



مراحل طراحی ساختمان‌های جدید یا مقاوم سازی در مناطق دارای فرونشست

علی فاخر^۱، عباس قلندرزاده^۲، سعید عسکریان^۳، روزبه رضائزادملکشاه^۴

۱-۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

۳- مدیر کلینیک ژئوتکنیک، مهندسین مشاور هندسه پارس.

۴- کارشناس ارشد کلینیک ژئوتکنیک، مهندسین مشاور هندسه پارس.

s.askarian@parsgc.com

خلاصه

فرونشست زمین در دشت‌های مختلف کشور منجر به ایجاد خسارت در ساختمان‌های واقع در این مناطق شده است. با توجه به اینکه روش‌های معمول مقابله با فرونشست مستلزم برنامه‌ریزی بلندمدت اجتماعی و مدیریتی می‌باشند، در کوتاه مدت قابل دستیابی نیستند و لذا باید راهکارهای زودبازده طراحی و تعمیر ساختمان‌ها در این مناطق پیشنهاد گردد. در تحقیق حاضر مراحل طراحی ساختمان‌های جدید یا مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود در مناطق دارای فرونشست و یا مستعد آن بر مبنای جمع‌آوری مطالب از مراجع مختلف و تجربیات مولفین در پروژه‌های واقعی پیشنهاد شده است. این چارچوب گام به گام شامل ۶ مرحله برای طراحی پی می‌باشد. یکی از نکات حائز اهمیت در مراحل پیشنهادی، طراحی پی بر اساس ریسک می‌باشد. اگرچه عدم قطعیت‌های مختلف در متغیرهای ژئوتکنیکی وجود دارد اما مهم‌ترین متغیر نامطمئن در طراحی پی در مناطق دارای فرونشست عبارت از مصرف آب زیرزمینی در یک منطقه و تغییرات تراز آب زیرزمینی در آینده است، به همین دلیل طراحی پی بر اساس ریسک توصیه شد.

کلمات کلیدی: فرونشست، مقاوم‌سازی، پی، نشست نامتقارن، آب زیرزمینی.

۱. مقدمه

فرونشست زمین یک پدیده ژئوتکنیکی است که در آن تراز سطح زمین در اثر تراکم لایه‌های زیرین کاهش می‌یابد. فرونشست‌هایی که در مناطق با خاک ریزدانه به وجود می‌آیند معمولاً روند آهسته‌ای دارند. پیشگیری از افزایش میزان فرونشست معمولاً کار دشوار و زمان‌بری است. این پدیده ممکن است سبب شکست لوله‌ها، کجی ساختمان‌ها و اختلال در عملکرد کانال‌های انتقال آب شود. مناطق زیادی در سراسر دنیا با این پدیده مواجه هستند از جمله این مناطق میوان از شانگهای و تیانجین در چین؛ اوساکا، نیگاتا و توکیو در ژاپن؛ کالیفرنیا در ایالات متحده و ونیز در ایتالیا نام برد [۱ و ۲].

فرونشست زمین می‌تواند ناشی از دلایل طبیعی همچون حرکات تکتونیک و تغییرات تراز آب و یا ناشی از فعالیت‌های انسان باشد. استخراج سیالات زیرزمینی (عمدتاً شامل آب، نفت خام و گاز طبیعی) در کنار برداشت از معادن سبب فرونشست می‌شوند. اصلی‌ترین علت فرونشست در مناطق مختلف، بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی است. راهکارهای بکار رفته برای جلوگیری از افزایش فرونشست زمین در مناطقی که علت به وجود آمدن آن برداشت بی‌رویه از آبخوان بوده است معمولاً شامل محدود کردن و کنترل برداشت از آب‌های زیرزمینی و (ب) هدایت آب‌های سطحی به سمت آبخوان می‌شوند [۳].

افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی موجب کاهش تراز آب و در نتیجه آن افزایش تنش موثر می‌شود. افزایش تنش موثر موجب نشست لایه‌های خاکی و در نهایت فرونشست سطح زمین می‌شود. محمودپور^۱ و همکاران [۴] با مدل‌سازی عددی به پیشبینی نرخ نشست دشت تهران پرداختند. این محققان مدل ساخته شده را با استفاده از داده‌های تداخل سنجی راداری کالیبره کردند. کالدرهد و همکاران [۵] با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی و استفاده از تئوری تحکیم ترزاقی به تعیین نشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی پرداختند. کائو و همکاران [۶] با مدل‌سازی سه-بعدی جریان آب و نشست یک بعدی به شبیه‌سازی فرونشست دشت هوانگزو^۲ - جیاژینگ^۳ - هوژو^۴ پرداختند و نشست آبی را برای سناریوهای مختلف برداشت آب پیشبینی کردند.

¹ Mahmoudpour

² Hangzhou

³ Jiaying

⁴ Huzhu



فرونشست زمین در بالای سفره‌های زیرزمین بهره‌برداری شده پدیده گسترده در ایران است. تهران، یزد، میبد، مشهد، کاشمر، ورامین، رفسنجان از جمله شهرهای متاثر شده از این پدیده در ایران هستند [۷]. ذخایر آب زیرزمینی در تهران در دهه‌های گذشته به دلایل مختلف از جمله مهاجرت بی‌رویه و رشد سریع جمعیت و متعاقباً برداشت بیش از پیش از آب‌های زیرزمین برای فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی کاهش یافته است. متق^۱ و همکاران [۷] نرخ فرونشست در تهران را حدود ۳۵ cm/year تخمین زده‌اند. در رفسنجان برداشت آب به دلیل استفاده در مزارع پسته موجب افت ۱۵ متری تراز آب زیرزمینی بین سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۱ شده است. برای مشهد و یزد کرمان نرخ نشست به ترتیب برابر ۳۰ cm/year و ۲۵ cm/year برآورد شده است [۷]. محمدی^۲ و همکاران [۸] به بررسی فرونشست دشت سمنان پرداختند، بررسی‌ها نشان داد که برداشت آب زیرزمینی و خصوصیات ژئوتکنیک لایه‌های خاک از عوامل تعیین کننده در فرونشست دشت سمنان هستند.

روش‌های معمول مقابله با فرونشست، شامل کاهش برداشت از آب زیرزمینی و یا هدایت آب‌های سطحی به آبخوان، بر جلوگیری از آن و یا کاهش نرخ این رخداد متمرکز هستند. این روش‌ها بسیار ضروری هستند لیکن مستلزم برنامه‌ریزی بلندمدت اجتماعی و مدیریتی می‌باشند. با توجه به اینکه مشکل فرونشست در نقاط بسیاری از کشور رخ داده است، در این مقاله راهکارهای زودبازده طراحی و تعمیر ساختمان‌ها در این مناطق پیشنهاد می‌گردد. این پژوهش در مورد ساختمان‌هاست و شامل حال تاسیسات زیربنایی همچون راه‌آهن، خطوط انتقال نیرو و ... نمی‌شود. ساختار پیشنهادی در این مقاله با جمع‌آوری مطالب از مراجع مختلف و تجربیات مولفین در طراحی پی‌های مختلف بدست آمده است. به زبان ساده ساختار پیشنهادی ترکیبی از تجربه و جمع‌آوری مطالب با جمع‌بندی است.

۲. ساختار کلی مراحل کار پیشنهادی

شرح مختصر روش مراحل طراحی ساختمان‌های مقاوم در برابر فرونشست در جدول ۱ ارائه شده است. مرحله اول طراحی شامل جمع‌آوری اطلاعات مختلف از جمله میزان فرونشست ثبت شده، وضعیت زیرسطحی و تاریخچه تغییرات سطح آب است. در مرحله بعدی برای پیشبینی میزان فرونشست مدل فرونشست تهیه و این مدل با استفاده از داده‌های مرحله قبل کالیبره می‌شود. بعد از کالیبراسیون می‌توان میزان فرونشست در آینده را تخمین زد. در مرحله چهارم اعوجاج مجاز و نشست غیر یکنواخت مجاز بر حسب نوع سازه از مراجع معتبر انتخاب خواهد شد. در محله پنجم گزینه‌های مختلف پی با توجه به نوع سازه مورد بررسی و فرونشست آتی پیش‌بینی شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت در مرحله ۶ ریسک گزینه‌های مختلف پی محاسبه شده و با توجه به هزینه چرخه عمر، پی مناسب انتخاب می‌شود.

جدول ۱- شرح مختصر روش‌های طراحی ساختمان مقاوم در برابر فرونشست

| | |
|--|---|
| ۱-۱. مقدار فرونشست در منطقه تاکنون | ۱. جمع‌آوری اطلاعات |
| ۲-۱. تاریخچه پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در منطقه | |
| ۳-۱. مشخصات لایه‌های زمین و عمق سنگ بستر | |
| ۱-۲. تهیه مدل محاسبه فرونشست | ۲. تهیه مدل کالیبره شده پیش‌بینی فرونشست |
| ۲-۲. کالیبره کردن مدل با استفاده از اطلاعات فرونشست تهیه شده | |
| ۳-۲. پیش‌بینی فرونشست در سالهای آتی | |
| ۱-۳. تعریف هندسه مسئله فرونشست و تشکیل مدل عددی مناسب | |
| ۲-۳. انتخاب متغیرهای ورودی مدل عدم قطعیت | |
| ۳-۳. انجام آنالیز حساسیت به منظور شناسایی متغیرهای تاثیرگذار سیستم | ۳. تهیه مدل غیر قطعی فرونشست با روش‌های قابلیت اعتماد |
| ۴-۳. تشکیل ماتریس محاسبات | |
| ۵-۳. تهیه تابع توزیع مقادیر فرونشست محاسبه شده از مدل عدم قطعیت | |
| ۱-۴. انتخاب نسبت نشست غیریکنواخت سازه به فرونشست در منطقه | ۴. تعیین معیارها و مبانی طراحی پی |
| ۲-۴. انتخاب اعوجاج مجاز سازه با توجه به نوع سازه و خاک | |
| ۳-۴. انتخاب فرونشست حداکثر مجاز در محل پروژه | |
| ۱-۵. پرهیز از پی منفرد در مناطق دارای فرونشست | ۵. طراحی گزینه‌های مختلف برای پی و سازه |

¹ Motagh

² Mohammady

-
- ۵-۲. توصیه به استفاده از پی شبکه ای و پی گسترده صلب
 - ۵-۳. توصیه به استفاده از پی عمیق در مناطق مستعد شکاف فرونشست
 - ۵-۴. توصیه به استفاده از پی گسترده بعلاوه توده بهسازی شده
 - ۵-۵. توصیه به استفاده از درز جدایی در سازه
 - ۵-۶. تهیه گزینه های طرح سازه و تاسیسات و بهسازی زمین
-
- ۶-۱. انتخاب گزینه های مختلف طراحی پی و سازه
 - ۶-۲. وارد نمودن گزینه های مختلف طراحی پی و سازه در مدل عدم قطعیت و تهیه تابع توزیع احتمالاتی فرونشست برای هر یک از گزینه ها
 - ۶-۳. تعیین فرونشست با بیشترین احتمال وقوع برای هر یک از گزینه ها
 - ۶-۴. تخمین خسارت سازه در هر گزینه بر مبنای مقدار فرونشست با بیشترین احتمال وقوع
 - ۶-۵. محاسبه هزینه چرخه عمر گزینه های طراحی
 - ۶-۶. ترسیم نمودار هزینه چرخه عمر بر حسب هزینه اولیه برای گزینه های مختلف و انتخاب طرح منتخب
 - ۶-۷. تکمیل طراحی گزینه منتخب
-

۶. انتخاب گزینه برتر

۲-۱. جمع آوری اطلاعات

در این مرحله اطلاعات مختلف در مورد منطقه مورد بررسی جمع آوری می شود. این اطلاعات باید شامل اطلاعات ژئوتکنیکی، اطلاعات هیدروژئولوژی (همچون عمق آب زیرزمینی و تغییرات آن در سنوات گذشته) و تاریخچه فرونشست منطقه باشد. اطلاعات فرونشست حادث را می توان با استفاده از تداخل سنجی راداری^۱، تراز یابی و سامانه جهت یابی ماهواره ای جهانی^۲ بدست آورد. در همین زمینه سازمان نقشه برداری کشور اطلس های فرونشست برای مناطق مستعد کشور تهیه کرده است که می تواند در این مرحله مورد استفاده قرار گیرد [۹]. همچنین باز دیده های میدانی نیز اطلاعات مفیدی از تاریخچه فرونشست بدست می دهند، به عنوان مثال بیرون زدگی لوله کنار چاه ها در بسیاری مناطق نشان از میزان فرونشست آن منطقه دارد. اطلاعات ژئوتکنیکی شامل لایه بندی جنس خاک منطقه همراه با خصوصیات هر لایه همچون جنس لایه، پارامترهای مقاومتی و پارامترهای سختی هر لایه، عمق سنگ بستر و... می شود.

۲-۲. تهیه مدل کالیبره شده پیش بینی فرونشست

با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده در مرحله پیشین، در این مرحله می توان مدل های فرونشست را تهیه و با استفاده از داده های فرونشست بدست آمده در محله قبل آن ها را کالیبره نمود. معمولاً در این مرحله کم بودن داده ها محدودیت اصلی در کالیبراسیون است مگر در مناطق شهری که مطالعات فراوانی در مورد آن ها صورت گرفته باشد. در صورت عدم وجود اطلاعات قبلی در مناطقی با آب و هوای خشک و پوشش گیاهی کم، استفاده از داده های تداخل سنجی راداری می تواند راهگشا باشد. تحلیل داده ها معمولاً به سه روش صورت می گیرد. در روش اول از روابط تحکیم یک بعدی ترازقی استفاده می شود. در روش دوم مدلسازی عددی تحکیم با برنامه های اجزا محدود تجاری مانند پلکسیس^۳ صورت می گیرد و در روش سوم مدلسازی آبخوان و یا آبخوان ها با برنامه هایی مثل مادفلو^۴ انجام میشود [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. در روش انتهایی سفره آب زیرزمینی را به طور دقیق مدل می کنیم. نتایج این مدل ها را باید با فرونشست قبلی صحت سنجی و کالیبره کنیم و با استفاده از مدل کالیبره شده فرونشست آتی پیش بینی شود.

۲-۳. تهیه مدل غیر قطعی فرونشست با روش های قابلیت اعتماد

^۱ InSAR

^۲ GNSS

^۳ Plaxis

^۴ MODFLOW

در مرحله قبل مدل فرونشست تهیه شد و با استفاده از داده‌های میدانی موجود نظیر اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در روش تداخل سنجی راداری کالیبره گردید. این کالیبراسیون عمدتاً بر مبنای دو متغیر فرونشست کل ثبت شده تا به امروز و همچنین نرخ فرونشست ثبت شده در سال‌های مختلف انجام می‌گردد و بر اساس مدل کالیبره شده می‌توان مقدار فرونشست را در سال‌های آینده پیش‌بینی نمود. مدل مورد بحث با دیدگاه تعینی تشکیل و کالیبره شده است. به عبارت دیگر عدم قطعیت‌های موجود در مسئله فرونشست در این مدل لحاظ نشده است. این در حالی است که این عدم قطعیت‌ها می‌تواند منجر به تغییر نتایج متغیرهای مختلف نظیر مقدار و نرخ فرونشست و همچنین مقدار و نرخ نشست نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده گردد. تهیه مدل غیرقطعی فرونشست می‌تواند محدودیت‌های ذکر شده را تا حدودی مرتفع نماید. پارامترهای ژئوتکنیکی غیرقطعی هستند ولی غیرقطعی‌ترین پارامتر در مسئله فرونشست روند برداشت از آب زیرزمینی و به تبع آن تغییر تراز آب زیرزمینی است. به همین دلیل به سمت روش غیرقطعی می‌رویم.

مدل غیرقطعی فرونشست می‌تواند با روش‌های مختلف تحلیل قابلیت اعتماد اعم از روش‌های احتمالاتی یا غیراحتمالاتی انجام شود. مولفین مقاله حاضر بکارگیری روش ساده و کاربردی "مجموعه‌های منتخب خبره"^۱ [۱۳] را پیشنهاد می‌کنند. در این روش مدل عددی مناسب برای مسئله فرونشست تشکیل می‌شود. سپس متغیرهای دارای عدم قطعیت در مدل مذکور شناسایی شده و بازه‌های مناسب بر اساس نظر خبرگان برای این متغیرها انتخاب می‌شود. با ورود این بازه‌ها به مدل عددی، مقدار پاسخ سیستم یعنی فرونشست زمین به ازای ترکیبات مختلف متغیرهای ورودی حاصل می‌شود و بر اساس آن توزیع احتمالاتی تغییر شکل سطح زمین ترسیم می‌گردد. کلیات مراحل بکارگیری این روش در ادامه ارائه شده است:

- تعریف هندسه مسئله فرونشست و تشکیل مدل عددی مناسب نظیر مدل المان محدود
- انتخاب متغیرهای ورودی مدل عدم قطعیت و اختصاص یک محدوده مورد انتظار به هر یک از متغیرهای مذکور. این متغیرها می‌تواند شامل پارامترهای خاک یا تغییرات تراز آب با گذشت زمان باشد.
- انجام آنالیز حساسیت به منظور شناسایی متغیرهای تاثیرگذار سیستم و کاهش تعداد شبیه‌سازی‌های مورد نیاز
- تشکیل ماتریس محاسبات شامل ترکیب‌های مختلف متغیرهای ورودی مدل عدم قطعیت و ثبت پاسخ مدل یعنی مقدار فرونشست به ازای این ترکیبات
- برازش تابع توزیع مناسب بر روی مقادیر فرونشست محاسبه شده از مدل عدم قطعیت و محاسبه مقدار میانگین و انحراف معیار آن در نهایت بر اساس توزیع احتمالاتی به دست آمده از بکارگیری روش فوق، مقدار فرونشست با بیشترین احتمال وقوع تعیین می‌شود و مبنای بررسی‌های آتی قرار می‌گیرد.

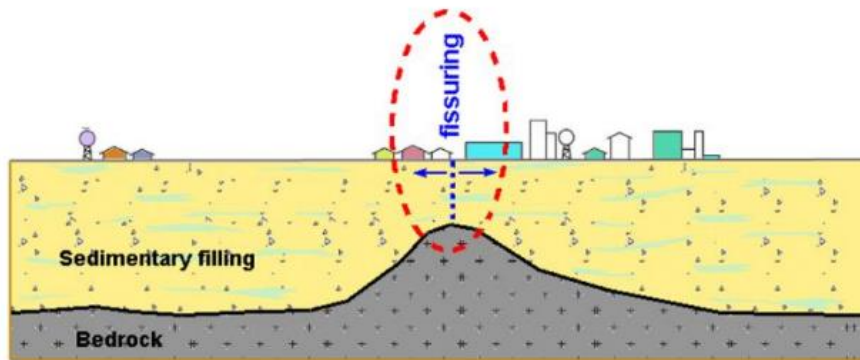
۲-۴. تعیین معیارها و مبانی طراحی پی

در این بخش لازم است ابتدا فرونشست زمین از نشست ساختمان تفکیک و سپس به چند مفهوم اشاره شود. فرونشست زمین را می‌توان با دو مولفه فرونشست حداکثر منطقه و فرونشست غیریکنواخت در منطقه توصیف کرد. برای طراحی سازه لازم است رابطه این دو با نشست غیریکنواخت ساختمان بدست آید. از آنجا که هم‌اکنون آیین‌نامه‌ای برای انتخاب فرونشست مجاز در دسترس نداریم، این کار فقط با بررسی‌های تجربی خرابی ساختمان‌ها در دشت‌های دارای فرونشست قابل حصول است. نشست غیریکنواخت ساختمان برای مستحذاتی مثل راه و راه‌آهن احتمالاً ارتباط نزدیکی با فرونشست غیریکنواخت زمین در منطقه دارد. اما نشست غیریکنواخت ساختمان برای ابنیه بیش‌تر با فرونشست حداکثر در منطقه مرتبط است زیرا ابعاد ساختمان‌ها در مقایسه با ابعاد راه و راه‌آهن ناچیز است. این موضوع توسط قره‌داغی و همکاران [۱۴] برای دشت تهران بررسی شده است. در کتب درسی نسبت نشست غیریکنواخت سازه به حداکثر نشست سازه بین $\frac{3}{4}$ تا $\frac{3}{8}$ پیشنهاد شده است ولی برای فرونشست زمین این مقدار خیلی کم‌تر است، زیرا فرونشست زمین بر خلاف نشست ساختمان نسبتاً یکنواخت اتفاق می‌افتد.

- انتخاب نسبت نشست غیریکنواخت سازه به فرونشست در منطقه

معیار تعیین‌کننده در خرابی پی سازه‌ها نشست غیریکنواخت رخ داده و یا پیش‌بینی شده در آن‌هاست. در فرونشست بسته به منطقه قرارگیری ابنیه مورد بررسی و یا لایه‌بندی خاک زیرین، نسبت میزان نشست غیریکنواخت ساختمان و فرونشست زمین می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال در صورت وجود ابنیه در میانه شکل ۱، که در آن لایه‌بندی خاک و سنگ‌بستر غیریکنواخت است، این نسبت عدد بزرگ‌تر از حالتی خواهد بود که ابنیه در سمت چپ شکل ۱ قرار گیرند. مقدار این نسبت را می‌توان با اندازه‌گیری نشست غیریکنواخت ساختمان در مناطق مختلف و اندازه‌گیری فرونشست زمین در همان منطقه بدست آورد. قره‌داغی [۱۵] این نسبت را برای دشت تهران برابر ۱ به ۶۰ بدست آورد.

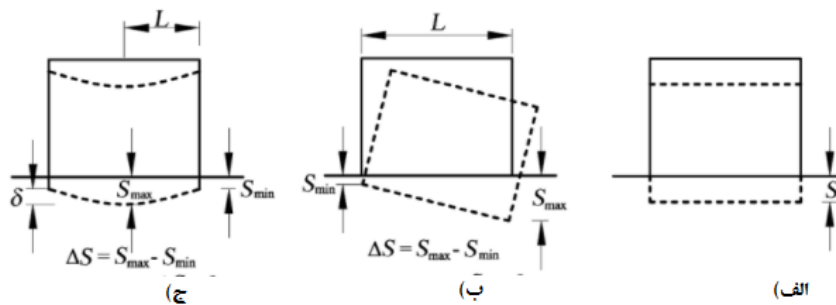
^۱ Expert Selected Set



شکل ۱ - تاثیر لایه بندی خاک بر فرونشست [۱۶]

• انتخاب نشست غیریکنواخت مجاز سازه با توجه به نوع سازه و خاک

در شکل ۲ تعریف نشست غیریکنواخت ساختمان ارائه شده است. تعیین نشست غیریکنواخت مجاز یک ساختمان به عوامل مختلفی از جمله کاربرد سازه، نوع سازه، جنس خاک و مکانیزم نشست، نوع پی، روش و زمان اجرا و ... بستگی دارد. به طور کلی تغییر شکلی که به نحوی پایداری، ظاهر و عملکرد سازه را مختل سازد غیرمجاز است. نشست غیریکنواخت مجاز ساختمان به فرونشست ارتباط مستقیم نظری ندارد بلکه از خصوصیات سازه و نوع خاک است. در اینجا برای طراحی در برابر فرونشست در جهت سادگی می توان از جداول نشست غیریکنواخت مجاز ارائه شده در منابع مختلف استفاده کرد. محققان بسیاری به بررسی نشست غیرمجاز سازه پرداختند. از جمله این بررسی ها میتوان از اسکمپتون^۱ و مک دنالد^۲ [۱۸]، گرت^۳ و همکاران [۱۹] و کلیپکوف^۴ [۲۰] نام برد. مولفان در این پژوهش استفاده از مقادیر پیشنهاد شده بوسیله کلیپکوف [۲۰] را پیشنهاد می کنند.



شکل ۲ - نشست کل و نشست غیریکنواخت ساختمان، (الف) نشست یکنواخت (ب) نشست غیریکنواخت به صورت کج شدگی (ج) نشست غیریکنواخت به صورت کاسه ای [۱۷]

• انتخاب فرونشست حداکثر مجاز در محل پروژه

در این مرحله با استفاده از داده های بدست آمده از دو مرحله قبل (نسبت نشست غیریکنواخت ساختمان به فرونشست زمین و همچنین مقدار نشست غیریکنواخت مجاز ساختمان) مقدار فرونشست مجاز منطقه بدست می آید. این فرونشست بدست آمده نشان دهنده میزان فرونشستی است که در صورت حادث شدن در آن منطقه سازه هایی که بر اساس موازین مهندسی طراحی و اجرا شده باشند دچار مشکل نخواهند شد. در صورتی که پیشبینی فرونشست منطقه بیش از میزان فرونشست مجاز بدست آید لازم است بر اساس نوع سازه با بکار بردن تمهیدات خاص میزان تحمل سازه را بیشتر کرد. به عنوان نمونه در صورت استفاده از پی منفرد نشست غیریکنواخت مجاز ۲ cm است، در صورت در نظر گرفتن نسبت ۱ به ۶۰ میزان فرونشست مجاز زمین برابر

¹ Skempton

² MacDonald

³ Grant

⁴ Klepikov

با ۱/۲ متر بدست می‌آید با تغییر نوع پی از منفرد به شبکه‌ای یا گسترده می‌توان مقدار فرونشست مجاز را افزایش داد. البته این مقدار شامل لوله کشی و تاسیسات ورودی و خروجی ساختمان نمی‌شود.

۲-۵. طراحی گزینه های مختلف برای پی و سازه

در این مرحله با توجه به نشست غیریکنواخت مجاز ساختمان و فرونشست پیشینی شده می‌توان پی سازه را طراحی کرد. در ادامه روش‌های مختلفی که می‌توان از آن‌ها در طراحی پی سازه استفاده کرد معرفی و شرح داده خواهند شد. از آنجایی که این مقاله در مورد ابنیه و ساختمان‌های معمولی است برخی توصیه‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

- پرهیز از پی منفرد در مناطق دارای فرونشست

توصیه می‌شود تا در مناطق با پتانسیل فرونشست از اجرای پی منفرد خودداری شود. نسبت نشست حداکثر به نشست غیریکنواخت برای پی منفرد برابر ۴ به ۳ و در پی گسترده برابر ۸ به ۳ است [۲۱]، لذا با تبدیل پی منفرد به پی گسترده تاب‌آوری در برابر نشست و همچنین فرونشست افزایش می‌یابد.

- توصیه به استفاده از پی شبکه‌ای و پی گسترده صلب

پی‌های شبکه‌ای و گسترده در دو راستای عمود بر هم دارای صلبیت خمشی هستند و هرچه صلبیت‌تر باشند بهتر می‌توانند از نشست‌های غیریکنواخت جلوگیری کنند. در این مقاله توصیه می‌شود در مناطقی که سوابق فرونشست و خرابی‌های ناشی از آن زیاد است، پی شبکه‌ای یا گسترده صلب بکار گرفته شود. نسبت مجموع سختی پی و روسازه به سختی خاک را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [۲۱]:

$$K_r = \frac{EI_b}{E_s B^3}$$

که در آن EI_b ، مجموع سختی خمشی روسازه و پی برای واحد عرض؛ E_s مدول الاستیسیته خاک؛ B مدول الاستیسیته بتن و B عرض پی در امتداد عمود بر راستای مورد بررسی است. ضرایبی بر اساس این نسبت برای تبدیل نشست پی به نشست غیریکنواخت ارائه شده است [۲۱] هر چه این نسبت بزرگتر باشد میزان نشست غیریکنواخت کم‌تر می‌شود و در صورتی که این نسبت سختی بیش‌تر از ۰/۵ باشد پی گسترده صلب محسوب می‌شود.

- توصیه به استفاده از پی عمیق در مناطق مستعد شکاف فرونشست

یک روش متداول برای کاهش نشست کل و غیریکنواخت استفاده از پی عمیق و انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر و با تراکم‌پذیری کم‌تر است. حتی اگر سختی لایه‌های عمیق‌تر مانند لایه‌های سطحی باشد انتقال بار به لایه‌های پایینی می‌تواند به دلیل وجود تنش موثر بیش‌تر در آن لایه‌ها موجب کاهش نشست شود. در مناطق مستعد فرونشست، کارکرد اصلی پی عمیق انتقال پی به اعماقی با نشست کم‌تر است. در نواحی که شکاف اتفاق افتاده و احتمال عمیق‌تر شدن آن وجود دارد (در شکل ۱ یکی از شرایط تشکیل شکاف فرونشست ارائه شده است). و در نواحی که احتمال بروز شکاف وجود دارد توصیه می‌شود که از پی عمیق استفاده شود و نوک شمع به نقطه‌ای برسد که نشست چندانی ندارد. عمق شمع باید به گونه‌ای انتخاب شود که نشست در حد مجاز باشد و نیازی به بیش‌تر شدن عمق شمع از عمق شکاف نیست.

- توصیه به استفاده از پی گسترده بعلاوه توده بهسازی شده

در این روش با استفاده از روش‌های بهسازی مانند اختلاط عمیق، جت گروتینگ، ستون بتنی غیرمسلح و... یک توده با مقاومت زیاد در زیر پی ایجاد می‌شود. این روش بر خلاف روش پی عمیق، که در آن بار از طریق المان‌های شمع به عمق انتقال پیدا می‌کند و شمع‌ها با سرشمع به یکدیگر متصل هستند، تنها بر المان‌های بهسازی مبتنی نیست لذا المان‌های ایجاد شده مستلزم به رعایت معیارهای سبکتری هستند. برای انتقال بهتر بار از پی سازه به المان‌ها و کاهش نشست‌های غیر یکنواخت، لایه‌ای به عنوان سکوی انتقال بار بر روی المان‌ها اجرا می‌گردد.

- توصیه به استفاده از درز جدایی در سازه

یکی از روش‌های کم کردن حساسیت ساختمان به نشست غیریکنواخت، اجرای درز انقطاع در پی است. این درز باید در کل ارتفاع سازه ادامه یابد. در صورتی که ساختمان در زمین سست اجرا شود و طول یا عرض بزرگی داشته باشد، اجرای درز انقطاع ضرورت بیشتری می‌یابد. همچنین می‌توان درز انقطاع و درز انبساط سازه را ترکیب کرد [۲۱]. در شکل ۳ نمونه‌ای از بکارگیری درز سازه‌ای و اثرات آن بر افزایش تاب‌آوری سازه در برابر فرونشست ارائه شده است. این تصویر مربوط به کلیسای سن فرانسیسکو^۱ در شهر سلايا^۲ در مرکز کشور مکزیک می‌باشد. در این منطقه فرونشست قابل توجه زمین به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرسطحی از چاه‌ها رخ داده است. مولفین بر مبنای قضاوت مهندسی توصیه می‌کنند در مناطق بحرانی از نظر

¹ San Francisco Convento

² Celaya

فرونشست، فاصله درزها برای ساختمان‌ها حدود ۲۰ متر باشد. با توجه به اینکه ابعاد خیلی از ساختمان‌های معمولی کم‌تر از 20×20 متر است، نیازی به استفاده از درز جدایی در آن‌ها نیست.



شکل ۳- مثالی از اثر درز سازه‌ای بر کنترل اثرات مخرب فرونشست غیریکنواخت [۲۲]

• تهیه گزینه‌های طرح سازه و تاسیسات و بهسازی زمین

برای هر گزینه طرح‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. این طرح‌ها می‌تواند شامل پی منفرد، پی گسترده انعطاف‌پذیر، پی صلب و ... باشد. بدیهی است که اجرای پی منفرد بسیار ارزان‌تر از سایر روش‌ها (برای مثال پی گسترده صلب) است. در بخش بعدی نحوه انتخاب طرح نهایی تشریح خواهد شد.

۲-۶. انتخاب گزینه برتر

در این مرحله ریسک مورد انتظار هر یک از گزینه‌های ذکر شده در مرحله قبل برای طراحی پی و سازه بر مبنای نتایج تحلیل‌های قابلیت اعتماد و ارزیابی خسارت محاسبه می‌شود. سپس هزینه چرخه عمر^۱ هر گزینه از مجموع هزینه اولیه یا هزینه ساخت آن گزینه، هزینه ریسک و هزینه‌های نگهداری در دوران عمر به دست می‌آید. نهایتاً گزینه‌ای که کمترین هزینه چرخه عمر را داشته باشد به عنوان گزینه منتخب نهایی می‌شود. این روش طراحی پیش از این برای گودبرداری‌های عمیق شهری به کار گرفته شده است و ارزیابی آن بر روی مطالعات موردی حاکی از کاربردی بودن آن می‌باشد [۲۳، ۲۴]. امکان بکارگیری روش گام‌های این مرحله در ادامه ارائه شده است:

- انتخاب گزینه‌های مختلف طراحی پی و سازه بر اساس توضیحات ذکر شده در بخش ۲-۵ به گونه‌ای که هر یک از گزینه‌ها به صورت کمی تشریح شود و قابل مدلسازی باشد.
- وارد نمودن 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 بر مبنای توزیع احتمالاتی فرونشست محاسبه شده در گام قبل برای هر یک از گزینه‌ها
- تخمین خسارت سازه بر مبنای مقدار فرونشست با بیشترین احتمال وقوع شامل خسارات مستقیم (مانند هزینه تعمیر سازه) و غیرمستقیم (مانند هزینه‌های تامین موقت سازه جایگزین به جای سازه آسیب دیده)

^۱ Life Cycle Cost



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۲۰ و ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۱

دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران



- محاسبه هزینه چرخه عمر هر یک از گزینه‌های طراحی برابر با مجموع هزینه اولیه یا هزینه ساخت هر گزینه، هزینه خسارت مورد انتظار و هزینه نگهداری گزینه در دوران عمر
- ترسیم نمودار هزینه چرخه عمر بر حسب هزینه اولیه برای گزینه‌های مختلف طراحی و انتخاب گزینه با کمترین هزینه چرخه عمر به عنوان گزینه منتخب طراحی پی و سازه
- تکمیل طراحی گزینه منتخب شامل جزییات طرح با رعایت ملاحظات مربوط به تعمیرات احتمالی مورد نیاز سازه در دوران بهره‌برداری

۳. بحث

اگرچه فرونشست از دیدگاه صدماتی که به آبخوان و شرایط زیست‌محیطی منطقه وارد می‌کند بسیار مخرب بوده و باید با روش‌های گوناگون از آن جلوگیری کرد، اما به دلیل اینکه در بسیاری از مناطق کشور با فرونشست مواجه هستیم لازم است ساختمان‌های موجود که دچار آسیب شده‌اند را تعمیر و ساختمان‌های جدید را با توجه به ملاحظات فرونشست طراحی کرد. برخلاف نگرانی‌های رایج، طراحی ساختمان برای مقابله با فرونشست امکان‌پذیر است. برای طراحی باید فرونشست مجاز تعیین شود و گزینه‌های مختلف پی مثل پی سطحی منفرد، پی گسترده، پی گسترده همراه با بهسازی زمین و پی عمیق بررسی و با توجه به هزینه‌های خرابی و محاسبه ریسک گزینه برتر انتخاب شود. این توضیح لازم است که حتی در مناطقی که دچار شکاف‌های فرونشستی می‌شوند با تحلیل دقیق شکاف می‌توان از پی عمیق استفاده کرد. نوک پی عمیق باید در عمقی باشد که نشست آن در حد مجاز ارزیابی شود.

۴. نتیجه‌گیری

- الف) برای طراحی پی در مناطق دارای فرونشست تا زمانی که آیین‌نامه‌ای برای این کار در دسترس نیست باید فرونشست مجاز بر مبنای بررسی‌های محلی تعیین شود. مثالی از روش کار در این مقاله ذکر شد.
- ب) برای طراحی و انتخاب پی در مناطق دارای فرونشست توصیه شد که (۱) پی منفرد به کار نرود، (۲) برای ابعاد بیش از ۲۰ متر از درز جدایی استفاده شود و (۳) در مناطق با احتمال شکاف از پی عمیق استفاده شود.
- ج) اگرچه عدم قطعیت‌های مختلف در متغیرهای ژئوتکنیکی وجود دارد اما مهم‌ترین متغیر نامطمئن در طراحی پی در مناطق دارای فرونشست عبارت از مصرف آب زیرزمینی در یک منطقه و تغییرات تراز آب زیرزمینی در آینده است، به همین دلیل طراحی پی بر اساس ریسک توصیه شد. مولفین روش مجموعه‌های منتخب خیره را برای تحلیل اعتمادپذیری و روش هزینه چرخه عمر را برای تعیین و طراحی گزینه برتر پیشنهاد دادند. زیرا سادگی و دقت لازم برای کارهای حرفه‌ای را دارند.
- د) چارچوب گام به گام طراحی در مناطق دارای فرونشست شامل ۶ مرحله برای طراحی پی پیشنهاد شد.

۵. مراجع

1. Zeitoun, D. G., & Wakshal, E. (2013), "Land subsidence analysis in urban areas: the Bangkok metropolitan area case study", Springer Science & Business Media.
2. Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021), "Land subsidence: A global challenge", Science of The Total Environment, 146193.
3. Ye, S., Xue, Y., Wu, J., Yan, X., & Yu, J. (2016), "Progression and mitigation of land subsidence in China", Hydrogeology Journal, 24(3), 685-693.
4. Mahmoudpour, M., Khamchian, M., Nikudel, M., & Gassemi, M. (2013), "Characterization of regional land subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran", Geopersia, 3(2), 49-62.
5. Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., & Garfias, J. (2011), "Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley", Mexico, Advances in Water Resources, 34(1), 83-97.



6. Cao, G., Han, D., & Moser, J. (2013), "Groundwater exploitation management under land subsidence constraint: empirical evidence from the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain, China", *Environmental management*, 51(6), 1109-1125.
7. Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008), "Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation" *Geophysical Research Letters*, 35(16).
8. Mohammady, M., Pourghasemi, H. R., & Amiri, M. (2019), "Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): A comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms", *Natural Hazards*, 99(2), 951-971.
۹. سازمان نقشه‌برداری کشور (۱۳۹۸)، "اطلس‌ها و نقشه‌های فرونشست"، سایت سازمان نقشه‌برداری کشور، https://www.ncc.gov.ir/fa/publications/Atlases/Specific_Atlases/Subsidence_atlases_maps.
10. Leake, S. A., & Galloway, D. L. (2007), "MODFLOW ground-water model: User guide to the subsidence and aquifer-system compaction package (SUB-WT) for water-table aquifers", US Geological Survey.
11. Burbey, T. J., & Helm, D. C. (1999), "Modeling three-dimensional deformation in response to pumping of unconsolidated aquifers", *Environmental & Engineering Geoscience*, (2), 199-212.
12. Hsieh, P. A. (1996), "Deformation induced changes in hydraulic head during ground water withdrawal", *Groundwater*, 34(6), 1082-1089.
13. Arabaninezhad, A. & Fakher, A. (2021), "A practical method for rapid assessment of reliability in deep excavation projects", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(1), 335-357.
14. Gharehdaghi, M., Fakher, A., & Cheshomi, A. (2019). "The Combined Use Of Long-term Multi-sensor Insar Analysis And Finite Element Simulation To Predict Land Subsidence", *Gottingen: Copernicus GmbH*.
۱۵. قره داغی خواجه غیاثی، م. (۱۳۹۸)، "ارزیابی ریسک فرونشست در سطح تهران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران.
16. Gambolti, G., & Teatini, P. (2021), "Land Subsidence and its Mitigation", *The Groundwater Project*.
17. Rao, N. K. (2010). *Foundation design: theory and practice*. John Wiley & Sons.
18. Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956), "The allowable settlements of buildings. Proceedings of the Institution of Civil Engineers", 5(6), 727-768.
19. Grant, R., Christian, J. T., & Vanmarcke, E. H. (1974), "Differential settlement of buildings. Journal of the Geotechnical Engineering Division", 100(9), 973-991.
20. Klepikov, S. N. (1989), "Performance criteria-allowable deformations of buildings and damages", *Proc. 12th ICSMFE. General Rep., Rio de Janeiro, Brazil*, 5, 2735-2744.
۲۱. فاخر، ع. (۱۳۹۰)، "مهندسی پی پیشرفته"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران.
22. IGCP 641 M3EF3 (2015), "photos of M3EF3 sites", <https://www.igcp641.org/m3ef3-sites/>.
23. Askarian, S. & Fakher, A. (2021), "Design of deep urban excavations using life cycle cost in comparison with acceptable risk and conventional method", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 112, 103868
۲۴. عسکریان، س. (۱۴۰۰)، "روش‌های طراحی سیستم پایدارسازی گود بر اساس تحلیل ریسک"، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه تهران.