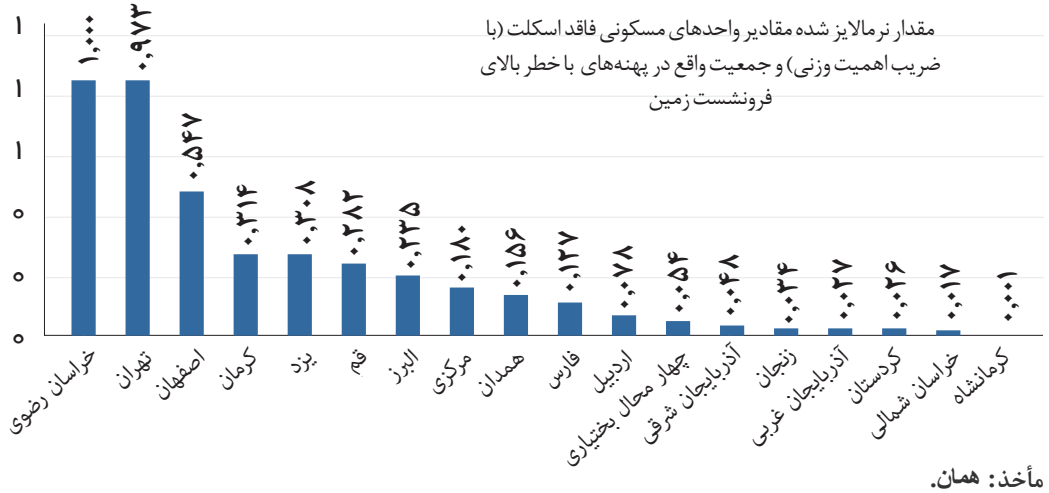
نتیجه تحقیقات نشان می‌دهد که استان‌های اصفهان، تهران، کرمان و خراسان رضوی در معرض خطر شدید فرونشست قرار دادند (شکل ۱ و ۲). در اصفهان حدود ۱۰ هزار کیلومترمربع شامل ۳۰۳۰۰ واحد مسکونی، به‌طور ویژه پالایشگاه نیروگاه برق شهید منتظری، ورزشگاه نقش جهان، فرودگاه بین‌المللی شهید بهشتی، پست‌های خطوط انتقال نیرو فشارقوی، شهرک صنعتی محمودآباد، خطوط انتقال سوخت به فرودگاه نائین و سگزی، خطوط قطار شهری به‌ویژه خط اصفهان به شاهین‌شهر، ابنیه تاریخی مانند پل روی رودخانه زاینده‌رود به‌شـــدت در معرض تهدیدهای ناشی از فرونشست هستند. فرونشست در تهران به‌صورت مستقیم زندگی ۲۳۰۰۰۰۰ نفر را تحت تأثیر قرار داده و مناطق ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ را به‌طور جدی تهدید می‌کند. از مهم‌ترین زیرساخت‌هایی که در تهران در معرض خطر فرونشست هســـتند شامل فرودگاه امام خمینی (ره)، مهرآباد و خطوط انتقال انرژی در بخش جنوب‌غرب و خطوط قطار شهری و مترو هستند. به‌صورت کلی حدود ۸ میلیون واحد مسکونی و ۲۴۰۰۰۰۰۰ نفر در کشور در معرض خطرات و آسیب‌های فرونشست قرار دارند. فرونشست در ایران ۵ تا ۷ برابر متوسط و با نرخ سالیانه ۲۵ تا ۳۰ سانتیمتر در سال (هر ۵ سال ۱ متر) فرونشست در کشور رخ می‌دهد.

**نمودار ۱. تعداد شهرهای واقع بر پهنه‌های با خطر بالای فرونشست زمین در استان‌های کشور**




**مأخذ:** بیت‌اللهی و همکاران -۱۴۰۰.

**نمودار ۲. اولویت‌بندی ریسک فرونشست زمین در استان‌های کشور (با اعمال ضریب وزنی)**




**مأخذ: همان.**

خسارت ناشـــی از فرونشســـت در چین ۱/۵ میلیارد دلار برآورد شده اســـت که حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد آن خسارت‌های غیرمستقیم بوده است. شانگهای در سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ دچار ۲ میلیارد دلار خسارت ناشی از فرونشست شده است. در بانکوک نیز براثر فرونشست خسارت‌های فراوانی به زیرساخت‌هایی مانند جاده‌ها، پیاده‌روها، زیرساخت‌های زیرزمینی و ساختمان‌های خصوصی، پایه پل‌ها و قطارهای شهری وارد شد. میزان خسارت ناشی از فرونشست در سال ۲۰۰۶ در هلند ۳/۵ میلیارد یورو در سال برآورد شده است. در آمریکا نیز حدود ۴/۳ تا ۸/۷ میلیون نفر در نواحی مرزی و ساحلی تحت تأثیر خسارات فرونشست قرار دارند که در همین راستا عملیات ویژه‌ای جهت مقابله و کنترل فرونشست در بیشتر ایالت‌های آن درحال اجراست. برخی رویکردها و اقدام‌های جهانی در مقابله با آثار فرونشست بر زیرساخت‌ها در ادامه ارائه شده است.

## ۲. راهکارهای حفاظت از زیرساخت‌ها در مقابل فرونشست

اگرچه تلاش اصلی باید بر مدیریت مصرف و احیای سفره‌های آب زیرزمینی باشـــد، اما مقاوم‌سازی به‌عنوان یک روش علاج‌بخش میان‌مدت باید در دستور کار قرار گیرد، به بیان دیگر با ایجاد تغییراتی در ساختار خاک یا طراحی زیرساخت‌ها از آسیب و خرابی زیرساخت‌ها جلوگیری نماییم. این دســـته از راهکارها شامل همان روش‌های بهسازی زمین به‌وسیله تغییر در خصوصیات و جنس خاک (با مخلوط نمودن مصالح مناسب – اختلاط عمیق و تراکم سطحی یا استفاده از مواد افزودنی) و یا اضافه نمودن المان‌های غیرخاکی به خاک (مانند تزریق با فشـــار بالا، یا ژئوسنتتیک‌ها، ستون‌های شنی، شمع‌های عمیق و ریزشمع‌ها، انکراژ یا میخکوبی، ژئوفوم) اســـت. همچنین در برخی از راهکارها، تغییر در روند طراحی سازه براساس فرونشست یا اضافه کردن المان‌های تقویتی پیشنهاد می‌شود. از مهم‌ترین روش‌های بهسازی خاک عبارتند از: روش تزریق، روش میکروپایل، روش شمع‌گذاری، روش نیلینگ، بهسازی به کمک ژئوگرید و ژئوتکستایل، بهسازی با هدایت و تزریق آب‌های سطحی به داخل زمین و بهسازی پی زیرساخت‌ها و ساختمان‌های در معرض فرونشست. در ادامه تعدادی از روش‌های پیشنهادی بیان می‌شود که در شرایط مختلف استفاده شده است.

### ۲-۱. بهسازی خاک به روش تزریق

بهسازی خاک به روش تزریق جهت افزایش ظرفیت باربری خاک، افزایش مقاومت بارگذاری جانبی شمع‌ها، جلوگیری از نشت آب و نشست در سازه به‌کار می‌رود. در این روش، ابتدا چاله‌هایی به فواصل معین حفر کرده، سپس درون چاله‌ها را با دوغاب همراه با فشار و سرعت‌بالا پر می‌کنند. در کشورهایی مانند چین با اســـتفاده از روباره تولید شده در منطقه، دوغاب تهیه و با فشار بالا به داخل گمانه تزریق می‌گردد که باعث ایجاد ستون‌های قوی می‌شود. با پر شدن فضای خالی یک لایه سخت میانی به‌وجود آمده و ناحیه ایزوله و محافظت شده ایجاد می‌شود که باعث کاهش نرخ فرونشست و حفظ زیرساخت‌های منطقه می‌گردد. این روش، پرهزینه بوده و در مواقع خاص به‌کار می‌رود و به چهار دسته تزریق تراکمی در خاک، تزریق نفوذی در خاک، تزریق جت در خاک و تزریق شکست هیدرولیکی در خاک تقسیم می‌شوند.

### ۲-۲. بهسازی خطوط انتقال گاز

در این روش، نگهداری و بررسی‌های دوره‌ای برای کنترل فرونشست و اندازه‌گیری آن پیشنهاد شده است. همچنین مقادیر آنالیز المان محدود نشان داده که هنگام فرونشست لوله‌ها وارد تغییر شکل پلاستیک می‌شوند. اگرچه لوله‌ها کارایی خود را حفظ می‌کنند، اما بررسی دقیق‌تر تأثیر نگهداری‌های دوره‌ای و کنترل دوره‌ای تنش‌های وارده بر لوله بر کاهش تغییر شکل پلاستیک آن در اثر فرونشست پیشنهاد شده است.

### ۲-۳. بهسازی فرونشست با انحراف مسیر آب

پکن کلان‌شهری است که با کمبود جدی منابع آب همراه است و سرانه منابع آبی ۱/۸ سرانه ملی چین است و دوسوم منابع آبی آن از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. به همین علت بر خلاف سایر نقاط چین که فرونشست عمدتاً در اثر استخراج معادن ایجاد شده است، برداشت منابع آب زیرزمینی از عمده دلایل فرونشست در پکن است که طی سال‌ها با یک روند افزایشی درحال توسعه بود. درنهایت با اجرای طرح انحراف آب از جنوب به شمال، میزان استخراج آب‌های زیرزمینی تغییر پیدا کرده و باعث کاهش نرخ فرونشست گردید.

### ۲-۴. استفاده از شمع برای بهسازی خطوط راه‌آهن

یکی از راه‌های کنترل فرونشست در خطوط راه‌آهن بریتانیا، ساخت یک راه انحرافی به طول ۱/۸ کیلومتر بود که بر روی شمع‌های بتنی ساخته شود. با توجه به نتایج مدل‌سازی، اثر پارامترها نیز بررسی شد. یکی از نتایج قابل توجه مدل‌سازی اثر منفی افزایش سطح آب زیرزمینی بر ناپایداری شرایط فعلی بود.

### ۲-۵. کاهش نشست پایه پل با تزریق مصالح مناسب (رزین)

براســـاس بررســـی‌های صورت گرفته، مراحل و میزان نشست پایه های پل مشخص شـــد. جهت کنترل و علاج بخشی فرونشست در پایه‌های پل از طریق تزریق آب به آبخوان‌ها پیشنهادهایی ارائه شده است.

### ۲-۶. مقاوم‌سازی خطوط لوله انتقال آب یا گاز در برابر فرونشست

برای کاهش اثر فرونشســـت بر لوله‌ها در جابه‌جایی افقی لوله‌های باریک، کافی است حداقل نصف بالای مسیر لوله‌ها پر نشود و اجازه حرکت کوتاهی را به لوله بدهد؛ اما در لوله‌های بزرگ انتقال آب یا گاز لازم است 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 ۲.۵ الی ۵ سانتیمتر) اجرا گردد.

### ۲-۷. بهسازی پی ساختمان‌ها در برابر فرونشست

فاخر و همکاران در سال ۱۴۰۰ برای حفاظت از ساختمان‌های موجود در مناطق دارای فرونشست و همچنین طراحی پی ساختمان‌های جدید روشی را مبتنی‌بر ریسک ارائه دادند. در نتایج این تحقیقات پیشنهاد شده است که در مناطق دارای فرونشست تا زمانی که آیین‌نامه‌ای برای طراحی پی در دسترس نیست باید فرونشست مجاز برمبنای بررسی محلی تعیین شود. در طراحی و انتخاب پی در مناطق دارای فرونشست توصیه شـــده 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. به‌طور کلی در متغیرهای ژئوتکنیکی عدم قطعیت‌های مختلفی وجود دارد، اما مهم‌ترین متغیر نامطمئن در طراحی پی در مناطق دارای فرونشست، میزان مصرف آب زیرزمینی در یک منطقه و تغییرات تراز آب زیرزمینی در آینده است، به همین دلیل طراحی پی براساس ریسک توصیه شده است.

اداره کل بنیاد مسکن انقلاب اسلامی استان اصفهان در سال ۱۴۰۰ مطالعات موردی بر روی نواحی با خطر بالای فرونشست در این استان انجام داده‌اند که در گزارش نهایی موارد زیر را برای طراحی و اجرای فونداسیون ساختمان به‌عنوان زیرسازه مهم‌ترین بخش ساختمان در مواجهه با پدیده فرونشست، ارائه داده‌اند.

۱ با شناسایی حوزه‌های فرونشست و تهیه نقشـــه‌های پهنه‌بندی که به‌صورت دوره‌ای به‌روزرسانی می گردند، ترجیحاً این مناطق به‌عنوان پهنه‌های ممنوعه توسعه و ساخت اعلام گردد. حتی‌الامکان در طرح‌های توسعه شهری و ملی از احداث سازه‌های مهم و دارای اهمیت بالا در مناطق با احتمال فرونشست زیاد خودداری شود.

۲ استفاده از سیستم‌های ساختمانی و با جزئیات اجرایی جهت سبک‌سازی سازه بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد.

۳ در مناطق با احتمال خطر بالای فرونشست و مشاهده سوابق این پدیده حتی‌الامکان از احداث ساختمان‌های سنگین و بلندمرتبه با تعداد طبقات زیاد اجتناب گردد.

۴ از به‌کارگیری پی‌های منفرد با شـــناژ پرهیز شـــود و از پی‌های نواری دو طرفه در کلیه مناطق بجز شهرها یا روستاهای با سابقه فرونشست که در آنها توصیه بر طراحی پی گسترده با صلبیت کافی می‌باشد، حداقل استفاده شود.

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

۶ جهت افزایش صلبیت روسازی حتی‌الامکان از به‌کارگیری سیستم صرفاً قاب خمشی در اسکلت صرفنظر شده و از سیستم‌های ترکیبی و با دیوارهای باربر استفاده شده و تعداد ستون‌ها افزایش یابد.

۷ در ساختمان‌های دارای طبقات زیرزمین حتی در صورت وجود یک طبقه مدفون، می‌توان جهت افزایش صلبیت سازه از دیوارهای حائل محیطی استفاده کرد.

۸ درز انقطاع با فواصل مناسب جهت امکان جابه‌جایی هریک از بخش‌های ساختمان‌های با پلان بزرگ تعبیه گردد.

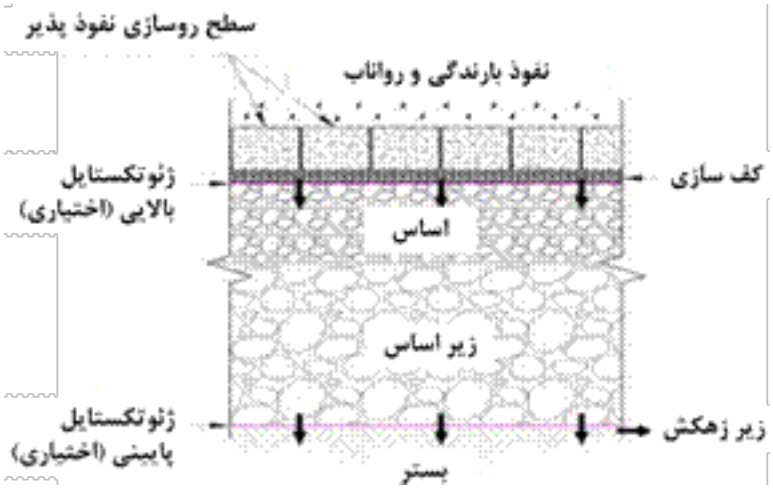
### ۲-۸. استفاده از بتن یا مصالح متخلخل در پیاده‌روها و خیابان‌ها جهت هدایت آب‌های سطحی

به‌منظور هدایت نزولات جوی و جلوگیری از هدررفت و خروج آنها از منطقه، استفاده از مصالح با درصد تخلخل بالا مانند بتن‌های متخلخل یا آسفالت متخلخل در اجرای پیاده‌رو یا خیابان‌های شهری در کشورهای پیشرفته درحال گسترش است. به کمک این روش طبق شکل ۳ می‌توان روان آب‌های سطحی و حتی فاضلاب‌های خاکستری را جمع‌آوری و در محل‌های مورد نظر به لایه‌های زیرین خاک تزریق کرد.

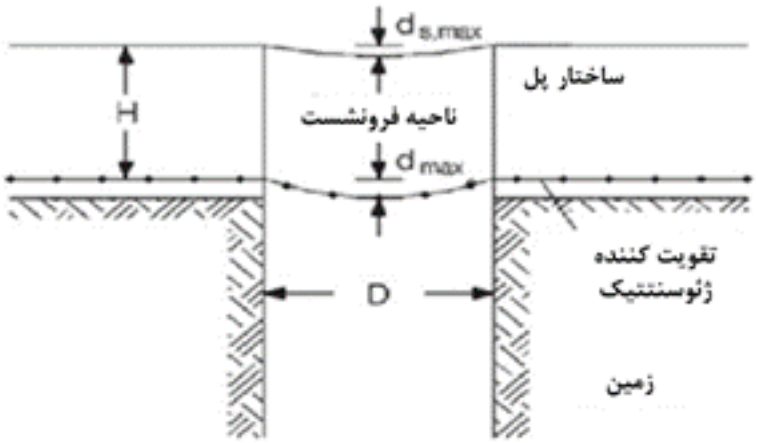
### ۲-۹. استفاده از ژئوگرید در لایه‌بندی بستر و روسازی

به‌منظور جلوگیری از نشســـت در جاده‌ها، باند فرودگاه، خطوط راه‌آهن و پی‌های گســـترده و سطحی از ژئوگریدها در لایه‌بندی بستر و روسازی راه‌ها و پی‌ها استفاده می‌شود (شکل ۴).

نمودار ۳. شماتیک روسازی نفوذپذیر




نمودار ۴. حوه عملکرد ژئوسنتتیک ها در نواحی دارای فرونشست




۱۰-۲. استفاده از مصالح نوین مانند باکتری‌ها و رزین‌ها برای تزریق و استحکام‌بخشی بستر زیرساخت‌ها

فناوری‌های پیشرفته غیرتهاجمی و مقرون‌به‌صرفه هستند و بهره برداری کامل از جاده یا پل را می‌توان به کمک آنها در طول پایدارسازی حفظ کرد. عملیات بهسازی را می‌توان در طول شب و در صورت نیاز بین ساعات شلوغی ترافیک انجام داد. همچنین وسایل نقلیه می‌توانند بلافاصله بر روی ناحیه اصلاح‌شده حرکت کنند. این روش تثبیت نیازی به حفاری ندارد و عملیات بهسازی را می‌توان در زمان کوتاهی انجام داد. در آمریکا از این روش برای جبران نشست تا میزان ۱/۳ متر استفاده شده است. از تزریق رزین‌های ویژه می‌توان برای بهسازی و جبران نشست در خطوط راه‌آهن، شمع‌ها، زیرساخت فرودگاه‌ها، تراز کردن سریع دال‌ها، پایه پست‌های انتقال برق و غیره استفاده کرد. همچنین می‌توان لوله‌های زیرزمینی مدفون در زمین را که تحت تأثیر آسیب‌های ناشی از فرونشست قرار گرفته‌اند، بهسازی نمود. MICP یک روش نوآورانه و امیدوارکننده برای بهبود زمین است که از فاز باکتریایی خاک برای رسوب کلسیم در محل استفاده می‌کند. فرایند هیدرولیز شامل هیدرولیز اوره در حضور آنزیم اوره است که از طریق باکتری‌های بومی تولیدکننده اوره موجود در خاک ترشح می‌شود.

ارزیابی آسیب‌پذیری محیطی، سکونتگاه‌های انسانی و زیرساخت‌ها در اثر فرونشست زمین در مناطق مستعد ضروری است. فرونشست زمین منجر به ایجاد خسارت در زیرساخت‌ها و ساختمان‌های واقع در مناطق مستعد بروز این پدیده شده است. زیرساخت‌ها جزء بنیان‌های اصلی و چارچوب‌های پایه‌ای هر جامعه به‌شمار می‌آیند که دربرگیرنده تمامی تأسیسات و تسهیلات مورد نیاز آن جامعه هستند. در زندگی مدرن، با افزایش وابستگی سریع به این امکانات، این نیاز روزافزون شده است. مناطق شهری به سبب تراکم جمعیت، وجود ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی به‌طور ویژه در برابر فرونشست آسیب‌پذیرتر هستند. این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها و بزرگراه‌ها آسیب وارد آورده، خطوط آب‌رسانی، گاز و فاضلاب را مختل کرده و موجب ترک‌خوردگی و آسیب به پی ساختمان‌ها شود. آثار زیرساختی در مقایسه با دیگر آثار قابل‌تشخیص‌تر است، در همین راستا با توجه به اینکه روش‌های معقول مقابله با فرونشست مستلزم برنامه‌ریزی بلندمدت اجتماعی و مدیریتی هستند، در کوتاه‌مدت قابل‌دستیابی نیستند و لذا باید راهکارهای طراحی و تعمیر و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد که در این گزارش راهکارهای فنی و ژئوتکنیکی جهت بهسازی خاک و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها مورد بررسی قرار گرفت که تعدادی از راهکارها براساس بهسازی خاک منطقه و سایر راهکارها بر علاج بخشی و مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها ارائه شده است.