

رده‌بندی ریسک سازه‌های سطحی و بررسی عملکرد شمع درجا در کاهش نشست‌های ناشی از حفر تونل‌های مترو در مناطق شهری (مطالعه موردی: متروی تبریز)

امیر حسن رضائی فرعی*، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی

آذربایجان، تبریز

علی اکبر احترامی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان،

تبریز

Email: rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۲

چکیده

احداث مترو، همچون تمام پروژه‌های عمرانی، آثار و پی‌آمدهای اجتماعی و فنی دارد که شاید قابل توجه‌ترین اثر فنی آن تأثیر نشست‌های سطحی ناشی از حفر تونل‌ها و احداث ایستگاه‌های زیرزمینی بر سازه‌های سطحی می‌باشد. در مقاله حاضر، با انجام مدل‌سازی عددی و کاربرد نرم‌افزار المان محدود Plaxis8.6، به تعیین و ارزیابی رده ریسک سازه‌های سطحی با تعداد طبقات و عرض‌های متفاوت پرداخته شده است. به دلیل تأثیر زیاد پارامترهای هندسی تونل و مشخصات ژئوتکنیک خاک پیرامون آن بر میزان تغییرشکل‌های حاصل، محدوده مجاور ایستگاه چهار خط ۲ متروی تبریز به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده است. سازه‌های سطحی این منطقه عموماً دارای عرض کم بوده و بر اساس نتایج حاصل دارای رده ریسک بالا می‌باشند. مدل‌سازی سازه‌های سطحی بدون و با در نظر گرفتن سختی سازه، به روش تیر الاستیک معادل، انجام گرفته است. به دلیل تأثیر زیاد سختی سازه‌ها در مدل‌سازی به روش تیر الاستیک معادل، رده ریسک حاصل از این روش غیرمحافظة کارانه می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های محیطی و اجرایی منطقه، احداث شمع بتنی درجاریز با متغیرهای طول و فاصله اجرا از هم به عنوان اقدام تحکیمی مناسب انتخاب و تحلیل شده است. بر اساس نتایج حاصل و مقایسه رده ریسک اولیه سازه‌ها با مقادیر بعد از اقدام تحکیمی، رده ریسک سازه‌های سطحی از ۳ به ۲ کاهش می‌یابد که نشانگر عملکرد موفق این روش است. در عملکرد این اقدام تحکیمی، تأثیر طول شمع‌های بتنی به مراتب بیشتر از فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها بود. این امر ناشی از سختی قابل صرف‌نظر شمع بتنی در مقایسه با سختی تیر معادل سازه سطحی می‌باشد. همچنین، با تحلیل بیش از ۲۲۰ مدل عددی، تأثیر مدل رفتاری خاک، درصد انقباض تونل و عرض خیابان بر میزان نشست‌های حاصل و عملکرد روش تحکیمی نیز بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: تونل‌سازی مکانیزه، اقدام تحکیمی، رده‌بندی ریسک، سازه‌های سطحی، شمع بتنی درجا

۱. مقدمه

ایران در سطح جهان به عنوان کشوری در حال توسعه شناخته می‌شود و بار اصلی توسعه در چنین ممالکی بر دوش کلان‌شهرهای آن می‌باشد. تبریز به عنوان یکی از شهرهای اصلی ایران می‌باشد که به علت موقعیت ژئواستراتژیک خود در حال توسعه فیزیکی روزافزون بوده و بی‌شک اساس توسعه در حمل و نقل ایمن، کم‌هزینه، سریع و پاک است. با افزایش تقاضای سفرهای درون شهری و افزایش حجم تردد خودروها و مشکلات ناشی از ازدحام و تراکم آن‌ها، استفاده از فضاهای زیرزمینی به منظور ایجاد خطوط حمل و نقل شهری از جمله تونل‌های بزرگراهی و مترو، به یکی از راه‌کارهای حل بخشی از مشکلات ترافیکی و استفاده بهینه از زمین تبدیل شده است. علی‌رغم تمامی مزایای استفاده از فضای زیرزمینی، ساخت تونل‌ها، به‌ویژه در زمین‌های نرم، سبب ایجاد حرکات ناگزیر در زمین در اثر بهم خوردگی تنش‌ها می‌شود. در نواحی شهری، چنین حرکتی می‌تواند سازه‌های موجود را تحت تأثیر قرار دهد. نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین سبب آسیب به سازه‌های سطحی مانند ساختمان‌های موجود بالای تونل و نشست‌های زیرسطحی سبب آسیب به سازه‌های مدفون از قبیل خطوط انتقال نیرو، آب، فاضلاب و گاز خواهد شد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۴). بنابراین، پیش‌بینی حرکات زمین و ارزیابی خطرات آسیب به سازه‌ها یک بخش مهم از طراحی و ساخت پروژه‌های تونل‌سازی در نواحی شهری است. در این خصوص، تونل‌های خطوط مترو که معمولاً در بخش‌های فرسوده و متراکم محیط‌های شهری ایجاد شده و از عمق کمی برخوردار هستند، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند.

مطالعات زیادی در خصوص نشست‌های ناشی از تونل‌سازی، الگوی تعیین رده ریسک سازه‌های سطحی و همچنین روش‌های مختلف کنترل و کاهش میزان تغییرشکل‌ها و آسیب‌های وارده بر سازه‌های سطحی انجام یافته است. به‌عنوان نمونه، با انجام مدل‌سازی

عددی، کاتبی و سعیدین (۱۳۸۹) ارتباط بین نشست سطح زمین ناشی از تونل‌سازی و مشخصه‌هایی نظیر وزن واحد خاک، مدول الاستیسیته، قطر و عمق تونل و برخی کمیت‌های دیگر را مورد مطالعه قرار دادند. طبق مطالعات آن‌ها، مهم‌ترین عامل بروز نشست در سطح زمین، به وجود آمدن فضای خالی بین پوشش نصب شده توسط ماشین حفار و سطح داخلی تونل حفر شده می‌باشد که در صورت بروز وقفه در عملیات تزریق، میزان نشست‌ها به شدت افزایش خواهد یافت. وحدتی‌راد و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز روی یک مرکز تجاری زیرزمینی پرداخته و با تخمین میزان نشست حاصل با روش‌های تجربی و مدل‌سازی عددی، رده‌بندی ریسک این سازه را تعیین نمودند. نتایج روش‌های تجربی نشان‌دهنده این بود که در اثر حفر تونل، ۵۰ میلی‌متر نشست در کف سازه مدفون رخ داده و رده ریسک ۴ برای آن تخصیص داده می‌شود. در حالی که مطالعه عددی نشان‌دهنده ۴۶ میلی‌متر نشست و رده ریسک ۳ برای آن بوده است. بررسی‌های بسیاری نیز توسط محققین در زمینه تأثیر حفاری تونل بر پی‌های عمیق سازه‌های موجود صورت گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به مطالعات لوگاناتان و همکاران (۲۰۰۱) و کیتی‌بودوم و همکاران (۲۰۰۵) اشاره نمود که به بررسی رفتار شمع‌های تکی و گروهی و همچنین پی‌های گسترده متکی بر شمع‌ها در حین عملیات حفاری تونل پرداختند. اندرکنش بین تونل و سازه‌های مجاور در خاک‌های نرم با روش المان محدود و مدل‌سازی سه بعدی توسط مروه و شهرور (۲۰۰۳) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، اثر اندرکنش خاک و سازه با مشاهده پاسخ تیرهای آلومینیومی با سختی‌های مختلف به تونل‌سازی با کاربرد مدل‌های سانتریفیوژ توسط فارل و مایر (۲۰۱۰) بررسی گردیده است.

در خصوص ارزیابی آسیب وارد بر سازه‌های سطحی در نتیجه نشست‌های ناشی از عملیات گودبرداری و حفاری تونل، طبقه‌بندی‌های مختلفی ارائه

ناحیه پشت دیوار دیافراگمی بودند که با افزایش عمق دیوار نشست نیز کاهش می‌یافت. بی‌لوتا و روسو (۲۰۱۱)، در یک مطالعه عددی سه‌بعدی با نرم‌افزار پلکسیس، به بررسی کاهش نشست سطح زمین و سازه‌های سطحی بنایی با احداث شمع و دیوار دیافراگمی در فاصله مشخصی از تونل پرداختند. بر اساس مطالعات آن‌ها، با افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها، کرنش متوسط افقی در خاک کاهش یافته و این عاملی برای محدود نمودن جابجایی‌های سازه می‌باشد. فاترا و همکاران (۲۰۱۶) یک مطالعه عددی در موضوع نشست زمین در اثر حفر تونل و کاهش نشست سازه‌ها با احداث دیوار دیافراگمی بین سازه و تونل انجام دادند که طبق مطالعه آن‌ها نیز با افزایش عمق دیوار دیافراگمی، میزان نشست سازه‌ها کمتر می‌شد.

با توجه به اهمیت ارزیابی ریسک سازه‌های سطحی و موارد فوق الذکر، در تحقیق حاضر سعی گردیده با انجام مدل‌سازی عددی و تعیین مقادیر نشست‌های سطحی حاصل از حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز، رده ریسک سازه‌های مجاور در محدوده ایستگاه ۴ مسیر (کیلومتر از ۵+۹۰۰ الی ۶+۲۰۰) محاسبه شود. با توجه به محدودیت‌های اجرایی در منطقه، اجرای شمع‌های درجای بتنی بین مسیر تونل و بناهای سطحی به‌عنوان روش مناسب تحکیم انتخاب شده و عملکرد احداث شمع‌های بتنی در جاریز با متغیرهای طول و فاصله اجرا از هم در کنترل جابجایی‌ها و کاهش رده ریسک سازه‌های سطحی مورد تحلیل قرار گرفته است. استفاده از این تکنیک به‌عنوان روشی مؤثر توسط جنز و همکاران (۲۰۰۶) و همچنین دی‌ماریانو و همکاران (۲۰۰۷) نیز توصیه شده است.

۲. مطالعه موردی

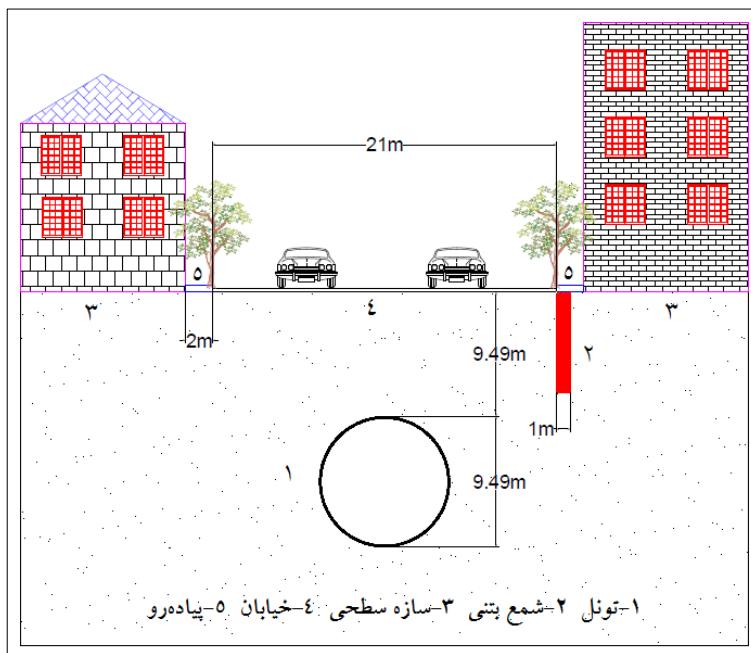
خط ۲ متروی تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر، منطقه قراملک در غرب تبریز را به نمایشگاه بین‌المللی تبریز در شرق آن متصل خواهد کرد (کاتبی و سعیدین،

شده است. بورلند و همکاران (۱۹۷۷) یک طبقه‌بندی را برای سازه‌های با پی گسترده بر مبنای کرنش کششی آستانه متناظر با بهره‌برداری ساختمان ارائه کردند. بوسکاردین و کوردینگ (۱۹۸۹) بر اساس نتایج مطالعات موردی برای سازه‌های بنایی، چارتی را بر مبنای کرنش افقی و نسبت انحنا (نسبت انحراف وسط دهانه به طول ساختمان، یا به عبارتی اعوجاج زاویه‌ای) ارائه نمودند که آسیب وارد بر سازه‌ها را به پنج گروه و الگو تقسیم‌بندی می‌کرد. در ادامه، بورلند (۱۹۹۵) و پس از آن مایر و همکاران (۱۹۹۶) الگوی آسیبی را برای ساختمان‌ها بر مبنای نسبت انحنا برای بخش‌های مختلف بنا واقع در ناحیه مقعر و محدب پروفیل نشست عرضی حالت زمین آزاد (بدون وجود سازه‌های سطحی) ارائه کردند. در الگوی پیشنهادی، ناحیه صفر متناظر با درجه شدت آسیب قابل صرف‌نظر و ناحیه مربوط به الگوهای ۴ و ۵ متناظر با درجه شدت آسیب شدید تا بسیار شدید می‌باشد. بر اساس پیشنهاد آن‌ها، در عمل، برای سازه‌های واقع در الگوی ۳ و بیشتر، تأثیرات تونل‌سازی باید در نظر گرفته شود و اقدامات پیشگیرانه مناسب انجام گیرد. همچنین، برای بررسی تأثیر سختی سازه‌ها، پاتز و ادنبروک (۱۹۹۷) یک تحلیل المان محدود پارامتریک با مدل‌سازی ساختمان‌های سطحی به‌صورت یک تیر معادل الاستیک بدون وزن انجام داده و بر اساس مقادیر متفاوت سختی سازه‌ها، ضرایب اصلاح متناظر نسبت به طبقه‌بندی ارائه شده بر مبنای پروفیل تغییرشکل حالت زمین آزاد ارائه نمودند. در ادامه کارهای آن‌ها، فرانزیوس (۲۰۰۳) تحلیل‌های کامل‌تری را با در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر، از قبیل وزن ساختمان‌ها، انجام داد.

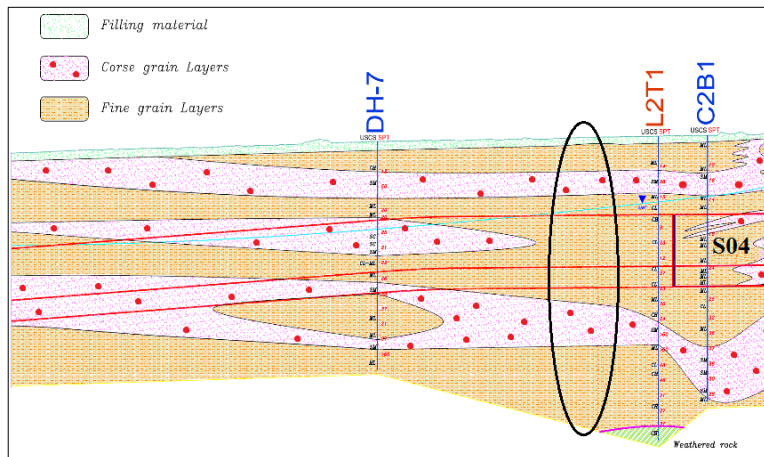
از مهمترین مطالعات انجام یافته در خصوص روش‌های کاهش تأثیرات نشست‌های ناشی از حفاری تونل بر سازه‌های سطحی، لی و یو (۲۰۰۶) در یک مدل فیزیکی، نشست‌های سطح زمین ناشی از حفر تونل را مطالعه کردند و در ادامه با احداث دیوار دیافراگمی در مجاورت تونل، شاهد کاهش نشست سطح زمین در

همراه عرض کم خیابان و نزدیک بودن محور تونل به سازه‌های سطحی، ضرورت مطالعه در خصوص میزان آسیب‌پذیری سازه‌های سطحی را نشان می‌دهد. شکل ۱ تصویری شماتیک از وضعیت هندسی تونل و سازه‌های مجاور را نشان می‌دهد. در شکل ۲، پروفیل ژئوتکنیک منطقه مورد مطالعه (کیلومتر از ۵+۹۰۰ الی ۶+۲۰۰) نمایش داده شده و در جدول ۱ مشخصات ژئوتکنیک خاک پیرامون تونل در مقطع انتخابی ارائه گردیده است.

این خط دارای ۲۰ ایستگاه بوده و قطر حفاری تونل آن ۹/۴۹ متر می‌باشد. ایستگاه شماره ۴ این خط در تقاطع خیابان‌های جهاد و آخونی قرار دارد که ناحیه مجاور این ایستگاه به دلیل شرایط خاص آن در طول مسیر به‌عنوان مطالعه موردی در تحقیق حاضر انتخاب شده است. در این ناحیه، نسبت سربار به قطر تونل تقریباً برابر ۱، که کمترین مقدار در مسیر مکانیزه است، می‌باشد. علاوه بر آن، وجود بافت فرسوده و قدیمی، نوع خاک منطقه و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، به



شکل ۱. تصویر شماتیک وضعیت هندسی تونل و سازه‌های مجاور



شکل ۲. پروفیل ژئوتکنیک مسیر از کیلومتر از ۵+۹۰۰ الی ۶+۲۰۰ و مقطع انتخابی برای مدل‌سازی عددی

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیک لایه‌های زمین در مقطع انتخابی برای مدل‌سازی عددی

عمق متوسط لایه (m)	۰-۴	۴-۸	۸-۲۴	۲۴-۳۰	۳۰-۷۰
جنس غالب	سیلتی	ماسه‌ای	سیلتی-رسی	ماسه‌ای-سیلتی	سیلتی-رسی
γ_{unsat} (kN/m ³)	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۸	۱۷/۵
γ_{sat} (kN/m ³)	۱۸/۵	۱۹	۱۹	۱۹/۵	۱۹/۵
C (kN/m ²)	۱۵	۱۵	۲۵	۲۵	۳۵
ϕ (degree)	۲۳	۲۷	۲۵	۲۹	۲۷

۳. مدل‌سازی عددی

با پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری رایانه‌ها در دهه‌های اخیر، استقبال از مطالعات مهندسی با روش‌های عددی بیشتر شده است. روش‌های عددی بر مبنای گسسته‌سازی به دو روش حجمی و مرزی تقسیم می‌شوند که روش المان محدود و تفاضل محدود از مهم‌ترین روش‌های المان‌بندی حجمی می‌باشند (پنجی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعه حاضر، به منظور تخمین جابجایی‌ها و نشست‌های سطحی ناشی از حفاری تونل، از نرم‌افزار توانمند المان محدود پلکسیس استفاده شده است که قابلیت مدل‌سازی خاک، عضو سازه‌ای، اندرکنش بین خاک و سازه و تحلیل سازه‌های ژئوتکنیک پیچیده را دارا می‌باشد. با توجه به تعداد زیاد پارامترهای دخیل در موضوع برای مشخصات هندسی تونل (از قبیل قطر، نسبت سربار به قطر و مشخصات پوشش تونل)، پارامترهای مختلف دستگاه (از قبیل قطر حفاری و میزان اضافه حفاری)، وضعیت سازه‌های سطحی و مشخصات ژئوتکنیک خاک مسیر از مشخصات پروژه خط ۲ متروی تبریز استفاده شده است تا پارامترهای انتخاب شده منطبق بر واقعیت باشد. در جدول ۲، مشخصات در نظر گرفته شده برای پوشش تونل در مدل‌سازی عددی ارائه شده است.

موقعیت مرزهای جانبی طوری انتخاب گردیده که وجود مرزهای مصنوعی تأثیر قابل ملاحظه در میدان تنش- کرنش- فشار منفذی نداشته باشد. به عبارت دیگر،

ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که افزایش ابعاد بیش از مقادیر انتخاب شده تأثیر قابل ملاحظه‌ای را در میزان تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در توده خاک پیرامون تونل و سازه‌های سطحی نداشته باشد. شرایط مرزی، نوع المان و تراکم المان‌ها نیز بر اساس تحلیل حساسیت انتخاب گردیده به طوری که نتایج تحت تأثیر قرار نگیرند. جهت افزایش دقت محاسبات، شبکه‌بندی در نواحی مجاور تونل و سازه‌های سطحی ریزتر انتخاب شده است. مش‌بندی مدل به میزان حداقل ۵ برابر قطر تونل پایین‌تر از کف تونل امتداد یافته و به‌طور جانبی ۷ برابر قطر تونل نسبت به مرکز تونل امتداد داده شده که این ابعاد جانبی با توصیه‌های محققین قبلی نیز دارای تطابق مناسبی است (پاتز و همکاران، ۲۰۰۱). در نهایت، مدل به‌دست آمده دارای ۷۰ متر عمق و ۱۴۰ متر عرض می‌باشد. در شکل ۳ نمونه‌ای از مش‌بندی مدل‌های مورد تحلیل نمایش داده شده است.

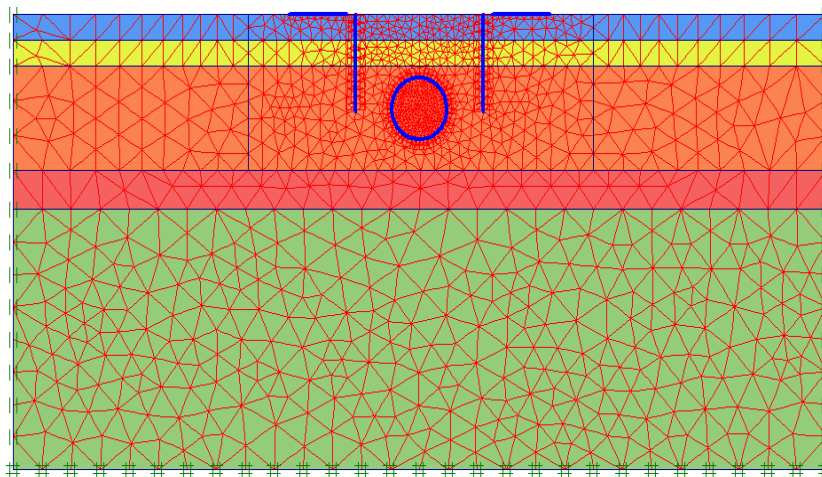
رفتار مصالح پوشش تونل و سازه‌های سطحی به- صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. خاک پیرامون تونل ابتدا با مدل رفتاری مور- کولمب مدل‌سازی شد که نتایج حاصل نشان‌دهنده تورم و بالادگی سطح زمین در مجاورت محور تونل و به عبارت دیگر دوران سازه‌های سطحی به سمت مخالف تونل بود. در نتیجه، این مدل رفتاری، علی‌رغم سادگی در تعیین پارامترهای مورد نیاز، نشان‌دهنده رفتار صحیح تغییرشکلی خاک نمی‌باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط تتو و وونگ (۲۰۱۲) نتایج به‌دست آمده توسط مدل رفتاری خاک سخت

شونده تطابق بیشتری با پروژه‌های واقعی نسبت به مدل رفتاری مور- کولمب دارد. در نتیجه، در تحقیق حاضر نیز مدل رفتاری خاک سخت شونده برای انجام مدل‌سازی انتخاب گردید.

جدول ۲. مشخصات پوشش بتنی تونل (سگمنت)

v	W (kN/m/m)	d (m)	EI (kNm ² /m)	EA (kN/m)
۰/۱۵	۸/۴	۰/۳۵	۱۱۲۵۰۰	۱۱۰۲۵۰۰۰

پوشش بتنی



شکل ۳. نمونه‌ی مش‌بندی مدل‌های مورد تحلیل

در عمل، اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر ماشین حفار و سرمه حفاری به همراه مخروطی بودن سپر سبب ایجاد جابجایی در فضای اطراف تونل می‌شود (رضایی و احترامی، ۱۳۹۶). همچنین، در انتهای سپر ماشین، فاصله بین سطح خاک حفاری شده و سطح خارجی پوشش باید بلافاصله بعد از نصب سگمنت‌ها با تزریق پُر شود که در صورت عدم تزریق کامل دوغاب پشت سگمنت، جابجایی‌ها و نشست سطح زمین افزایش خواهد یافت. به طور کلی، حجم اضافی خاکی که علاوه بر حجم تئوری تونل حفاری می‌شود افت حجم (V_L) نامیده شده و به صورت درصدی از حجم تئوری تونل در واحد طول بیان می‌گردد. بر اساس مشخصات هندسی ماشین حفار و همچنین کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت، میزان افت حجم در پروژه‌های مختلف تونل‌سازی مکانیزه در بازه ۰/۲ الی ۲ درصد قرار دارد (گوگلیلمتی و همکاران، ۲۰۰۸). با توجه به تأثیر و اهمیت زیاد این پارامتر در میزان بیشینه نشست سطحی زمین، در مطالعه حاضر مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد برای افت حجم در نظر گرفته شده است. در خصوص سازه‌های سطحی، معمولاً مدل‌سازی اثر این سازه‌ها در مطالعات ژئوتکنیک به سه روش انجام می‌گیرد. در حالت اول، سازه به طور کامل همراه با جزئیات المان‌های سازه‌ای مدل‌سازی می‌شود که در این روش استفاده از نرم‌افزارهای جانبی نیز توصیه می‌گردد (ملکی و همکاران، ۱۳۸۹). در حالت دوم، بار ناشی از وزن سازه مستقیماً بر سطح زمین و در محل ساختمان اعمال می‌شود که در این حالت تأثیر سختی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. روش سوم، که متداول‌ترین روش موجود برای مدل‌سازی ساختمان‌های سطحی است، روش سختی نسبی می‌باشد (پاتز و ادنبروک، ۱۹۹۷). در

در عمل، اضافه حفاری ناشی از اختلاف قطر خارجی سپر ماشین حفار و سرمه حفاری به همراه مخروطی بودن سپر سبب ایجاد جابجایی در فضای اطراف تونل می‌شود (رضایی و احترامی، ۱۳۹۶). همچنین، در انتهای سپر ماشین، فاصله بین سطح خاک حفاری شده و سطح خارجی پوشش باید بلافاصله بعد از نصب سگمنت‌ها با تزریق پُر شود که در صورت عدم تزریق کامل دوغاب پشت سگمنت، جابجایی‌ها و نشست سطح زمین افزایش خواهد یافت. به طور کلی، حجم اضافی خاکی که علاوه بر حجم تئوری تونل حفاری می‌شود افت حجم (V_L) نامیده شده و به صورت درصدی از حجم تئوری تونل در واحد طول بیان می‌گردد. بر اساس مشخصات هندسی ماشین حفار و همچنین کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت، میزان افت حجم در پروژه‌های مختلف تونل‌سازی مکانیزه در بازه ۰/۲ الی ۲ درصد قرار دارد (گوگلیلمتی و همکاران، ۲۰۰۸). با توجه به تأثیر و اهمیت زیاد این پارامتر در میزان بیشینه نشست سطحی زمین، در مطالعه حاضر مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد برای افت حجم در نظر گرفته شده است. در خصوص سازه‌های سطحی، معمولاً مدل‌سازی اثر این سازه‌ها در مطالعات ژئوتکنیک به سه روش انجام می‌گیرد. در حالت اول، سازه به طور کامل همراه با جزئیات المان‌های سازه‌ای مدل‌سازی می‌شود که در این روش استفاده از نرم‌افزارهای جانبی نیز توصیه می‌گردد (ملکی و همکاران، ۱۳۸۹). در حالت دوم، بار ناشی از وزن سازه مستقیماً بر سطح زمین و در محل ساختمان اعمال می‌شود که در این حالت تأثیر سختی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. روش سوم، که متداول‌ترین روش موجود برای مدل‌سازی ساختمان‌های سطحی است، روش سختی نسبی می‌باشد (پاتز و ادنبروک، ۱۹۹۷). در

این روش، هر ساختمان به صورت یک تیر الاستیک با سختی معادل در سطح زمین با مدول یانگ (E)، ممان اینرسی (I) و سطح مقطع (A) تعریف می شود. در این مطالعه، ساختمان های ۳، ۵، ۸ و ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. با احتساب مقدار ۲۱۰ کیلوگرم بر

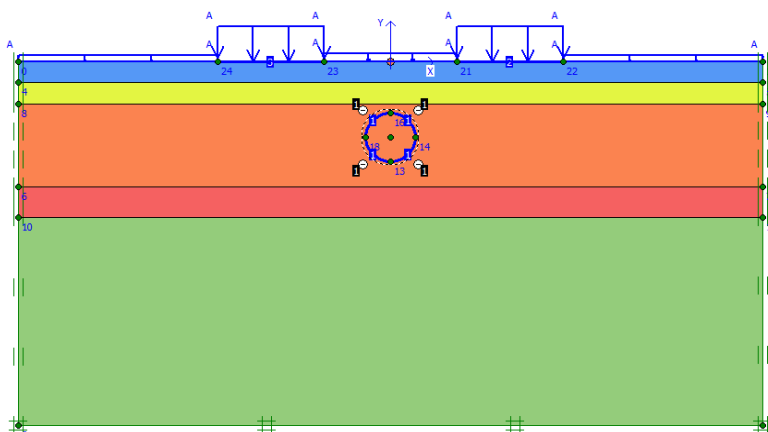
سانتی متر مربع برای مقاومت فشاری بتن سازه های ساختمان ها و مدول یانگ برابر با 2×10^7 کیلونیوتن بر متر مربع، ضخامت و مدول الاستیسیته معادل مربوط به تعداد طبقات مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات ساختمان های بتنی مدل شده (کاتبی و همکاران، ۱۳۹۴)

ضریب پواسون	EI (kNm ² /m)	EA (kN/m)	E (kPa)	ضخامت معادل تیر سطحی (m)	وزن سازه (kPa)	عرض سازه (m)	تعداد طبقات
۰/۲۵	۱۷۳۸۱۲۷۳۱	۱۳۷۸۶۴۵۵	۱۱۲۰۸۵۰	۱۲/۳	۳۰	۳۰-۲۰-۱۰	۳
۰/۲۵	۶۱۷۳۱۳۵۳۳	۲۰۷۳۷۸۳۶	۱۰۹۷۲۴۰	۱۸/۹	۵۰	۳۰-۲۰-۱۰	۵
۰/۲۵	۲۱۱۸۵۰۹۹۹۳	۳۱۰۷۹۹۰۶	۱۰۸۶۷۱۰	۲۸/۶	۸۰	۳۰-۲۰-۱۰	۸
۰/۲۵	۳۸۷۲۶۸۴۳۷۵	۳۷۹۳۶۵۰۰	۱۰۸۳۹۰۰	۳۵	۱۰۰	۳۰-۲۰-۱۰	۱۰

مربع به عنوان بار سازه های اطراف ساختمان های مورد مطالعه اعمال شده است. شکل ۴ نمونه ای از بارگذاری مدل سازی های انجام شده را نشان می دهد. بر این اساس، ۴۸ مدل عددی با متغیرهای تعداد طبقه، عرض سازه و پارامتر درصد ضریب انقباض (افت حجم) مورد تحلیل قرار گرفته است.

با توجه به عبور تونل از زیر خیابان آخونی در قسمت بالای تونل، بار ترافیکی ۲۴ کیلونیوتن بر متر مربع مطابق با عرض خیابان موجود اعمال شده است. در طرفین خیابان، سازه های سطحی با عرض و تعداد طبقات مختلف مدل سازی شده و در مابقی قسمت های مدلف با توجه به بافت موجود منطقه، بار ۲۰ کیلونیوتن بر متر



شکل ۴. نمونه هندسه مدل سازی برای ساختمان ۱۰ طبقه بتنی با عرض ۲۰ متر

اساس مشخصات ژئوتکنیک متراژ ۷۵۳ خط ۲ (رضایی و بابائی، ۱۳۹۶) انجام گرفته و مقادیر نشست سطحی به دست آمده از مدل سازی در سطح زمین بالای محور تونل برای دو مقدار افت حجمی به همراه نتایج حاصل

۳-۱. صحت سنجی

اعتبارسنجی فرایند مدل سازی با استفاده از نتایج اندازه گیری های میدانی انجام گرفته در پروژه خط ۲ متروی تبریز انجام شده است. برای این منظور، مدل سازی بر

جبهه کار تونل مبنای مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نزدیکی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و قرائت‌های محلی می‌توان با دقت قابل قبولی از مدل رفتاری و الگوی مدل‌سازی انجام گرفته استفاده نمود.

از قرائت‌های ابزار دقیق در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در محدوده فوق، سازه سطحی وجود نداشته و با توجه به دوبردی بودن مدل‌سازی حاضر، نشست قرائت شده در بین منصوب در فاصله ۲۰ متری

جدول ۴. مقایسه نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل‌سازی عددی

کیلومتر از حفاری	کیلومتر از نصب	نشست قرائت شده از ابزاربندی (m)	نشست حاصل از مدل‌سازی عددی (m)، $V_L = 1\%$	نشست حاصل از مدل‌سازی عددی (m)، $V_L = 0.5\%$
۷۵۳/۲۶	۰+۷۳۲/۶۶	۰/۰۱۷	۰/۰۲۴۵	۰/۰۱۴

۲-۳. رده‌بندی ریسک سازه‌ها

ایجاد نشست یا چرخش‌های زیاد در زیر سازه ممکن است باعث ایجاد صدمات معماری، سازه‌ای و حتی اختلال در بهره‌برداری ساختمان گردد (عباسی و حسینی، ۱۳۹۱). تعیین و تعریف مقادیر قابل تحمل یا به اصطلاح چرخش و نشست‌های مجاز برای انواع مختلف سازه‌ها، به علت پیچیدگی اندرکنش سه بخش سازه، شالوده و خاک، مسئله بسیار مشکلی است که با روش‌های کلاسیک نمی‌توان راه‌حل کلی برای آن یافت. از این رو، عمدتاً بر اساس گردآوری نتایج مشاهدات، توصیه‌های ساده‌ای در مورد مقادیر نشست قابل قبول سازه‌ها در مراجع مختلف پی‌سازی ارائه گردیده است. به‌عنوان نمونه، مقادیر مجاز پارامترهای مذکور برای ساختمان‌ها با انواع پی سطحی در جداول ۳-۶ و ۳-۷ مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان ارائه شده است. البته این مقادیر مجاز به‌صورت کلی بوده و علاوه بر نشست یا چرخش ناشی از بارگذاری خود سازه می‌بایست تأثیر عوامل محیطی دیگر از قبیل تغییرشکل‌های حاصل از حفاری تونل در مجاورت سازه‌ها نیز در این مقادیر مجاز منظور شود. به عبارت دیگر، ساخت سازه‌های زیرزمینی جدید می‌تواند موجب تغییر در انواع تغییرشکل‌های موجود در ساختمان شود. به همین دلیل، تغییرشکل‌های جدیدی که به تغییرشکل‌های قبلی و کوچک ساختمان اضافه می‌شود ممکن است آن‌ها را به تغییرشکل‌های بحرانی و مهم

تبدیل کند. از این رو، ضروری است قبل از احداث سازه‌های زیرزمینی به ارزیابی آسیب‌پذیری و در نتیجه تعیین رده ریسک سازه‌های سطحی پرداخته شده و در صورت نیاز اقدامات تحکیمی مناسب در نظر گرفته شود. فرایند ارزیابی خسارت ریسک برای ساختمان‌ها در دو گروه بررسی شرایط ساختمان‌ها و ارزیابی ریسک ساختمان‌ها تقسیم‌بندی می‌شود. بررسی شرایط ساختمان‌ها شامل کنترل سازه‌ها قبل، بعد و حین عملیات حفاری تونل بوده و ارزیابی ریسک ساختمان‌ها برای برآورد خسارت‌های مورد انتظار براساس پیش‌بینی‌های نشست و آسیب‌پذیری ذاتی ساختمان‌ها می‌باشد. چنانچه قبلاً بیان گردید، الگوها و طبقه‌بندی‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری سازه‌های سطحی ارائه شده است. لازم به ذکر است که طبقه‌بندی‌های پیشنهاد شده مربوط به ساختمان‌های با شرایط خوب بوده و مقادیر حدی ارائه شده در این الگوها می‌بایست با توجه به شاخص آسیب‌پذیری (Iv) ساختمان‌ها اصلاح شود. شاخص آسیب‌پذیری نشان دهنده وضعیت و مقاومت هر سازه در برابر تغییرشکل می‌باشد. ویژگی‌های ساختمان بر اساس موضوعاتی همچون اجزای سازه‌ای افقی و قائم، نوع پی، سابقه تعمیرات و بهسازی سازه، وجود طبقات زیرین، موقعیت ساختمان، تأثیر گروهی ساختمان‌ها، کاربری سازه، وضعیت ظاهری و راستای ساختمان نسبت به محور تونل جمع‌آوری و برای هر مورد امتیازهای

۵ ارائه شده توسط چریوتی و همکاران (۲۰۰۰) استفاده شده است که این جدول بر اساس معیار طبقه‌بندی آسیب پیشنهادی رانکین (۱۹۸۸) با اعمال تأثیر شاخص آسیب‌پذیری سازه‌ها ارائه شده است. پس از تعیین رده ریسک سازه‌های سطحی، اقدامات متقابل متناسب با رده ریسک می‌بایست در نظر گرفته شود. معمولاً در عمل برای سازه‌های با رده ریسک ۳ و ۴ به دلیل تأثیرات قابل ملاحظه جابجایی‌های ناشی از تونل‌سازی، اقدامات تحکیمی قبل از حفاری تونل در نظر گرفته می‌شود و برای سازه‌های با رده ریسک ۱ و ۲ ابزاربندی مورد نیاز، متناسب با اهمیت سازه و به منظور پایش رفتار سازه انجام می‌گیرد. انواع مختلفی از روش‌های تحکیمی به منظور کنترل و کاهش تأثیرات تونل‌سازی بر سازه‌های سطحی مجاور قابل اجرا می‌باشد که از آن جمله می‌توان به احداث دیوار دیافراگمی، شمع، میکروپایل، تزریق و تزریق با فشار زیاده (جت گروتینگ) اشاره نمود.

مختلفی تخصیص داده می‌شود. مجموع این امتیازها نشان‌دهنده‌ی شاخص آسیب‌پذیری ساختمان خواهد بود که مقادیر کم شاخص آسیب‌پذیری به معنی ظرفیت بالاتر ساختمان برای مقاومت در برابر تغییرشکل می‌باشد.

به منظور در نظر گرفتن وضعیت سازه‌های سطحی، شاخص آسیب‌پذیری تعیین شده و برای مقادیر بالای شاخص آسیب‌پذیری مقادیر حدی تغییرشکل‌های تعریف شده برای طبقه‌بندی الگوی آسیب سازه‌های سطحی به طور متناسب کاهش داده می‌شود تا ضریب اطمینان در برابر آسیب‌پذیری ساختمان‌ها افزایش یابد. در تحقیق حاضر، برای تعیین شاخص آسیب‌پذیری از معیار امتیازدهی پیشنهادی توسط گوگلیلمتی و همکاران (۲۰۰۸) استفاده شده است. این سیستم برای شاخص آسیب‌پذیری، عددی بین صفر (بیشترین مقاومت در برابر تغییرشکل) و ۱۰۰ (کمترین مقاومت در برابر تغییرشکل) ارائه می‌دهد. برای تعیین رده ریسک متناظر نیز از جدول

جدول ۵. طبقه‌بندی آسیب پیشنهادی رانکین با در نظر گرفتن تأثیر شاخص آسیب‌پذیری (گوگلیلمتی و همکاران، ۲۰۰۸)

رده	قابل چشم‌پوشی		خیلی کم		کم		متوسط		زیاد	
	$0 < I_v < 20$	$20 < I_v < 40$	$40 < I_v < 60$	$60 < I_v < 80$	$80 < I_v < 100$	پارامتر کنترل				
ریسک	β_{max} (رادیان)	S_{max} (mm)	β_{max} (رادیان)	S_{max} (mm)	β_{max} (رادیان)	S_{max} (mm)	β_{max} (رادیان)	S_{max} (mm)	β_{max} (رادیان)	S_{max} (mm)
سازه	<10	<1/500	<8	<1/625	<6.7	<1/750	<5.7	<1/875	<5	<1/1000
1	10-50	1/500-1/200	8-40	1/625-1/250	6.7-33	1/750-1/300	5.7-28.5	1/875-1/350	5-25	1/1000-1/400
2	50-75	1/200-1/50	40-60	1/250-1/63	33-55	1/300-1/75	28.5-43	1/350-1/88	25-37.5	1/400-1/100
3	>75	>1/50	>60	>1/63	>50	>1/75	>43	>1/88	>37.5	>1/100
4										

میزان نشست سطحی و چرخش ماکزیمم سازه‌های سطحی برای حالت‌های مختلف بارگذاری (سازه‌های ۳، ۵، ۸ و ۱۰ طبقه) و افت حجم‌های ۱/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد تعیین شده و با توجه به جدول ۴ رده‌بندی ریسک انجام

بر اساس معیار امتیازدهی تعریف شده برای سازه‌های بتنی مجاور مسیر تونل به عرض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر، میزان شاخص آسیب‌پذیری به ترتیب برابر ۶۰/۵، ۵۷/۵ و ۵۹/۵ می‌باشد. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی،

شده است. لازم به ذکر است که در صورتی که سازه‌های مجاور مسیر تونل به صورت سازه بنایی در نظر گرفته شوند، به دلیل افزایش شاخص آسیب‌پذیری، رده ریسک متناظر نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

گرفته است. بر اساس نتایج حاصل، چهار مورد از سازه‌های مجاور مسیر تونل در محدوده مورد مطالعه در رده ریسک ۳ قرار گرفته و در نتیجه نیازمند اقدام تحکیمی می‌باشند که مشخصات آن‌ها در جدول ۶ ارائه

جدول ۶. مشخصات چهار سازه قرار گرفته در رده ریسک ۳

ردم ریسک	IV	نشست سطح بالای تونل (mm)	چرخش سازه (رادیان)	ماکزیمم نشست سازه (mm)	درصد افت حجم	عرض سازه (m)	بار وارد بر تیر معادل (kN/m ²)	تعداد طبقه	شماره مدل
۳	۶۰/۵	-۶۴/۹۹	۰/۰۰۲	-۲۹	۲	۱۰	۳۰	۳	۳۷
۳	۶۰/۵	-۶۲/۶۳	۰/۰۰۱۹	-۳۰/۶	۲	۱۰	۵۰	۵	۴۰
۳	۶۰/۵	-۵۹/۱۲	۰/۰۰۱۸	-۳۱/۸۶	۲	۱۰	۸۰	۸	۴۳
۳	۶۰/۵	-۵۶/۸۴	۰/۰۰۱۷	-۳۲/۵۲	۲	۱۰	۱۰۰	۱۰	۴۶

۳-۳. عملیات تحکیمی

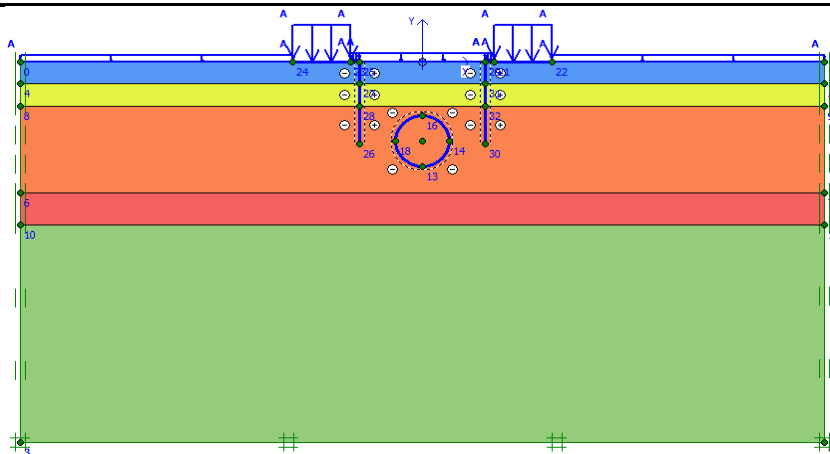
اجرای شمع‌ها به تعداد، فواصل، عمق و قطر مشخص می‌توان پایداري مناسبی در مجاورت ساختمان‌ها ایجاد کرد. با اجرای شمع‌های مذکور، انتظار می‌رود تغییر مکان و جابجایی‌های ایجاد شده در مجاورت سازه‌های سطحی کنترل گردیده و در نتیجه آسیب‌پذیری این سازه‌ها در مقابل حفاری تونل کاهش یابد.

بر اساس رده ریسک تعیین شده در بخش قبل، برخی ساختمان‌ها جهت حفظ درجه سرویس‌دهی به اقدامات تحکیمی نیاز دارند. اقدامات تحکیمی اساساً برای کنترل و کاهش جابجایی‌های زمین پیرامون تونل و میزان نشست متقارن و نامتقارن سازه‌های سطحی انجام می‌شود. با در نظر گرفتن شرایط محیطی و محدودیت‌های ترافیکی، از جمله اقدامات تحکیمی قابل اجرا در مطالعه موردی حاضر می‌توان به احداث شمع و دیوار دیافراگمی در مجاورت ساختمان‌ها و انواع روش‌های تزریق شیمیایی و غیرشیمیایی اشاره نمود. در تعیین نوع اقدام تحکیمی مناسب باید به مواردی همچون سهولت و قابلیت اجرا در پروژه و موارد اقتصادی نیز توجه گردد. با در نظر گرفتن تجهیزات، ماشین‌آلات و تجربیات اجرایی موجود در پروژه و همچنین مسائل اقتصادی، استفاده از شمع‌های بتنی درجا برای کنترل نشست ایجاد شده در سازه‌های سطحی ناشی از حفر تونل مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، با

به دلیل استفاده از نرم‌افزار دوبعدی، به منظور بررسی تأثیر فاصله شمع‌ها از هم در کاهش نشست سازه، میزان سختی محوری و خمشی محاسبه شده برای هر شمع به فاصله مرکز به مرکز شمع‌های مجاور تقسیم می‌شود. قطر شمع‌ها به طور ثابت یک متر در نظر گرفته شد و به فاصله ۱/۵ متر از گوشه پی سازه مدل‌سازی شده‌اند. این شمع‌ها در چهار طول مختلف ۴، ۶، ۱۰، و ۱۵ متر در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات شمع‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی برای بررسی عملکرد این روش در کاهش رده ریسک در جدول ۷ ارائه شده است. همچنین، شکل ۵، مدل‌سازی شمع‌های درجا، به عنوان نمونه برای مدل ۴۶ که عمق شمع‌ها برابر ۱۵ متر می‌باشد، را نشان می‌دهد.

جدول ۷. مشخصات شمع‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی

فاصله شمع‌ها (m)	عمق شمع‌ها (m)	EI(kNm ² /m)	EA(kN/m)
۳	۱۵-۱۰-۶-۴	۳۹۰۰۰۰	۶۱۲۳۰۰۰
۴	۱۵-۱۰-۶-۴	۲۹۲۵۰۰	۴۵۹۲۲۵۰
۶	۱۵-۱۰-۶-۴	۱۹۵۰۰۰	۳۰۶۱۵۰۰



شکل ۵. نمونه‌ی مدل‌سازی اقدام تحکیمی شمع‌های درجا برای مدل ۶

۴. نتایج

محور تونل اتفاق می‌افتد، بیش از ۷ برابر افزایش نشان می‌دهد.

در این بخش، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ارائه می‌گردد. در ابتدا تأثیر هر یک از پارامترهای مؤثر در نشست سطحی بر میزان نشست ماکزیمم ایجاد شده در زیر سازه‌ها مورد اشاره قرار می‌گیرد و سپس به عملکرد روش تحکیمی اجرای شمع در کنترل جابجایی‌ها و کاهش رده ریسک سازه‌های سطحی پرداخته می‌شود.

۴-۲. تأثیر سختی سازه در میزان نشست

در شکل ۷، مقادیر ماکزیمم نشست سطحی ایجاد شده در زیر سازه به عنوان نمونه برای سازه‌های به عرض ۳۰ متر و برای دو حالت مدل‌سازی سازه به روش سختی معادل و اعمال بار وزن سازه به صورت مستقیم بر سطح مدل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، برای تمامی مقادیر افت حجم، در صورت معادل‌سازی سازه‌ها به روش تیر الاستیک با سختی معادل، میزان نشست ایجاد شده در زیر سازه نسبت به حالتی که بار معادل مستقیماً بر زمین وارد شود کمتر است که این امر در تطابق با نتایج سایر محققین می‌باشد (فارل و مایر، ۲۰۱۰). لازم به ذکر است که بر اساس نتایج حاصل، میزان تأثیر در نظر گرفتن سختی سازه سطحی در کاهش نشست با افزایش درصد افت حجم بیشتر می‌شود. به بیان

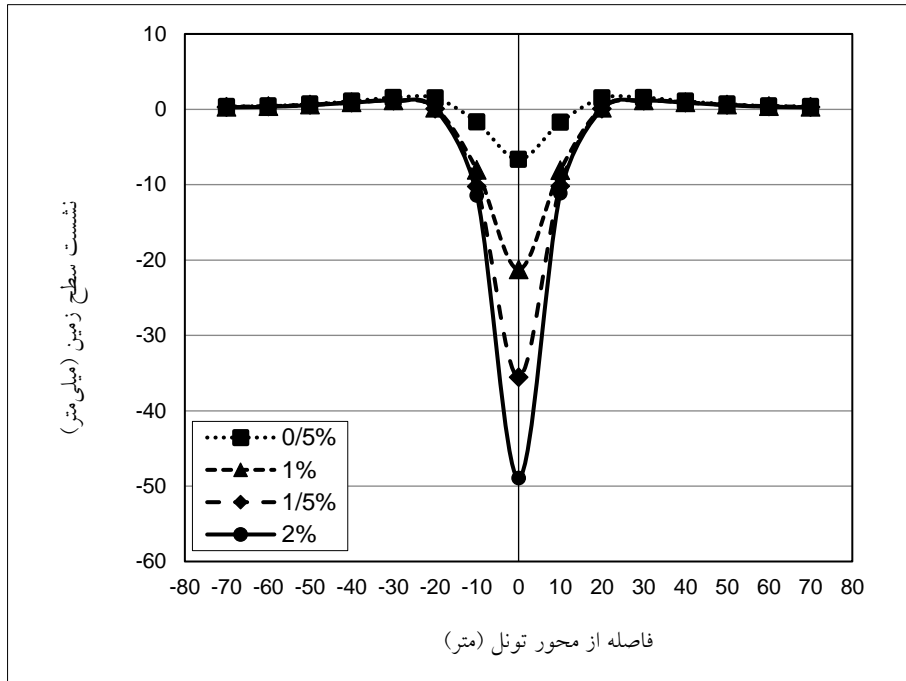
۴-۱. تأثیر درصد افت حجم بر میزان نشست سطح

زمین

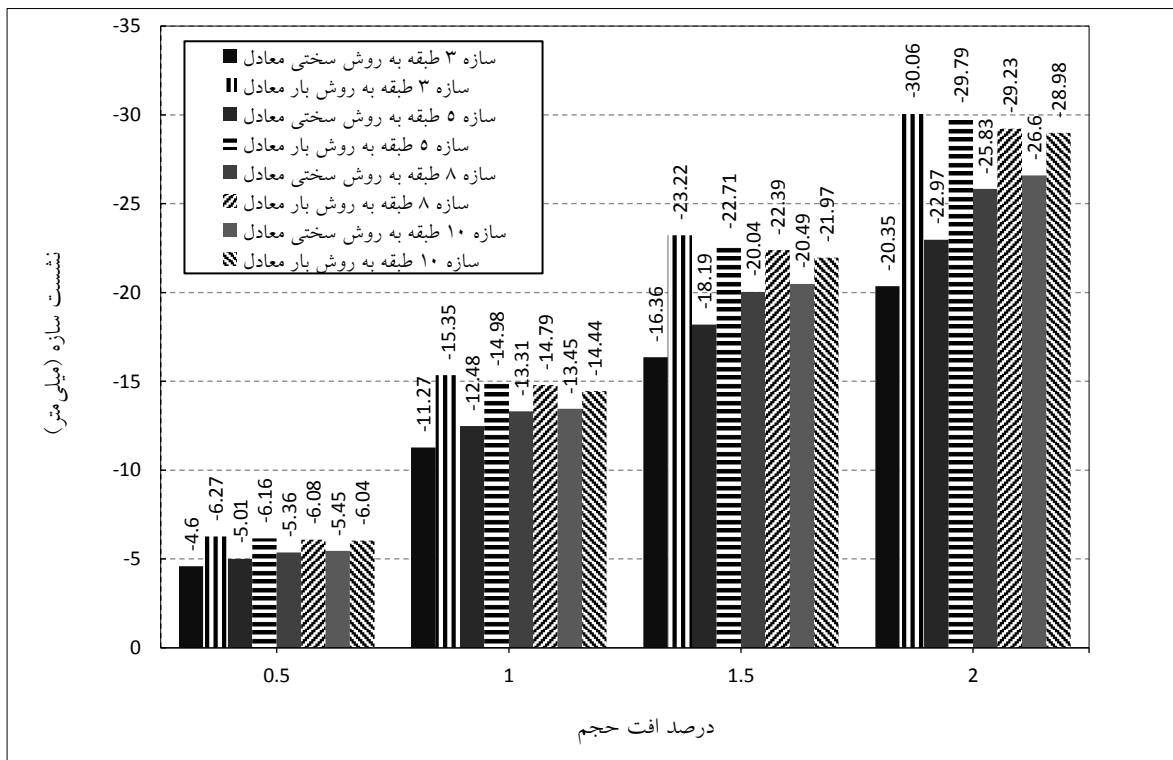
شکل ۶ میزان نشست سطحی زمین بر اساس درصد‌های مختلف افت حجم را در حالتی که هیچ بار سطحی وجود ندارد نشان می‌دهد. بر اساس شکل و مطابق انتظار، با کاهش کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت و راهبری دستگاه، میزان افت حجم افزایش یافته و میزان نشست سطحی زمین بیشتر خواهد شد. با افزایش افت حجم از ۰/۵ به ۲ درصد، بیشینه نشست سطحی زمین، که در بالای

بخش‌های بعد به علت نزدیک‌تر بودن به شرایط واقعی سازه بر اساس مدل‌سازی به روش سختی معادل می‌باشد.

دیگر، زمانی که شرایط خاک زیر سازه استعداد حرکت بیشتری دارد نقش مهم‌تری برای جلوگیری از جابجایی سازه ایفا می‌نماید. نتایج ارائه شده در



شکل ۶. میزان نشست سطح زمین بر اساس درصد‌های مختلف پارامتر انقباض تونل

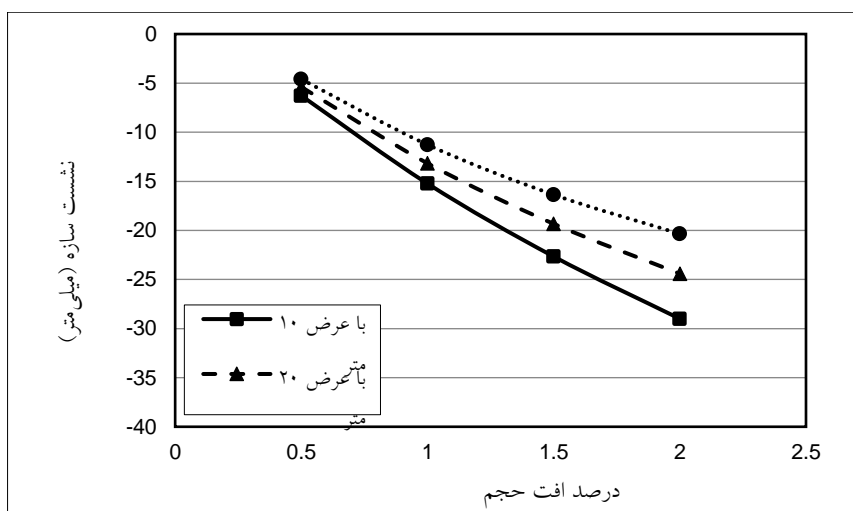


شکل ۷. مقایسه تأثیر نوع مدل‌سازی سازه بر میزان ماکزیمم نشست زیر سازه‌ها در سازه‌های به عرض ۳۰ متر

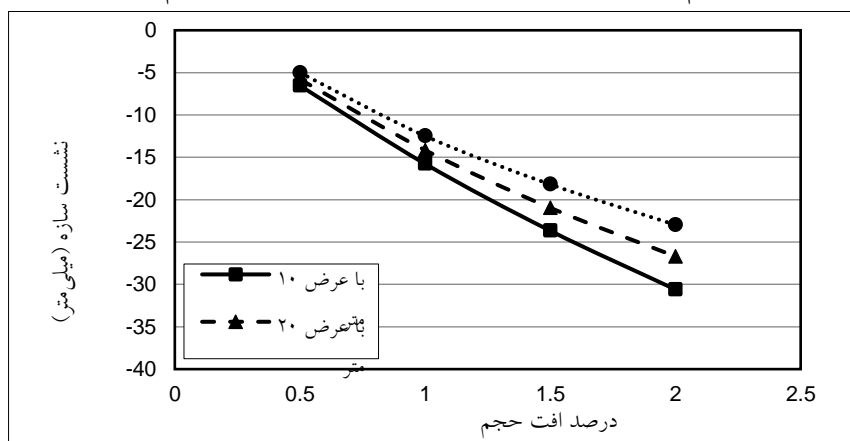
۳-۴. تأثیر عرض سازه

سختی خمشی بیشتر، دارای نشست سطحی ماکزیمم کمتری در زیر سازه نسبت به سازه‌های کم عرض می‌باشند. با افزایش تعداد طبقات سازه، میزان ماکزیمم نشست زیر پی به میزان اندکی افزایش نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تأثیر وزن سازه می‌باشد. البته لازم به ذکر است که به دلیل افزایش سختی در تیر الاستیک معادل، سازه‌های با تعداد طبقات زیاد، تأثیر افزایش وزن در ماکزیمم نشست زیر پی ناچیز می‌باشد. همین روال برای میزان نشست سطحی ایجاد شده در بالای محور تونل قابل مشاهده است. در شکل ۱۲، ماکزیمم نشست سطحی برای افت حجم ۲٪ برای تعداد طبقات و عرض‌های مختلف سازه‌های سطحی نشان داده شده است.

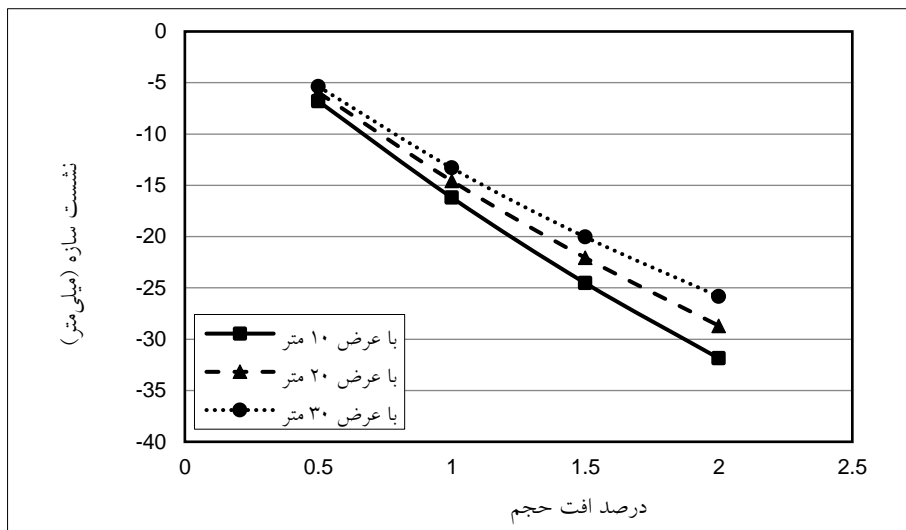
مقادیر نشست ماکزیمم سطحی ایجاد شده در زیر سازه برای ساختمان‌های ۳، ۵، ۸ و ۱۰ طبقه به ترتیب در شکل‌های ۸ الی ۱۱ برای عرض‌ها و درصد‌های مختلف افت حجم نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که به‌عنوان یک الگوی کلی، در تعداد طبقات یکسان، با افزایش کیفیت اجرا (کاهش افت حجم) و با افزایش عرض سازه، میزان ماکزیمم نشست زیر سازه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، تأثیر عرض سازه برای مقادیر بیشتر افت حجم افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد به دلیل مدل‌سازی سازه‌های سطحی به صورت تیر الاستیک با سختی معادل، سازه‌های دارای عرض بیشتر، به دلیل



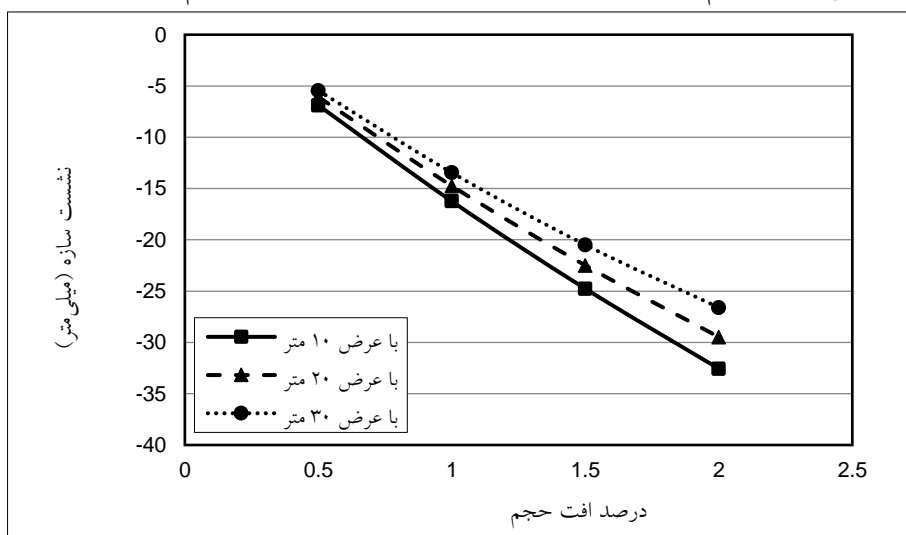
شکل ۸. ماکزیمم نشست زیر سازه‌های ۳ طبقه بر اساس درصد افت حجم و عرض سازه



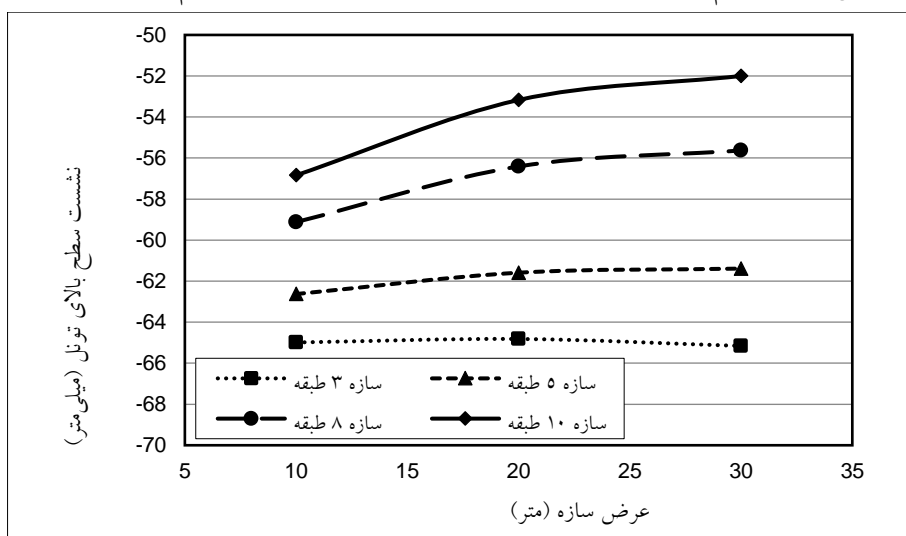
شکل ۹. ماکزیمم نشست زیر سازه‌های ۵ طبقه بر اساس درصد افت حجم و عرض سازه



شکل ۱۰. ماکزیمم نشست زیر سازه‌های ۸ طبقه بر اساس درصد افت حجم و عرض سازه



شکل ۱۱. ماکزیمم نشست زیر سازه‌های ۱۰ طبقه بر اساس درصد افت حجم و عرض سازه



شکل ۱۲. ماکزیمم نشست سطحی برای تعداد طبقات و عرض‌های مختلف سازه‌های سطحی (افت حجم ۲٪)

مختلف برای فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها (۳، ۴ و ۶ متر) در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج حاصل، تأثیر اجرای شمع‌های بتنی در کاهش میزان نشست و رده ریسک چهار سازه نیازمند اقدام تحکیمی در جداول ۸ الی ۱۱ ارائه شده است. ردیف اول جداول، مقادیر نشست و چرخش ماکزیمم به همراه رده ریسک هر یک از سازه‌ها را قبل از انجام عملیات تحکیمی نشان می‌دهد.

۴-۴. تأثیر عملیات تحکیمی در رده‌بندی ریسک

سازه‌های سطحی

چنانچه قبلاً بیان شد، بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی، چهار سازه سطحی با مشخصات ارائه شده در جدول ۶ در رده ریسک ۳ قرار گرفته و نیازمند اقدامات تحکیمی می‌باشند. به منظور بررسی تأثیر مشخصات شمع‌های بتنی درجا بر عملکرد این روش، چهار مقدار مختلف برای طول شمع (۴، ۶، ۱۰ و ۱۵ متر) و سه مقدار

جدول ۸. مقادیر نشست و چرخش ماکزیمم به همراه رده ریسک قبل و پس از اجرای عملیات تحکیمی در مدل ۳۷

فاصله شمع‌ها (m)	عمق شمع (m)	نشست سازه (m)	درصد کاهش نشست	چرخش سازه (رادیان)	رده ریسک
---	---	-۲۹	---	۰/۰۰۲	۳
---	۴	-۲۸/۸	۰/۶۹	۰/۰۰۲	۳
---	۶	-۲۸/۲۱	۲/۷۲	۰/۰۰۱۹	۲
۳	۱۰	-۲۶/۱۳	۹/۹	۰/۰۰۱۶۹	۲
---	۱۵	-۱۹/۵۹۵	۳۲/۴۳	۰/۰۰۱۱	۲
---	۴	-۲۸/۸۵	۰/۵۲	۰/۰۰۱۹۹	۳
---	۶	-۲۸/۲۶	۲/۵۵	۰/۰۰۱۹۳	۲
۴	۱۰	-۲۶/۲۹۹	۹/۳۱	۰/۰۰۱۶	۲
---	۱۵	-۱۹/۶۵۵	۳۲/۲۲	۰/۰۰۱۱	۲
---	۴	-۲۸/۸۸	۰/۴۱	۰/۰۰۱۹۹	۳
---	۶	-۲۸/۳۸۷	۲/۱۱	۰/۰۰۱۹۳	۲
۶	۱۰	-۲۶/۳۷	۹/۰۷	۰/۰۰۱۶۹	۲
---	۱۵	-۱۹/۷۵	۳۱/۹۰	۰/۰۰۱۱	۲

جدول ۹. مقادیر نشست و چرخش ماکزیمم به همراه رده ریسک قبل و پس از اجرای عملیات تحکیمی در مدل ۴۰

فاصله شمع‌ها (m)	عمق شمع (m)	نشست سازه (m)	درصد کاهش نشست	چرخش سازه (رادیان)	رده ریسک
---	---	-۳۰/۶	---	۰/۰۰۱۹	۳
---	۴	-۳۰/۱۲۲	۱/۵۶	۰/۰۰۱۹	۳
۳	۶	-۲۹/۶۱	۳/۲۴	۰/۰۰۱۸	۳
---	۱۰	-۲۷/۶	۹/۸	۰/۰۰۱۶	۲

۲	۰/۰۰۱۱	۲۸/۶۸	-۲۱/۸۲۵	۱۵	
۳	۰/۰۰۱۸۸	۱/۵۴	-۳۰/۱۲۹	۴	
۳	۰/۰۰۱۸	۳/۱۷	-۲۹/۶۳	۶	۴
۲	۰/۰۰۱۶	۹/۴۹	-۲۷/۶۹۵	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۸/۴۰	-۲۱/۹۱	۱۵	
۳	۰/۰۰۱۸۸	۱/۵۱	-۳۰/۱۳۸	۴	
۳	۰/۰۰۱۸	۳/۰۷	-۲۹/۶۶	۶	۶
۲	۰/۰۰۱۶	۹/۴۶	-۲۷/۷۰۵	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱۹	۲۷/۸۸	-۲۲/۰۷	۱۵	

جدول ۱۰. مقادیر نشست و چرخش ماکزیمم به همراه رده ریسک قبل و پس از اجرای عملیات تحکیمی در مدل ۴۳

رده ریسک	چرخش سازه (رادیان)	درصد کاهش نشست	نشست سازه (m)	عمق شمع (m)	فاصله شمع‌ها (m)
۳	۰/۰۰۱۸	---	-۳۱/۸۶	---	---
۳	۰/۰۰۱۷	۲/۲۶	-۳۱/۱۴	۴	
۳	۰/۰۰۱۶	۴/۰۲	-۳۰/۵۸	۶	۳
۳	۰/۰۰۱۵	۸/۸۲	-۲۹/۰۵	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۳/۳۵	-۲۴/۴۲	۱۵	
۳	۰/۰۰۱۷	۲/۱۰	-۳۱/۱۹	۴	
۳	۰/۰۰۱۶	۳/۶۷	-۳۰/۶۹	۶	۴
۳	۰/۰۰۱۵	۸/۴۳	-۲۹/۱۷۵	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۳/۰۵	-۲۴/۵۱۵	۱۵	
۳	۰/۰۰۱۷	۲/۰۱	-۳۱/۲۲	۴	
۳	۰/۰۰۱۶	۳/۴۲	-۳۰/۷۷	۶	۶
۳	۰/۰۰۱۶	۸/۰۸	-۲۹/۲۸۵	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۲/۷۱	-۲۴/۶۲۵	۱۵	

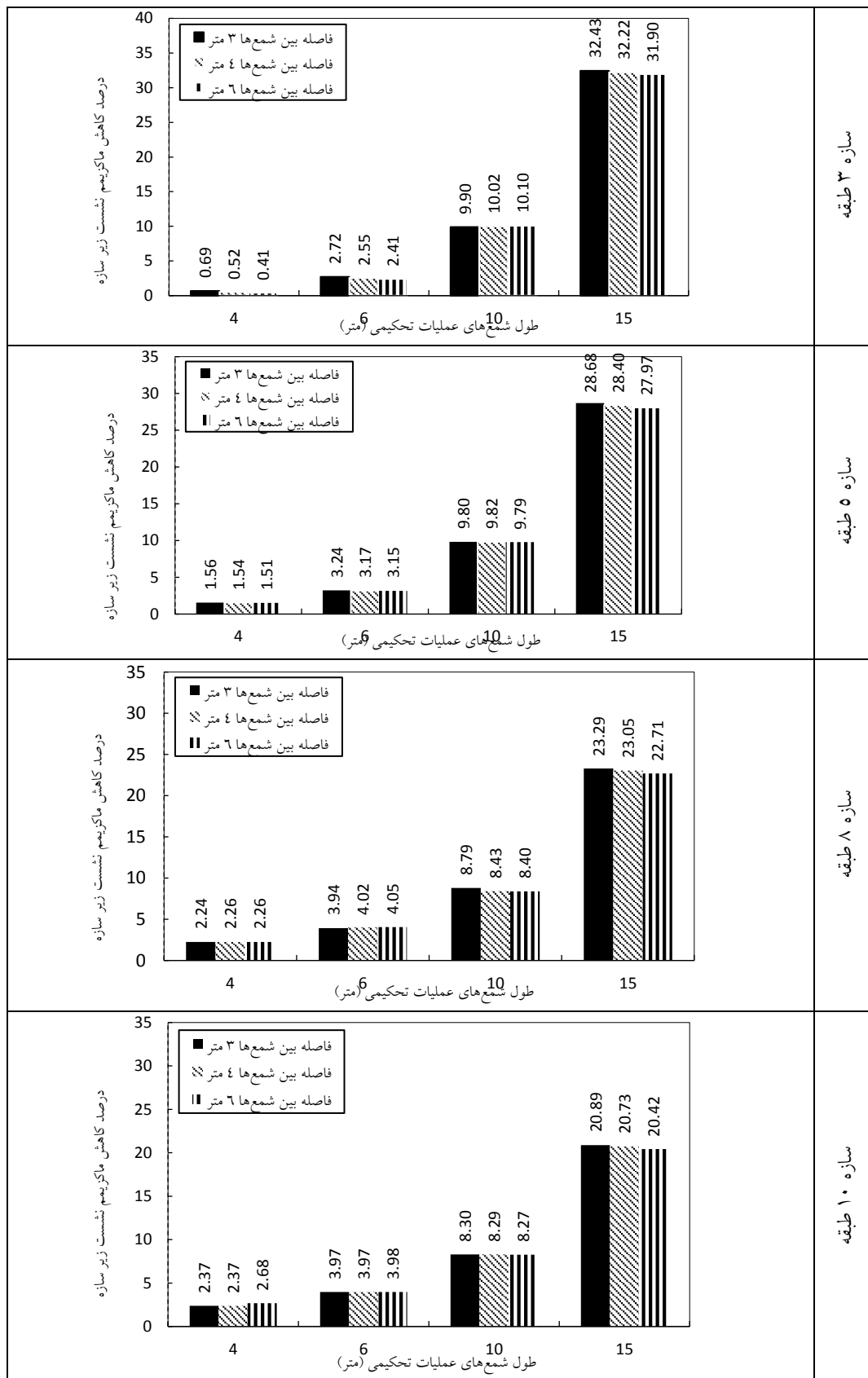
جدول ۱۱. مقادیر نشست و چرخش ماکزیمم به همراه رده ریسک قبل و پس از اجرای عملیات تحکیمی در مدل ۴۶

رده ریسک	چرخش سازه (رادیان)	درصد کاهش نشست	نشست سازه (m)	عمق شمع (m)	فاصله شمع‌ها (m)
۳	۰/۰۰۱۷	---	-۳۲/۵۲	---	---
۳	۰/۰۰۱۵	۲/۷۴	-۳۱/۶۳	۴	
۳	۰/۰۰۱۴۹	۴/۰۳	-۳۱/۲۱	۶	۳
۳	۰/۰۰۱۳۹	۸/۵۵	-۲۹/۷۴	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۱/۳۴	-۲۵/۵۸	۱۵	
۳	۰/۰۰۱۵	۲/۲۴	-۳۱/۷۹	۴	
۳	۰/۰۰۱۴۹	۳/۶۳	-۳۱/۳۴	۶	۴
۳	۰/۰۰۱۳۹	۸/۲۴	-۲۹/۸۴	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۰/۷۳	-۲۵/۷۸	۱۵	
۳	۰/۰۰۱۵	۲	-۳۱/۸۷	۴	
۳	۰/۰۰۱۴۹	۳/۲۹	-۳۱/۴۵	۶	۶
۳	۰/۰۰۱۳۹	۷/۹۶	-۲۹/۹۳	۱۰	
۲	۰/۰۰۱۱	۲۰/۱۱	-۲۵/۹۸	۱۵	

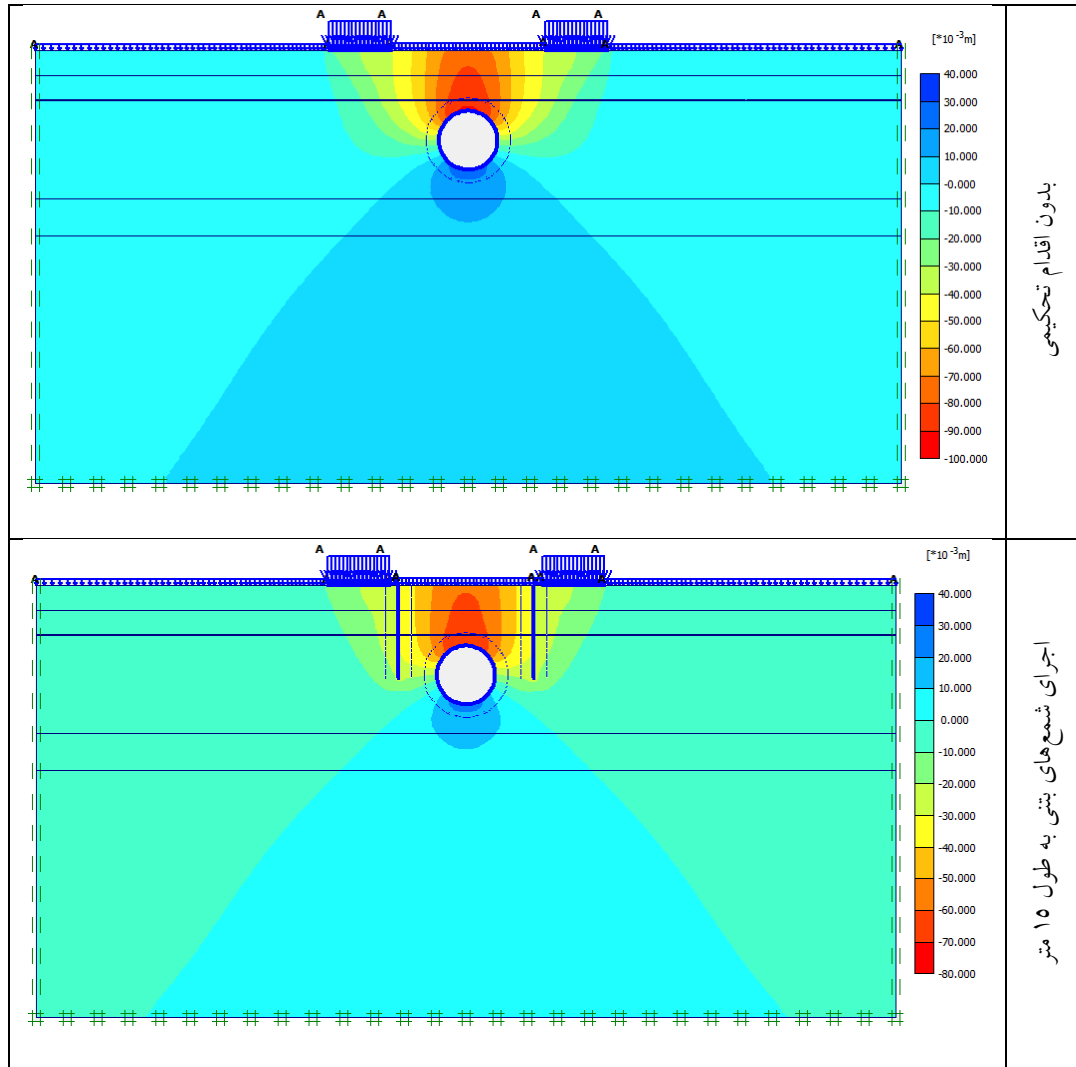
نشست سطحی ماکزیمم نخواهد داشت و این پارامتر بیشتر بر میزان کرنش افقی تأثیرگذار می‌باشد. به عبارت دیگر، تأثیر پارامتر طول شمع بر عملکرد روش تحکیمی بسیار بیشتر از تأثیر پارامتر فاصله بین شمع‌ها از یکدیگر ارزیابی می‌شود.

به منظور مقایسه دقیق‌تر، درصد کاهش نشست برای مقادیر مختلف طول و فاصله شمع‌ها از یکدیگر برای سازه‌های با تعداد طبقات مختلف (عرض ۱۰ متر) به صورت میله‌ای در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با اجرای شمع‌های بتنی به طول ۱۵ متر، میزان ماکزیمم نشست سطحی زیر پی تمامی سازه‌ها به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که این میزان کاهش برای سازه‌های ۳ و ۱۰ طبقه به ترتیب در حدود ۳۲ و ۲۱ درصد می‌باشد. الگوی کلی و میزان جابجایی قائم توده خاک پیرامون تونل در اثر حفاری تونل با افت حجم ۲٪ برای سازه ۱۰ طبقه به عرض ۱۰ متر (مدل ۴۶) در دو حالت بدون اقدام تحکیمی و پس از اجرای شمع‌های بتنی به طول ۱۵ متر در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

با توجه به جداول ۸ الی ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد طبقات و در نتیجه وزن سازه‌ها، تأثیر عملیات تحکیمی در کاهش رده ریسک کمتر می‌گردد. در سازه سه طبقه، اجرای شمع‌ها به طول بیش از چهار متر سبب کاهش رده ریسک سازه شده و در سازه ۵ طبقه شمع‌های ۱۰ و ۱۵ متری رده ریسک را کاهش می‌دهند در حالی که در تعداد طبقات ۸ و ۱۰ تنها در حالت اجرای شمع‌های ۱۵ متری (که تقریباً شمع‌ها تا عمق مرکز تونل امتداد یافته‌اند) رده ریسک سازه‌های سطحی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، برای کاهش رده ریسک سازه‌های با تعداد طبقات بالاتر، نیاز به اجرای شمع‌های تحکیمی با طول بیشتر وجود دارد. بر اساس نتایج حاصل، فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها به موازات محور تونل برای مقادیر بررسی شده تأثیر قابل توجهی بر میزان نشست و چرخش ماکزیمم پی ندارد. البته لازم به ذکر است که معیار ارزیابی در تحقیق حاضر بر مبنای نشست سطحی ماکزیمم در زیر پی می‌باشد (در عرض ثابت، میزان چرخش نیز وابسته به پارامتر نشست ماکزیمم است) و پارامتر فاصله بین شمع‌ها تأثیر چندانی بر میزان



شکل ۱۳. میزان کاهش نشست برای مقادیر مختلف طول و فاصله شمع‌ها برای سازه‌های به عرض ۱۰ متر



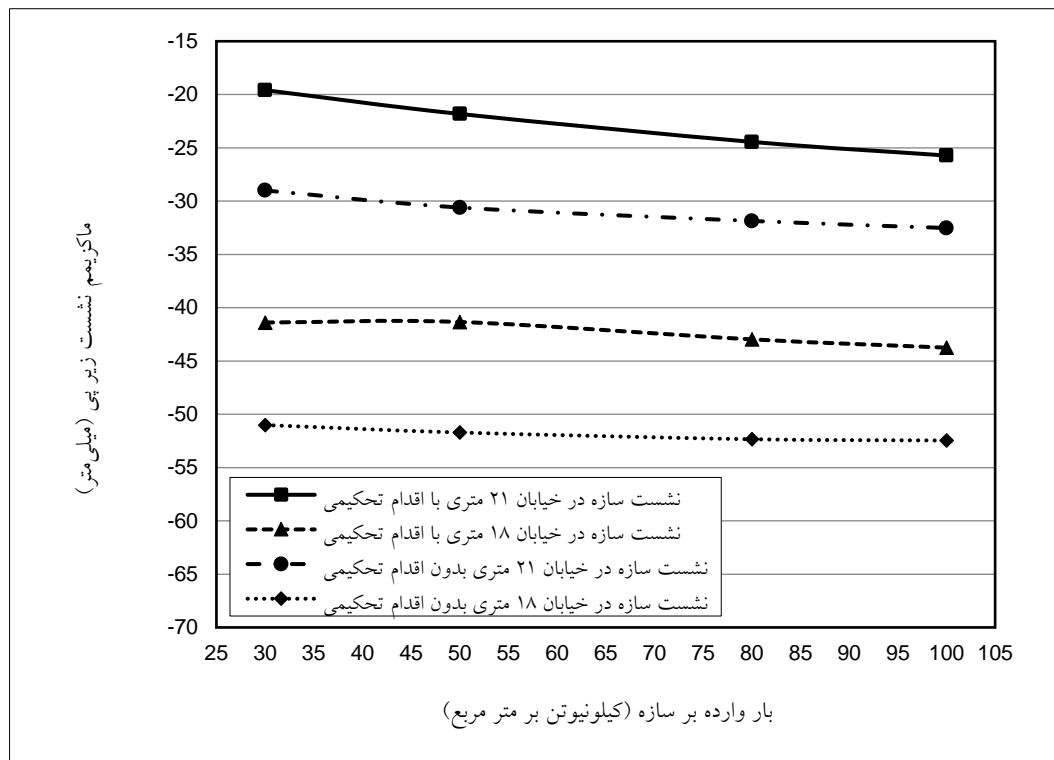
شکل ۱۴. الگو و مقادیر جابجایی قائم خاک پیرامون تونل برای حالت سازه ۱۰ طبقه به عرض ۱۰ متر

۴-۵. تأثیر عرض خیابان (فاصله سازه‌های

سطحی در طرفین تونل)

با توجه به عبور مسیر تونل خط ۲ متروی تبریز از معابر با عرض‌های مختلف در ناحیه مورد مطالعه، در این بخش، با کاهش عرض خیابان از ۲۱ به ۱۸ متر، به بررسی عملکرد اجرای شمع‌های بتنی تحکیمی در عرض معابر متفاوت پرداخته شده است. بدین منظور، چهار مدل معرفی شده در جدول ۵، با تغییر عرض خیابان، مجدداً تحلیل گردیده و نتایج ماکزیمم نشست سطحی زیر

سازه‌ها برای شرایط موجود و پس از انجام اقدام تحکیمی در شکل ۱۵ ارائه شده است. نتایج مذکور برای شمع‌های بتنی به طول ۱۵ متر و فاصله مرکز به مرکز ۳ متر از یکدیگر می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل، با کاهش عرض خیابان و نزدیکتر شدن سازه‌های سطحی به محور تونل، میزان ماکزیمم نشست سطحی زیر پی سازه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد (حدود ۷۰٪) و در نتیجه ریسک سازه‌ها در رده ۴ قرار می‌گیرد. با انجام اقدام تحکیمی در این حالت، ماکزیمم نشست زیر پی کمتر شده و رده ریسک سازه‌های سطحی به ۳ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۵. مقایسه تأثیر اقدام تحکیمی و کاهش عرض خیابان بر ماکزیمم نشست زیر پی سازه‌ها

۵. نتیجه‌گیری

- به دلیل تأثیر زیاد سختی سازه‌ها در مدل‌سازی به روش تیر الاستیک معادل، رده ریسک حاصل از این روش غیرمحافظة‌کارانه بوده و به‌ویژه برای سازه‌های بنایی با تعداد طبقات کم، اعمال بار وزن سازه روی سطح مدل پیشنهاد می‌گردد. بر اساس نتایج مطالعه حاضر، با کاهش تعداد طبقات، اختلاف در میزان نشست بیشینه برای دو روش مدل‌سازی تأثیر سازه، افزایش می‌یابد.

- کیفیت تزریق دوغاب پشت سگمنت و راهبری ماشین حفار به‌صورت پارامتر افت حجم، تأثیر قابل توجهی بر میزان نشست سطحی ماکزیمم و در نتیجه رده ریسک سازه‌های سطحی خواهد داشت. با افزایش درصد افت حجم، میزان نشست و چرخش ماکزیمم سازه‌ها افزایش یافته و رده ریسک نیز به تناسب بیشتر می‌گردد. بر اساس نتایج حاصل، سازه‌های دارای عرض ۱۰ متر در صورت افزایش پارامتر افت حجم به ۲٪ به بحرانی‌ترین حالت نشست نامتقارن خود رسیده و در رده ریسک ۳ قرار می‌گیرند.

در تحقیق حاضر، با مدل‌سازی دوبعدی و کاربرد نرم افزار المان محدود پلکسیس، مقادیر نشست و چرخش ماکزیمم زیر پی سازه‌های سطحی در اثر حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز، در ناحیه مورد مطالعه، تعیین گردید. بر اساس مقادیر حاصل، رده ریسک سازه با در نظر گرفتن شاخص آسیب‌پذیری هر سازه تعیین شده و برای سازه‌های در رده ریسک ۳ و ۴ عملکرد اقدام تحکیمی اجرای شمع‌های بتنی درجا مورد بررسی قرار گرفت. برخی از مهمترین نتایج حاصل به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

- پارامترهای مربوط به مدل‌سازی عددی از قبیل نحوه مدل‌سازی سازه‌های سطحی، مدل رفتاری خاک پیرامون تونل و ضرایب اندرکنش، بر نتایج حاصل تأثیرگذار بوده و در نتیجه رده ریسک سازه‌های سطحی وابسته به نحوه مدل‌سازی عددی می‌باشد. از این رو، در عمل، انجام ابزاربندی و پایش سازه‌های سطحی ضروری است.

کاهش رده ریسک سازه‌های ۸ و ۱۰ طبقه ۱۵ متر برآورد می‌گردد. به منظور عملکرد بهتر، پیشنهاد می‌گردد شمع‌های تحکیمی تا عمق مرکز تونل امتداد داده شود؛ به‌ویژه برای سازه‌های ۸ طبقه و بلندتر.

- کاهش عرض خیابان از ۲۱ به ۱۸ متر تأثیر قابل توجهی در افزایش نشست سازه‌ها و رده ریسک مربوطه نشان می‌دهد. با کاهش فاصله سازه‌های سطحی در طرفین تونل، عملکرد روش اجرای شمع بتنی درجا در کاهش رده ریسک کاهش می‌یابد. لذا، در خیابان‌های کم عرض، افزایش کیفیت اجرایی تونل و پایش مستمر سازه‌های سطحی، به همراه عملیات پیش‌تحکیمی، اکیداً توصیه می‌شود.

- بر اساس مدل‌سازی انجام یافته، افزایش عرض سازه‌ها به دلیل بیشتر کردن سختی تیر معادل سازه سطحی سبب کاهش ماکزیمم نشست شده و در نتیجه سازه‌های با عرض بیشتر دارای رده ریسک کمتر می‌باشند.

- در عملکرد اقدام تحکیمی پیشگیرانه، تأثیر طول شمع‌های بتنی به مراتب بیشتر از فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها می‌باشد. این امر به دلیل سختی قابل صرف‌نظر شمع بتنی در مقایسه با سختی تیر معادل سازه سطحی ارزیابی می‌شود. با توجه به نتایج مدل‌سازی عددی، حداقل طول شمع لازم برای کاهش رده ریسک از ۳ به ۲ در سازه‌های ۳ طبقه برابر ۶ و در سازه‌های ۵ طبقه برابر ۱۰ متر می‌باشد. همچنین، حداقل عمق اجرای شمع برای

۶. مراجع

- اکبری، ص.، زارع، ش. و میرزایی، ح. ۱۳۹۴. "ارزیابی تأثیر عمق بر اندرکنش تونل‌های تکی و دوقلو در محیط‌های شهری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۴): ۵۹-۷۸.
- پنجی، م.، انصاری، ب. و اصغری مارنانی، ج. ۱۳۹۵. "تحلیل تنش تونل‌های سطحی در خاک‌های لایه‌ای با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۱): ۱۷-۳۲.
- دفتر امور مقررات ملی ساختمان وزارت راه و شهرسازی. ۱۳۹۲. "مبحث ۷ پی و پی‌سازی". نشر توسعه ایران، تهران.
- رضایی، ا. ح. و احترامی، ع. ا. ۱۳۹۶. "بررسی عملکرد ماشین حفاری مکانیزه تمام مقطع در محیط‌های شهری". مجله رویکردهای نوین در مهندسی عمران، ۱(۲): ۱۶-۳۱.
- رضایی، ا. ح. و بابائی، س. ۱۳۹۶. "بررسی اثرات پارامترهای مختلف در تعیین میزان بهینه فشار جبهه کار تونل‌های مکانیزه در خاک‌های رسی - سیلتی". نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۳(۸۸): ۳۳-۴۵.
- عباسی، ر. و حسینی، م. ۱۳۹۱. "بررسی تأثیر حفاری تمام مقطع تونل مترو بر روی ساختمان‌های مجاور (مطالعه موردی: خط یک متروی تبریز)". روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۲(۴): ۷۰-۵۹.
- کاتبی، ه. و سعدین، م. ۱۳۸۹. "تحلیل و پیش‌بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونل‌سازی (مطالعه موردی: پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز)". مهندسی حمل و نقل، ۱(۴): ۶۷-۸۵.
- کاتبی، ه.، رضایی، ا. ح. و حاجی علیلویناب، م. ۱۳۹۴. "بررسی تأثیر مشخصات سازه‌های سطحی و لایه‌بندی زمین در بارهای وارد بر پوشش تونل با استفاده از روش المان محدود". مجله مهندسی عمران شریف، ۲(۳۱/۴): ۳-۱۴.
- ملکی، م.، بائی، ب. و بیٹی، م. ۱۳۸۹. "بررسی تأثیر اندرکنش گودبرداری و سازه‌ی مجاور آن در تحلیل گودبرداری‌ها در محیط شهری". نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۱(۲): ۲۵-۴۰.

Bilotta, E. and Russo, G. 2010. "Use of a line of piles to prevent damages induced by tunnel excavation". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 137(3): 254-262.

Boscardin, M. D. and Cording, E. J. 1989. "Building response to excavation-induced settlement". Journal of Geotechnical Engineering, 115(1): 1-21.

- Burland, J.B., Broms, B.B. and DeMello, V.F.B. 1977. "Behaviour of Foundations and Structures". Proc.: IX ICSMFE. Tokyo, State-of-the-Art Report, Session 2, Vol.2.
- Burland, J. B. 1995. "Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation". 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo.
- Di Mariano, A., Gesto, J. M., Gens, A. and Schwarz, H. 2007. "Ground deformation and mitigating measures associated with the excavation of a new metro line". In: Proc. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE, pp. 1901-1906.
- Fantera, L., Rampello, S. and Masini, L. 2016. "A mitigation technique to reduce ground settlements induced by tunnelling using diaphragm walls". Proc. Eng., 158: 254-259.
- Farrell, R. P. and Mair, R. J. 2010. "Centrifuge modelling of the response of buildings to tunneling". PP. 549-554. In: Springman, S., Laue, J. and Seward, L. (Eds.), Physical Modelling in Geotechnics, CRC Press.
- Franzius, J. N. 2003. "Behavior of buildings due to tunnel induced subsidence". PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK.
- Gens, A., Di Mariano, A., Gesto, J. M. and Schwarz, H. 2006. "Ground movement control in the construction of a new metro line in Barcelona. In: Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Proceedings of the 5th International Symposium TC28, Amsterdam, The Netherlands, 15-17 June, CRC Press.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S. 2008. "Mechanized tunnelling in urban areas: Design methodology and construction control". CRC Press.
- Kitiyodom, P., Matsumoto, T. and Kawaguchi, K. 2005. "A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunneling". Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 29(15); 1485-1507.
- Lee, Y. J. and Yoo, C. S. 2006. "Behaviour of a bored tunnel adjacent to a line of loaded piles". Tunn. Undergr. Sp. Tech., 21(3-4): 370.
- Loganathan, N., Poulos, H. G. and Xu, K. J. 2001. "Ground and pile-group responses due to tunneling". Soils Found., 41(1): 57-67.
- Mair, R. J., Taylor, R. N. and Burland, J. B. 1996. "Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling". In: International Conference of Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, UK, pp. 713-718.
- Mroueh, H. and Shahrour, I. 2003. "A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction". Comp. Geotech., 30(3): 245-253.
- Potts, D. M. and Addenbrooke, T. I. 1997. "A structure's influence on tunnelling-induced ground movements". Proc. Inst. Civ. Eng.: Geotech. Eng., 125(2).
- Potts, D. M., Zdravkovic, L. and Zdravković, L. 2001. "Finite element analysis in geotechnical engineering: Application". Vol. 2, Thomas Telford.
- Rankin, W. J. 1988. "Ground movements resulting from urban tunnelling: Predictions and effects". Geological Society, Engineering Geology Special Publications, London, 5(1): 79-92.
- Teo, P. L. and Wong, K. S. 2012. "Application of the hardening soil model in deep excavation analysis". The IES J., Part A: Civ. Struct. Eng., 5(3): 152-165.
- Vahdatirad, M. J., Ghodrati, H., Firouzian, S. and Barari, A. 2010. "Analysis of an underground structure settlement risk due to tunneling-A case study from Tabriz, Iran". Songklanakarin J. Sci. Technol., 32(2).