بررسی فرونشست با تکنیک درخت مساله در اجزای سیستم حمل و نقل

مقاله علمی- پژوهشی

مقصود پوریاری*، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
مهران غلامی، استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:m.pouryari@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۵- پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۵
صفحه ۱۹۶-۱۸۳

چکیده

در دهه‌های اخیر، خطر فرونشست و فروچاله‌ها کاملاً نمایان و به حد بحرانی رسیده است. این موضوع اجزا و زیرساخت‌های تحت مسئولیت وزارت راه و شهرسازی را به شدت تحت تاثیر قرار داده و امکان رخداد سوانح بحران زا را در حوزه‌های شهری و در مسیرهای حمل و نقل ریلی و جاده‌ای سایت‌های فرودگاهی بوجود می‌آورد. توسعه و استفاده از روش‌های ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری شبکه‌های حمل و نقل در برابر فرونشست ضروری است. لیکن تاکنون به پیامد ناشی از فرونشست توجه شده است و به دلایل و ریشه‌ای آن کمتر پرداخته می شود. در این مقاله ضمن بررسی سوابق مطالعات در خصوص موضوع فرونشست و اثرات آن در سایر کشورها، معیارهای مهم در بررسی این موضوع در قالب یک چک لیست برشمرده شده و سپس به کمک روش درخت حل مساله ریشه‌یابی دلایل وقوع آن صورت پذیرفته است. این شیوه به عنوان یک اقدام پیشگیرانه کمک شایانی از منظر مدیریتی و مهندسی برای بهبود مساله فرونشست ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فرونشست، حمل و نقل، آسیب پذیری، فروچاله، چک لیست

۱-مقدمه

فرونشست حرکت عمودی و رو به پایین سطح زمین است که در اثر فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود. این پدیده شامل حرکت افقی کم یا بدون حرکت است که از حرکت شیب متمایز می‌گردد (Allaby, M. 2013). فرونشست یک مشکل جهانی است و در ایالات متحده، بیش از ۱۷۰۰۰ مایل مربع در ۴۵ ایالت، مستقیماً تحت تأثیر نشست زمین قرار گرفته اند(USGS ,2000) .این موضوع در کشور ما ایران که دارای اقلیم خشک و نیمه خشک می باشد و از طرفی ساختار مناسب مدیریت آب و همچنین آمایش سرزمین در آن پیاده سازی نشده است، دچار اهمیت مضاعف می‌باشد. بیش از نیمی از استان‌های کشور به طور مستقیم با این بحران دست و پنجه نرم می‌کنند. اثرات فرونشست زمین را می‌توان در اشکال ترک خوردگی و آسیب به مسکن، ساختمان و زیرساختها مشاهده کرد. با این وجود بطور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف های زمین ترمیم‌ناپذیر، پر هزینه و مخرب می‌باشند. به عنوان نمونه فرونشست ها می توانند به تخریب سیستم های آبیاری و خاکهای حاصلخیز کشاورزی (با پایین آوردن تخلخل آنها) منجر شوند. همچنین بسیاری از شریانهای حیاتی نظیر خطوط راه و راه آهن و باند فرودگاه در این خصوص می‌توانند تحت تاثیر قرار گیرند. این موضوع در مناطق شهری به دلیل تراکم جمعیت، ساختمانها و شریان‌های حیاتی آسیب پذیرتر می‌باشند. دلایل اصلی فرونشست را می‌توان در مواردی نظیر: تراکم سیستم سفره های زیرزمینی، زهکشی خاک‌های آلی، اکسیداسیون متعاقب خاک‌های آلی آن، استخراج آب زیرزمینی،

تراکم آبی، تراکم طبیعی، گودال‌ها، انحلال و فروپاشی سنگ‌های حساس و ذوب شدن یخ زدگی دانست (گ – ۹٤٦، ۱٤۰۰).

پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی منطقه می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود. از سوی دیگر این پدیده می‌تواند با ایجاد تغییر در وضعیت آب‌های زیزمینی منطقه از قبیل جهت و سرعت جریان، بیلان و غیره، نتیجه‌های ناهنجار بیشتری در پی داشته باشد. در این مطالعه درصدد هستیم ضمن آشنایی با عوامل و عواقب این پدیده در شریان‌های حیاتی بخش حمل و نقل، روش‌های ارزیابی و راههای کاهش آسیب پذیری آن را واکاوی کنیم.

شکل۱. نمونه ای از اثرات فرونشست در دامغان

شکل ۲. نمونه‌ای از فروچاله‌ها در دشت‌های کبورآهنگ

۲- سوابق فرونشست در دنیا

موارد زیادی از آثار ناشی از فرونشست را می‌توان در کشورهای نظیر ایالات متحده، عربستان، چین، مکزیک، اندونزی، ژاپن و سایر نقاط دنیا مشاهده کرد. خسارات وارده به ساختمانها وجاده‌ها در ایالات متحده آمریکا، تنها به علت ترک‌های ناشی از خاک‌های متورم شونده، سالیانه بین شش تا یازده بیلیون دلار و میزان خسارت در عربستان سعودی در سالهای بین ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۷، ناشی از خاک‌های متورم شونده، رقمی در حدود ۳۰۰ میلیون دلار برآورد شده است (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵). در عربستان فرونشست نتیجه فرایندهای طبیعی و برداشت آب زیر زمینی است. انحلال کربناتها و تبخیری‌ها و گنبدهای نمکی و پدیده کارست و رمبش خاک‌های ناپایدار در خاک‌های سبخایی و رسوبات لسی (پدیده آبشستگی) فرایند طبیعی فرونشست در عربستان محسوب می‌گردد. فعالیت‌های انسانی از قبیل استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی و مرطوب شدن خاک‌های ناپایدار موجبات فرونشست زمین را در قلمرو عربستان فراهم می‌کند. (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵). در شرق چین مناطقی از ایالت Shanxi تحت تأثیر ترک‌های عمیق قرار گرفته‌اند. تحقیقات زمین‌شناسی نشان می‌دهد که اکثر ترک‌های عمیق در این ناحیه راستایی شمالی جنوبی دارند و روند آنها با گسل‌های اصلی ناحیه هم راستاست. ترک‌های عمیق مشاهده شده در این منطقه اکثراً ترک‌های عمیق با منشاء تکتونیکی‌اند که موازی با یکدیگر قرار گرفته‌اند و هیچ گونه جابجایی افقی و عمودی در آنها مشاهد نمی‌گردد (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵). در جاکارتا، پایتخت اندونزی فرونشست با نرخ‌های مختلف رخ داده است. عوامل اصلی ایجاد فرونشست زمین در جاکارتا به احتمال زیاد استخراج بیش از حد

آب زیرزمینی، بار ساخت و ساز (به عنوان مثال تحکیم خاک با قابلیت فشردگی بالا) و تحکیم طبیعی خاک آبرفت است. نرخ فرونشست زمین در جاکارتا طی دوره ۱۹۷٤ تا ۲۰۱۰ حدود ۳ تا ۱۰ سانتی متر در سال است. توسعه سریع شهری، خاک آبرفتی نسبتاً جوان و اقدامات کاهش و سازگاری نسبتاً ضعیف، از عوامل افزایش خطر فرونشست زمین در جاکارتا است. اثرات فرونشست زمین را می‌توان از قبل در اشکال ترک خوردگی و آسیب به مسکن، ساختمان و زیرساخت مشاهده کرد (Abidin,H.Z et al.2015). در کشور ژاپن، زلزله یکی از محرک‌های اصلی فرونشست زمین است. در اثر زمین لرزه، فرونشست زمین رخ داده و خسارات جدی به بار می‌آورد. (T.Na, et al.2021)

دشت مرکزی همدان، به علت پتانسیل انحلال‌پذیری بالای آهک‌های منطقه، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و افت شدید سطح سطح ایستابی با خطر فرونشست، ایجاد فروچاله‌های عظیم و شکاف‌های عمیق زمین به مواجه شده است. روستای همه‌کسی (تعداد ۱۱ فروچاله)، منطقه فامنین (تعداد ۲ فروچاله)، کبودرآهنگ (تعداد ٤ فروچاله) و سردارآباد در شمال خاوری کبودرآهنگ (حضور یک شکاف خطی بطول بیش از ۱۰۰۰ متر) مناطقی هستند که به شدت تحت تاثیر این مخاطرات قرار دارند. حضور شکاف‌های متحدالمرکز در نواحی یاد شده نشانه پتانسیل ایجاد فروچاله‌های جدید در این نواحی است (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵) و (جعفری و محمدی، ۱۳۹۸). دلیل ایجاد ترک‌های عمیق در دشت مهیار شمالی اصفهان، را افت سطح آب‌زیرزمینی، تغییر ناگهانی در ضخامت لایه‌های تراکم پذیر در آبخوان و حضور گسل می‌دانند. فرونشست و ایجاد شکاف‌های عمیق در کنارگذر شرق اصفهان، مشخص شد که خاک در گروه CL در طبقه‌بندی یونیفاید و در گروه A-7-5 در سیستم طبقه‌بندی آشتو قرار دارد. با استفاده از آزمایش‌ها پین هول، کرامب و هیدرومتری دوگانه واگرایی خاک در مقابل آب‌شستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. در کل با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها می‌توان گفت که خاک این محل تا حدودی استعداد واگرایی دارد؛ لیکن مقدار واگرایی کم است. بنابراین می‌توان گفت که علاوه بر فرسایش‌پذیری خاک، ترک‌ها و حفره‌های موجود در منطقه ناشی از یک فعالیت زمین‌شناسی در لایه‌های زیرین است. لذا مسئله ترک‌ها از دو دیدگاه باید مورد توجه قرار گیرد: اول مقاومت خاک در برابر آب‌شستگی و میزان واگرایی، دوم فعالیت‌های زمین‌شناسی منطقه. در به وجود آمدن ترک‌ها در این ناحیه هر دو عامل نقش داشته‌اند.

در معین‌آباد ورامین، فرونشست و ایجاد شکاف‌های عمیق ناشی از تغییر رخساره رسوبی از مواد دانه درشت به مواد دانه‌ریز (بطور عمده سیلتی رسی) است. علاوه بر نقشه تغییرات رخساره‌های رسوبی، وجود نهشته شنی گراولی نیز در میانه شکاف (که از گسترش شکاف در سطح زمین ممانعت نموده)، می‌تواند دلیلی بر تغییرات بین انگشتی در این ناحیه باشد (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵).

در ورودی دشت رفسنجان، شاهد فرونشست هستیم. ارتباط بین کاهش آب‌زیرزمینی و فرونشست در بسیاری از نقاط این دشت به صورت خطی نیست. بنابراین احتمال می‌رود که عوامل متفاوتی به غیر از برداشت آب‌زیرزمینی در فرونشست زمین و ایجاد شکاف در دشت رفسنجان مؤثر باشند که عبارتند از انحلال نمک‌ها در آب زیر زمینی و فاکتورهای تکتونیکی. در بیشتر گزارشهای انتشار یافته برای این دشت، برداشت آب‌زیرزمینی به عنوان یک عامل اساسی در فرونشست زمین و ایجاد شکاف بر شمره شده اما در تحقیق دیگر (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵) و (Nikdel, E.,1992)، عامل تکتونیک نیز به عنوان یک عامل مؤثر دانسته است. دشت یزد- اردکان، دشتی با شیب بسیار کم با خصوصیت یک دشت بادرفتی است. معمولاً رودخانه‌ها و زهکش‌های سطحی به دلیل شیب کم و بارندگی کم در چنین مناطقی تشکیل نمی‌گردند و اگر هم مسیرهایی برای زهکشی پیدا شود با ماسه‌های بادی سریعاً پر شده و مسیر آنها کور می‌شود به طور کلی عامل ایجاد شکاف در دشت اردکان- یزد، توپوگرافی دشت، عوامل انسانی، جریانهای سطحی، رمبندگی خاک و فرسایش با همدیگر عامل اصلی گسیختگی‌ها و نشست‌ها در منطقه دشت یزد-اردکان محسوب می‌شود (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵) و (قنواتی، شریفی کیا و حسینی، ۱۳۹۸).

۳- دلایل فرونشست و اثرات آن

الف- سطح آب زیرزمینی و زهکش‌های موجود

فرونشست ناشی از آب‌های زیرزمینی، بالاترین سهم را از فرونشست (یا فرو رفتگی) زمین ناشی دارا است. این یک مشکل در حال رشد در جهان در حال توسعه است که در نتیجه افزایش جمعیت در شهرها و در پی آن افزایش مصرف آب، و در عین حال عدم وجود ضوابط و قواعد اجباری در مورد استخراج و پمپاژ آبهای زیرزمینی است. بر اساس ارزیابی‌ها، ۸۰٪ از مشکلات جدی فرونشست زمین در آمریکا، در ارتباط با استخراج بیش از حد آبهای زیرزمینی است و آن را به یک مشکل در حال رشد در سراسر جهان تبدیل می‌کند (ذوالانوار، هاشم الحسینی و کامیاب،۱۳۹۵). نرخ فرونشست با میزان افت آب زیرزمینی رابطه مستقیم دارد. بهره‌برداری از آب‌زیرزمینی بوسیله چاه‌های عمیق، نیمه‌عمیق و بعضا قنات‌ها انجام می‌گیرد که این موضوع افت زیاد سطح آب‌زیرزمینی را موجب می‌شود. تعداد چاههای مجاز و غیر مجاز و بهره‌برداری از چاه‌های عمیق جایگزین چاه‌های نیمه‌عمیق موجب افت سطح آب زیرزمینی و نهایتا ایجاد فرونشست می‌شود.

ب- اقلیم

یکی از پارامترهای مهم در بررسی فرونشست و فروریزش موضوع اقلیم است. بررسی و تعیین اقلیم منطقه بر اساس متغیرهای هواشناسی بارش و دمای متوسط سالانه باید انجام پذیرد. معمولاً در کشور اقلیم به شش طبقه اقلیمی تقسیم می‌کند. که عبارتند از: خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب. لازم به ذکر است که در اساس این طبقه‌بندی، متغیر تبخیر نیز به صورت نهفته و غیر صریح وجود دارد. میانگین بارش سالانه و میانگین دمای سالانه از دیگر متغیرهایی است که باید مورد ارزیابی قرار گیرند.

ج-ارزیابی کاربری اراضی و وضعیت پوشش گیاهی محل

یکی از پارامترهای کلیدی اثرگذار کاربری اراضی در منطقه تحت تاثیر فرونشست و فروریزش است. این کاربری‌ها شامل ساختمان، زمین بایر، همجواری با رودخانه یا دریاچه، اراضی کشاورزی، اراضی جنگلی، وجود مسیر راه آهن، راه و غیره می‌باشد. دشت‌های واقع در نواحی داخلی ایران که غالباً دارای آب و هوای خشک و بیابانی است و دارای پوشش گیاهی بسیار ضعیف و پراکنده می‌باشد، مستعد خطر فرونشست می‌باشند.

د- ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه

ژئومورفولوژی به بررسی چگونگی به‌وجود آمدن اشکال مختلف طبیعی در سطح زمین می‌پردازد و تغییرات حاصل از عوامل درونی و بیرونی زمین را بر روی این اشکال دنبال می‌کند تا بتواند رفتار آن‌ها را تبیین نموده و به پیش‌بینی آینده آن نایل شود. فرونشست زمین باعث تغییردر پدیده‌های ژئومورفولوژی می‌شود. باتوجه به ظاهر شدن عوارض انسان ساخت روی شکل زمین، بررسی تغییرات ناشی ازفرونشست دراین گونه پدیده‌ها، حائز اهمیت است. ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه را می‌توان بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرایی انجام داد.

ه- زمین‌شناسی عمومی محدوده مورد مطالعه

از آنجا که فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی است، ارتباطی تنگاتنگ با نوع زمین شناسی منطقه دارد. ساختارهای زمین شناسی، نوع رسوبات، مخروط افکنه‌ها، سنگ بستر و سازندها نقش انکارناپذیری بر نرخ فرونشست دارد.

د- تکتونیک و لرزه‌زمین‌ساخت محدوده مورد مطالعه

زمین‌ساخت یا تکتونیک مطالعه تغییرشکل پوسته زمین بر اثر تنش‌ها و کرنش‌های وارده در طول دوران‌های مختلف زمین‌شناسی است. همچنین، زمین‌ساخت به مطالعه ساختار درونیِ زمین، چگونگی تشکیل رشته کوه‌ها، اقیانوس‌ها، زمین‌لرزه‌ها و دیگر رخدادهای سطح زمین می‌پردازد. شواهد

زیادی نشان می‌دهد که برخی فروشست‌ها در مناطق ایران ناشی از فعالیت تکتونیکی است تا عوامل دیگر.

و – خواص مهندسی رسوبات منطقه مورد مطالعه

برای تعیین خواص مهندسی رسوبات منطقه تحت تاثیر فرونشست، باید نمونه‌های را از اعماق مختلف خاک در محدوده مورد مطالعه برداشت کرد. از بین این نمونه‌ها برداشت شده، برای انجام آزمایش و تعیین خواص فیزیکی خاک (**واگرایی و غیرواگرایی خاک، پتانسیل تورم خاک**) اقدام می‌گردد. عمق نمونه‌های برداشت شده در نقاط مختلف باید متفاوت بوده تا دقت لازم را داشته باشد.

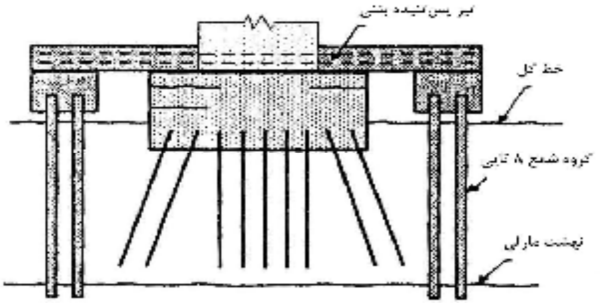
٤- پیامدهای خطر فرونشست در زیرساخت‌های راه و راه آهن و اقدامات مهندسی لازم

فونداسیون‌های پل که در محدوده ایمنی از ظرفیت باربری خاک قابل تحکیم در زیر سطح آنها طراحی می‌شوند با گذشت زمان مقداری نشست را تحمل خواهند کرد. در اکثریت موارد این حرکت کاملاً قابل قبول است. اما در مسأله فرونشست این مقدار از مقادیر طراحی برای پلها ممکن است تجاوز کند و یا باعث ایجاد مشکلات قابل دید در سازه‌های قدیمی‌تر شود. چنانچه تمام فونداسیون‌ها به یک اندازه و با یک نسبت یکسان نشست کنند، مشکلی برای خود سازه به وجود نخواهد آمد، گرچه اشکالات بهره برداری مانند دسترسی به پل پابرجا خواهد بود. این خطر، ممکن است نشست غیر یکنواخت را در بر داشته باشد و یا اینکه نشست نامتقارن را به وجود آورد که می‌تواند باعث چرخش پایه و یا کوله شود که مسأله‌ای بسیار جدی است. شدیدترین مسایل از این دست در مناطقی رخ می‌دهد که خاک آنها دارای پتانسیل روانگرایی هنگام زلزله می‌باشد و یا در آنجا استخراج معدنی در زیر زمین صورت گرفته باشد (پژوهشکده حمل و نقل،۱۳۸۵). سرانجام، حرکات جانبی کوله‌هایی که روی زمین نرم ساخته شده‌اند محتمل می‌باشد. در این حالت وزن خاکریز پشت کوله باعث حرکت جانبی خاک شده که آن نیز چرخش و تغییر مکان کوله را به دنبال خواهد داشت. همچنین در اثر فرونشست ظرفیت باربری خاک زیر پی‌ها ممکن است از دست برود. دو پیامد مشخص در اثر ظرفیت باربری ناکافی عبارتند از:

- مشکلات سازه‌ای
- گسیختگی خاک

روش‌های افزایش ظرفیت باربری فونداسیون‌های موجود در ایالات متحده به سه دسته تقسیم می‌شوند (پژوهشکده حمل و نقل،۱۳۸۵):

- افزایش سطح باربر و یا تعداد شمع‌ها
- انتقال بار به لایه‌های سخت‌تر
- افزایش ظرفیت باربری خاک زیر فونداسیون



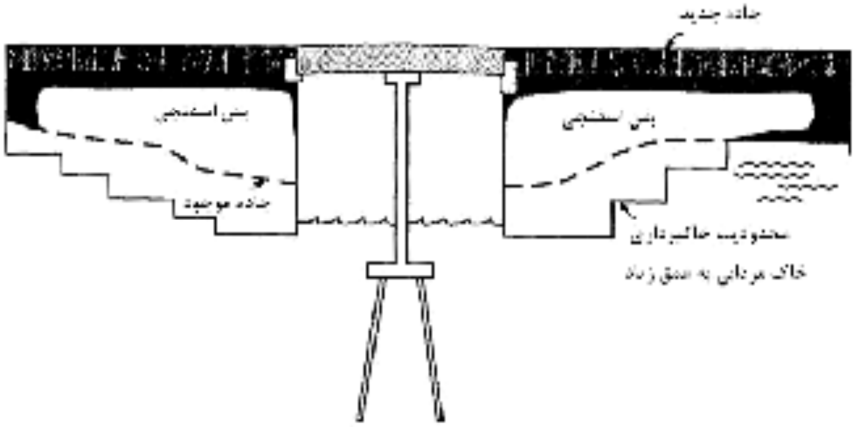
شکل ۳. تقویت پی از زیربندی

الف-بهسازی زمین

در این روش‌ها سعی می‌شود وضعیت لایه‌های تحکیم یابنده بهبود یابد و شامل تکنیک‌های جایگزینی، پیش بارگذاری، زهکشی ماسه‌ای، زهکشی کاغذی و روش‌های اختلاط عمیق می‌شود.

ب-کاهش بار لایه‌های تحت تحکیم

در این روش‌ها سعی می‌شود که بار وارد بر لایه‌های تحت تحکیم طوری سبک شود که نشست آنها متوقف گردد. شکل ٤ مثالی را از کشور آمریکا نشان می‌دهد. در این مثال از بتن اسفنجی به عنوان پرکننده برای کاهش بار استفاده شده که در نتیجه این کار می‌توان میزان بار زنده را افزایش داد.



شکل ٤. بتن ریزی سبک (اسفنجی)

ج-افزایش سطح باربر یا تعداد شمع‌ها

مساحت پی افزایش داده می‌شود تا بار وارد بر واحد سطح آن کاهش یابد یا به تعداد شمع‌ها اضافه می‌شود تا ظرفیت باربری افزایش یابد. مثالی از کشور فرانسه در شکل ٥ نشان داده شده است. از آنجا که شمع‌های چو بی به لایه باربر نرسیده‌اند و تحکیم باعث نشست فونداسیون می‌شود، شمع‌های فولادی با مقطع لوله با قطر کوچک به زیر فونداسیون اضافه شده تا به لایه باربر برسند.

چ-تزریق زیر پی

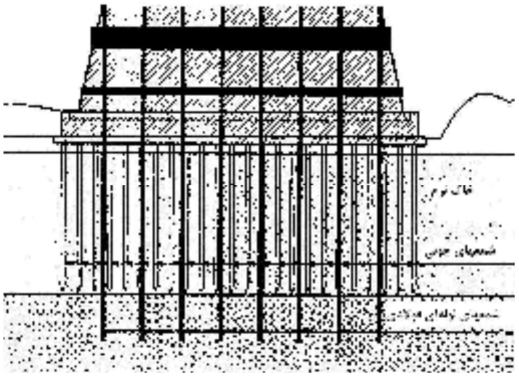
بتن و یا بعضی مصالح مشابه برای پرکردن حفره‌های زیر پی بکار می‌رود.

د-تنظیم تکیه‌گاه‌ها

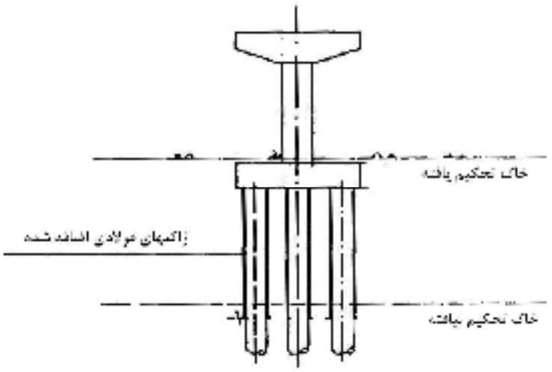
هنگامی که زیرسازه در اثر تحکیم خاک نشست کرد، برای آنکه زیرسازه به وضعیت اولیه برگردد تکیه‌گاه‌ها تنظیم می‌شوند.

ر-کاهش اصطکاک منفی

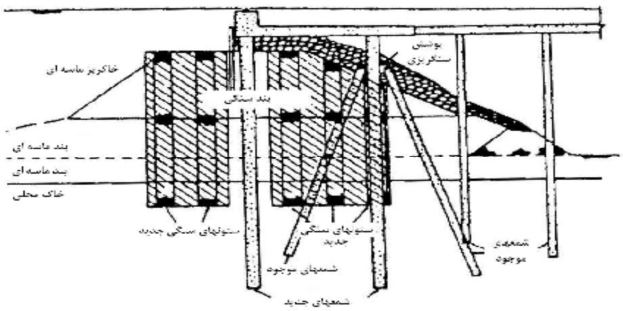
با کاربرد قیر در سطح شمع به عنوان یک عمل نگهداری پیش گیرانه، اصطکاک جدار کاهش می‌یابد. شکل ٦ روش کاهش اصطکاک در ایتالیا را نشان می‌دهد که با قراردادن ژاکت‌های فولادی به دور شمع‌ها حاصل شده است.



شکل ۵. شمع‌های اضافه شده



شکل ٦. ژاکت‌های فولادی



شکل ۷. زهکش‌های شنی و شمع‌های اضافه شده

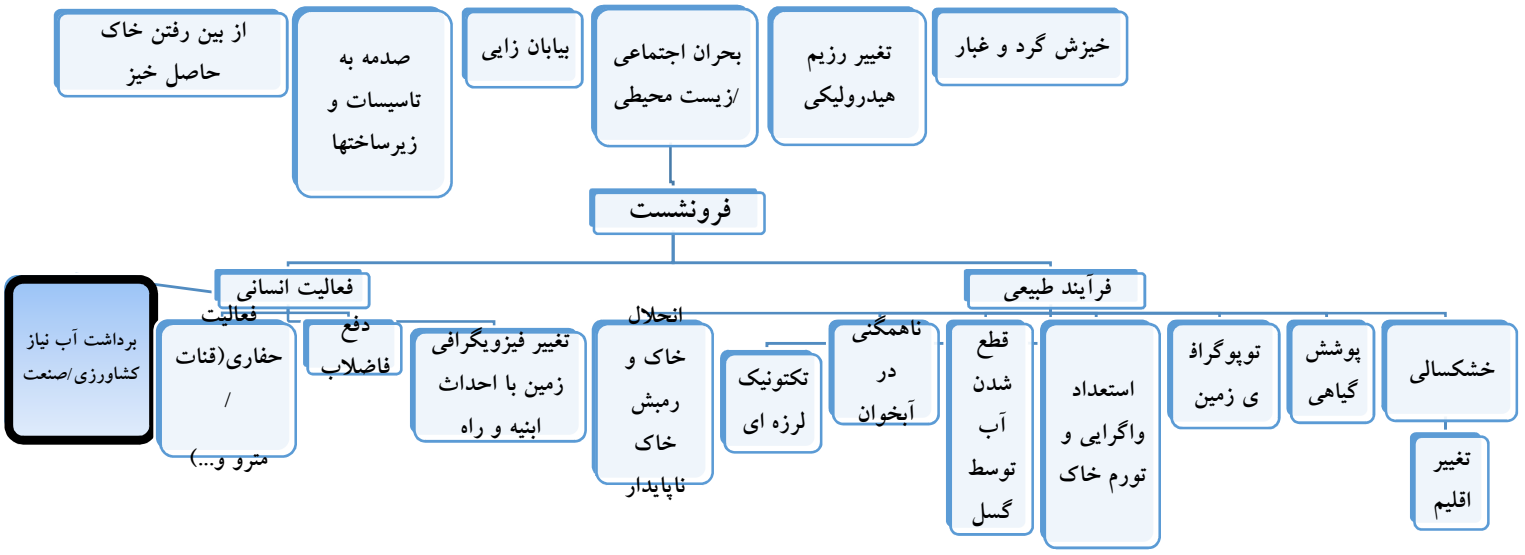
بر اساس اطلس فرونشست که توسط سازمان نقشه برداری کشور تهیه شده است، میزان نرخ فرونشست و سایت‌های فرودگاهی و خطوط ریلی در معرض این خطر مطابق جدول ۱ می‌باشد (سازمان نقشه برداری کشور،۱۳۹۷)

جدول ۱. وضعیت فرونشست در مناطق فرودگاهی کشور

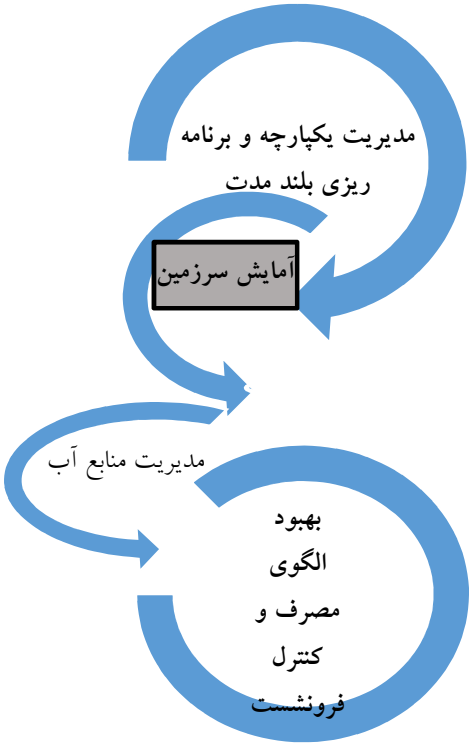
محدوده فرونشست	واقع شدن سایت فرودگاه و خطوط ریلی در محدوده	میزان نرخ فرونشست (میلی متر در سال)
محدوده مشترک شهرستانهای خمینی شهر، فلاورجان، زرین شهر، نجف آباد، دولت آباد، اصفهان، تیران و کرون در استان اصفهان	فروگاه شهید بهشتی اصفهان	بیشترین نرخ تا ۱۸۰ میلی متر در سال
محدوده شهرستانهای برخوار، شاهین شهر و میمه، خمینی شهر، فلاورجان، اصفهان، لنجان و نجف آباد در استان اصفهان	فروگاه شهید بهشتی اصفهان طول معادل ۷۳ کیلومتر خطوط راه آهن در محدوده واقع است	بیشترین نرخ تا ۱۲۵ میلی‌متر در سال
محدوده مشترک شهرستانهای آران و بیدگل و کاشان در استان اصفهان	فرودگاه کاشان	بیشترین نرخ تا ۱۳۰ میلی‌متر در سال
فسا (محدوده مشترک مرکزی، نوبندگان و زاهدشهر) استان فارس	فرودگاه فسا	بیشترین نرخ تا ٦۰ میلی متر در سال
داراب استان فارس	فرودگاه داراب	بیشترین نرخ تا ۲۰۰ میلی متر در سال که فرودگاه در محدوده فرونشست ۱۲۰ میلی‌متر در سال است.
دشت قزوین	فرودگاه سمپاشی قزوین	بیشترین نرخ تا ۱۵۰ میلی‌متر در سال
اسدآباد استان همدان	فرودگاه همدان	بیشترین نرخ تا ۲۱۸ میلی‌متر در سال
کرمان (محدوده مشترک کرمان،چترود و ماهان) استان کرمان	فرودگاه کرمان طول معادل ۷۹ کیلومتر خطوط راه آهن در محدوده واقع است.	بیشترین نرخ تا ۱٦۰ میلی‌متر در سال
شاهرود استان سمنان	فرودگاه شاهرود	بیشترین نرخ تا ۱٥٤ میلی‌متر در سال
البرز، محدوده مشترک البرز و قزوین	فرودگاه پیام فرودگاه سمپاشی کیانمهر فرودگاه نظامی مهرشهر طول معادل ۷۵ کیلومتر خطوط راه آهن در محدوده واقع است.	بیشترین نرخ تا ۲۹۰میلی متر در سال
تهران، محدوده مشترک استان تهران و البرز	فرودگاه مهرآباد و امام خمینی طول معادل ٥۱٤ کیلومتر خطوط راه آهن در محدوده واقع است.	بیشترین نرخ تا ۲۰۰ میلی‌متر در سال

۵- تحلیل علل ریشه‌ای

در این بخش به ریشه‌یابی مساله فرونشست به کمک تکنیک درخت مساله یا درخت منطق می‌پردازیم. در این تکنیک مساله مانند درختی است که شامل ریشه، تنه و شاخه می‌باشد. مشکل (در اینجا فرونشست) در تنه نشان داده می‌شود و این مشکل دارای ریشه‌هایی است که با طرح سوال چرا، می‌توان به ریشه‌های بعدی رسید و این سوال تا به میزان کافی (معمولاً در حد چهار سوال) می‌تواند ادامه یابد. به عنوان مثال: چرا فرونشست داریم؟ جواب: برداشت زیاد آب زیرزمینی. سوال: چرا برداشت آب زیر زمینی داریم؟ جواب: نیاز بخش کشاورزی به آب مورد نظر. سوال: چرا در آن پهنه باید کاربری کشاورزی باشد یا چرا بخش کشاورزی این مقدار آب نیاز دارد؟ جواب: در برنامه آمایش سرزمین دیده شده است یا الگوی کشت اقتضا می‌کند و به همین صورت ادامه می‌یابد. در شکل ۸ این فرآیند برای بحث فرونشست نشان داده شده است. ابتدا دو دلیل اصلی فرایند طبیعی و فعالیت انسانی برشمرده و سپس برای هریک دلایلی دیگر ارایه شده است. همچنین شاخه‌های درخت پیامدهای فرونشست را در بر می‌گیرد. همچنین این درخت مسأله می‌تواند به راحتی تبدیل به درخت اهداف یا راهکار شود. برای ترسیم درخت اهداف، ابتدا یک درخت دیگر ترسیم می‌شود و با طرح سوال چگونه؟ به راهکار می‌رسیم. در درخت جدید، ابتدا به ریشه‌های درخت مسأله نگاه می کنیم، و هر یک از ریشه‌ها را تبدیل به فعالیت می‌کنیم. فعالیت‌ها در ریشه‌های درخت اهداف نوشته می‌شود. برای مثال مذکور که که در ریشه درخت مسئله نوشته شده است : برداشت بی رویه آب زیرزمینی، در درخت اهداف در ریشه‌ها خواهیم نوشت: کاهش برداشت آب، اصلاح الگوی کشت، اصلاح کاربری کشاورزی، اصلاح آمایش سرزمین و ... به عبارت دیگر مورد منفی در ریشه درخت مسأله، تبدیل به یک مورد مثبت در ریشه درخت هدف می‌شود. این کار را یکی یکی برای تمام مواردی که در ریشه‌های درخت مسأله آمده است انجام می‌دهیم. شکل۹ فعالیت موثر جهت کنترل فرونشست در قالب برنامه ریزی از طریق آمایش سرزمین ارایه شده است. اینکه عدم اجرا و پیاده سازی آن نیز به نبود متولی واحد و یکپارچه مربوط می‌شود.



شکل ۸ مشکل فرونشست با تحلیل درخت مساله



شکل ۹. اقدامات موثر جهت کنترل فرونشست در قالب برنامه‌ریزی از طریق آمایش سرزمین

٦-چک لیست‌ها

به منظور ارزیابی آسیب پذیری اجزای حمل و نقل در برابر خطر فرونشست، ابتدا یک طبقه بندی به لحاظ مد حمل ونقل و سپس هریک از اجزا شامل زیر ساخت (ابنیه و سایر مستحدثات)، مسیر، ایستگاه‌ها، سایت فرودگاه لازم است. معمولاً این اجزا به دو صورت خطی یا سطحی می‌باشند که ابتدا باید مشخص کرد، پهنه خطر فرونشست با چه شدتی در هر یک بسط یافته است. سپس با چک لیست با مشخصات جدول ۲ (نرخ فرونشست، کاربری، اقلیم، توپوگرافی، زمین شناسی، سطح آب زیرزمین، تکتونیک، ژئومورفولوژی، خواص خاک، خواص مهندسی رسوبات)، شناخت دقیقی از دلایل و عوامل موثر بدست آورد و در نهایت اقدام مهندسی و مدیریتی لازم در خصوص کاهش خطرپذیری فرونشست را به کار گرفت. برای مسیر ریل و راه، معمولاً مشخصات هندسی و ترافیکی و همچنین تعداد ابنیه فنی و موقعیت جغرافیایی به عنوان اطلاعات اولیه باید ثبت گردد. یکی از پارامترهای موثر **طول مسیر** در معرض فرونشست است. در اجزای سطحی نظیر ایستگاه‌ها و سایت فرودگاه و باند پرواز، میزان **سطح** در معرض فرونشست، اهمیت دارد.

جدول ۲. چک لیست ارزیابی آسیب پذیری اجزای حمل ونقل (راه، راه آهن و فرودگاه)

نام محور :	**کد محور :**
تعداد پل و کالورت به تفکیک دهانه :	**عرض راه/ راه‌آهن و درجه عملکرد :** **طول/مساحت در معرض فرونشست:**
حجم تردد در محور(مسافر و تناژ کالا):	**آدرس و موقعیت مورد بررسی:**
حوزه آبریز اصلی و زیرحوضه:	

گستره و میزان فرونشست (نرخ):	
نرخ توصیف سابقه فرونشست: فاصله از راه/ راه آهن/سایت:	

ارزیابی وضعیت کاربری اطراف	
ساختمان (جمعیت و نوع ساختمان‌ها در اینجا مورد ملاحظه قرار می‌گیرد) بایر، کنار رودخانه یا دریاچه، کشاورزی، پوشش جنگل نوع	

اقلیم	
میزان بارش سالانه میزان دما رطوبت	

توپوگرافی	
درجه شیب و جهت آن	

زمین شناسی عمومی منطقه مورد بررسی و مطالعات ژئوفیزیک	
رده زمین‌شناسی شامل: پرکامبرین، اینفراکامبرین پالئوزوئیک و غیره، ضخامت آبرفت و جنس سنگ کف، رسوب شناسی و غیره.	

مسیل‌های موجود و سطح آب زیرزمینی و زهکش‌های موجود	
	سطح آب زیرزمینی
	منبع تغذیه آبخوان
	تراز آب‌زیرزمینی و تغییرات آن
	جریانهای آب‌زیرزمینی و شیب هیدرولیک آنها
	بهره‌برداری از منابع آب‌زیرزمینی
	بررسی خاصیت آبشستگی نمونه‌ها

خواص مهندسی رسوبات منطقه
آزمایشات پین‌هول
حدود اتربرگ
هیدرومتری دوبل

ارزیابی پتانسیل تورم و واگرایی خاک
تعیین پتانسیل تورم بر اساس آزمایش تورم آزاد
اندیس پلاستیسیته
بررسی خاصیت انبساط (فاکتور کیفی پتانسیل تورم و درجه تورم)
حد انقباضی خاک

تکتونیک و لرزه‌زمین‌ساخت محدوده مورد مطالعه
لررزه‌خیزی منطقه مورد مطالعه
شدت زلزله
گسیختگی سطحی
ارزیابی ترک‌های موجود با منشاء تکتونیکی
فاصله از گسل

توزیع چاه و قنات‌ها
تعداد چاه‌های عمیق و نیمه عمیق و قنوات و ارزیابی ترک‌های ایجاد شده در اثر ریزش قنات‌ها و چاه

ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه
ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرایی صورت گرفته و نقشه ژئومورفولوژی این محدوده تهیه می‌شود. واحدهای ژئومورفولوژیکی مانند کوهستان، باداها، پلایا و تلماسه‌های بادی و غیره.

پایش خطر با مدل‌های ماهواره‌ای و راداری

٦- مراجع

- "تعمیر و مقاوم سازی زیرسازه پلها"، (۱۳۸۵)، پژوهشکده حمل و نقل مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی.

- ذوالانوار، س. ع. هاشم الحسینی، ح. و کامیاب، الف.، (مجریان)، (۱۳۹۵)، "بررسی عوامل ایجاد ترک‌های عمیق در کنارگذر کرمان و محور کرمان – جوپار"، کد نشر: گ – ۷٤۱، چاپ اول، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

- قنواتی، ع. شریفی‌کیا، م. و حسینی، س. ا.، (۱۳۹۸)، "تبیین اثر و فرایند ژئومورفولوژیکی پدیده فرونشست در تغییر الگوی لند فرم‌های ژئومورفولوژیکی مطالعه موردی دشت یزد- اردکان"، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی سال هشتم زمستان، شماره ۳ (پیاپی ۳۱)، ص.١٦-١

-"اطلس فرونشست و نرخ آن در سطح کشور"، (۱۳۹۷)، سازمان نقشه برداری کشور.

-"روش‌های غیرمخرب در شناسایی خطرات ساختگاهی خطوط راه و راه آهن"، (١٤٠٠)، کد نشر: گ – ۹٤٦، چاپ اول، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

-جعفری، غ.ح. و محمدی، ه.، (۱۳۹۸)، "پهنه‌بندی خطر فروچاله‌ها با استفاده از روش وزن شواهد مطالعه موردی: دشت کبودر آهنگ – فامنین"، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ششم، شماره ۳، پاییز، ص. ۸۸-۷۱.

-Allaby, Michael (2013), "subsidence", "A dictionary of geology and earth sciences (Fourth ed.)", Oxford: Oxford University Press, ISBN 9780199653065.

-H. Z. Abidin, H. Andreas, I. Gumilar, and J. J. Brinkman,(2018), "Study on the risk and impacts of land subsidence in Jakarta".

-Land Subsidence in the United States, USGS Fact Sheet-165-00 December 2000.

-Nikdel, E., (1992), "Report on the mechanism of movement and Subsidence of Rafsanjan plain due to Groundwater withdrawal and tectonics: Professional report (in Persian)", Regional Water organization, Iran.

proc-iahs.net/372/115/2015/,doi:10.5194/ piahs-372-115-2015.

-T. Na, Y. Kawamura, S.Kang ,S.Utsuki," (2018), "Hazard mapping of ground subsidence in east area of Sapporo using frequency ratio model and GIS", Geomatics, Natural Hazards and Risk,

https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1873198.

Subsidence Investigations with Problem Tree Analysis in Transport System Components

Maghsood Pouryari, Assistant Professor, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Mehran Gholami, Assistant Professor, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: m.pouryari@bhrc.ac.ir

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

In recent decades, the risk of subsidence and sinkholes has become quite visible and has reached a critical level. This issue has severely affected the components and infrastructures under the responsibility of the Ministry of Roads and Urban Development (MRUD) and creates the possibility of disaster-causing incidents in urban areas, on rail and road transportation routes, and on airport sites. It is necessary to develop and use methods to assess the risk and vulnerability of transportation networks against subsidence. In this article, while reviewing the records of studies on the subject of subsidence, and its effects in other countries, the important criteria in examining this issue are listed in the form of a checklist, and then with the help of the problem solving tree method, the root causes of its occurrence are found. This method serves as a preventive measure to help solve the subsidence problem from a managerial and engineering point of view.

Keywords: Subsidence, Transportation, Vulnerability, Sinkhole, Checklist