



مقاله پژوهشی

پیش بینی شدت آسیب پذیری ساختمان ها در اثر نشست ناشی از تونل سازی با مطالعه رفتار ژئومکانیکی محیط دربرگیرنده

فرشاد کولیوند^{۱*}

^۱ - گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

(دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۳، پذیرش: مهر ۱۴۰۳)

چکیده

مهم ترین چالش تونل سازی شهری مواجهه با نشست و اثرات مخرب آن بر ساختمان های اطراف است که ممکن است پیامدهای مالی و اجتماعی نامطلوب فراوانی داشته باشد. پارامترهای ژئوتکنیکی محیط های آبرفتی تأثیر قابل توجهی بر جابجایی ها و حرکت خاک و در نتیجه نشست سطح زمین دارد. بنابراین مطالعه ارتباط پارامترهای ژئوتکنیکی و چگونگی رفتار تغییر شکل محیط راهکار مفیدی برای پیش بینی شدت آسیب وارد بر ساختمان ها است. در این مقاله تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بخش شرقی-غربی تونل خط ۷ مترو تهران بر نشست ناشی از تونل سازی و اثرات متعاقب آن بر شدت آسیب وارد بر ساختمان های مجاور بررسی شد. شدت آسیب ساختمان ها به ازای پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس پارامترهای تغییر شکل ساختمان ارزیابی شد. نتایج نشان می دهد شدت آسیب ساختمان ها به طور قابل توجهی به تغییرات مدول الاستیسیته خاک حساس است و تغییرات اندک مدول الاستیسیته منجر به تغییر آسیب ساختمان از آسیب های ساختاری شدید (آسیب رده های ۴ و ۵) به آسیب های غیرساختاری و جزئی (آسیب های رده ۰ و ۱) می شود. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی تأثیر کمی بر پارامترهای تغییر شکل ساختمان دارد و شدت آسیب های ساختمان را به طور قابل توجهی تغییر نمی دهد. همچنین افزایش تأثیر چسبندگی لایه های خاک بر شدت آسیب ساختمان بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی و کمتر از مدول الاستیسیته خاک است که می تواند رده آسیب های ساختمان را از آسیب های نسبتاً شدید تا آسیب های متوسط کاهش دهد.

کلمات کلیدی

تونل سازی شهری؛ آسیب ساختمان؛ خصوصیات ژئوتکنیکی؛ تغییر شکل ساختمان

*معهده دار مکاتبات: kolivand.f@lu.ac.ir

۱- مقدمه

مهم‌ترین چالش تونل‌سازی شهری مواجهه با نشست و اثرات مخرب آن بر ساختمان‌ها است [۱-۳]. داشتن دید مناسب از رفتار زمین در پروژه‌های ژئوتکنیکی خصوصاً تونل‌سازی، مستلزم درک صحیح ارتباط بین رفتار مقاومتی خاک و محیط درون‌گیر است که موجب پیش‌بینی مناسب شدت آسیب ساختمان‌ها در اثر تونل‌سازی می‌شود. حفاری تونل موجب حرکت و تغییر شکل زمین می‌شود، بنابراین کنترل جابجایی‌ها و نشست زمین اهمیت زیادی دارد [۴، ۵]. برخی محققان در مطالعاتشان دریافتند که ویژگی‌های ژئوتکنیکی محیط‌های آبرفتی مانند مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) تأثیر مهمی بر جابجایی‌ها و حرکت خاک و در نتیجه نشست سطح دارند [۶-۸] که موجب آسیب به ساختمان‌های مجاور می‌شود. بنابراین مطالعه ارتباط پارامترهای ژئوتکنیکی و رفتار تغییر شکل محیط، راهکار مفیدی برای پیش‌بینی شدت آسیب وارد بر ساختمان‌های مجاور تونل است. همچنین آگاهی از میزان تأثیر هر پارامتر تا حدودی می‌تواند سبب انجام اقدامات پیشگیرانه به منظور جلوگیری از وارد آمدن آسیب به ساختمان‌های مجاور و یا کاهش آن شود [۹].

محققین مختلف رویکردهای متنوعی برای ارزیابی جنبه‌های مختلف نشست ارائه کرده‌اند که می‌توان آن‌ها را به صورت زیر دسته‌بندی کرد: پک [۱۰]، سلسنتین و همکاران [۱۱] و لو و همکاران [۱۲] مطالعات خود را بر اساس روش‌های تجربی انجام دادند. مدل‌سازی عددی سه‌بعدی تحلیل نشست و آسیب ساختمان توسط بلدینی و همکاران [۱۳] و لو و همکاران [۱۴] انجام گرفت. احمد و همکاران [۱۵]، فرانزا و همکاران [۱۶] و سومرو و همکاران [۱۷] مطالعات خود را بر مدل‌سازی فیزیکی و آزمایشگاهی متمرکز کردند. تحلیل تونل‌سازی بر اساس پایش و اندازه‌گیری‌های برجا توسط استندینگ و همکاران [۱۸] و کائو و همکاران [۱۹] انجام گرفت. ساگستا [۲۰]، وروجیت [۲۱]، بابت [۲۲]، یانگ و همکاران [۲۳]، پینو و همکاران [۲۴]، کونگ و همکاران [۲۵] و ژانگ و همکاران [۲۶] مطالعات خود را بر اساس شیوه‌های تحلیلی پیش بردند. هرچند راهکارهای مختلفی برای کاهش نشست پیشنهاد شده است، اما همچنان ساختمان‌های مجاور در اثر این نشست‌ها دچار آسیب‌های جزئی و کلی می‌شوند [۲۷، ۲۸]. برخی محققین نیز با

رویکردهای مختلف مطالعات خود را پیرامون اثرات نشست ناشی از تونل‌سازی بر شدت آسیب ساختمان متمرکز کردند. کلار و همکاران [۲۹] اندرکنش تونل- شبکه‌های لوله‌کشی را با تحلیل‌های الاستیکی خطی مورد مطالعه قرار دادند. بررسی تأثیر سختی معادل بر رفتار ساختمان‌های در معرض جابجایی‌های زمین توسط الیوب و همکاران [۳۰] انجام شد. یین و همکاران [۳۱] از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی برای ارزیابی آسیب ساختمان‌های آجری در اثر نشست ناشی از تونل‌سازی پرداختند. پیش‌بینی آسیب ساختمان در اثر تونل‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی توسط موسی‌زاده و همکاران [۳۲] انجام شد. فرانزا و همکاران [۳۳] از راه‌حل‌های فرم بسته و پیوسته برای اندرکنش تونل- ساختمان استفاده کردند. برآورد آسیب ساختمان در اثر حفاری‌های زیرزمینی توسط سان و همکاران [۳۴] انجام شد. می و همکاران [۳۵] به بررسی نشست یکنواخت سازه در اثر عبور تونل از زیر آن را مورد بررسی قرار دادند. کیتیودم و همکاران [۳۶] اندرکنش پی‌های شمع با جابجایی‌های زمین ناشی از تونل‌سازی را مورد بررسی قرار دادند. هوانگ و همکاران [۳۷] به بررسی واکنش پی‌های شمع به ساخت تونل پرداختند. گیراندا و همکاران [۳۸] مطالعات خود را بر تحلیل عددی نماهای آجری در معرض نشست متمرکز کردند. حاجی و همکاران [۳۹] با ترکیب روش‌های تجربی و عددی اثرات تونل‌سازی بر ساختمان‌های مجاور را مطالعه کردند. دیاس و همکاران [۴۰] اندرکنش ساخت شمع و تونل را مورد تحلیل قرار دادند. کی و همکاران [۴۱] با روش‌های نیمه‌تحلیلی به پیش‌بینی نشست ناشی از تونل‌سازی پرداختند. مطالعاتی نیز با تمرکز بر مشخصه‌های ساختمان انجام شده است. نینیک و همکاران [۴۲] با بررسی تغییر شکل‌های ایجادشده در ساختمان در اثر نشست بر برآورد شدت آسیب آن تمرکز کردند. فو و همکاران [۴۳] پاسخ ساختمان‌های اسکلت فلزی نسبت به تونل را مورد مطالعه قرار دادند. ژو و همکاران [۴۴] اندرکنش بین ساختمان‌های اسکلت فلزی دارای پی‌های نواری و تونل بررسی کردند. پاسکاریلو و همکاران [۴۵] رفتار ساختمان‌های آجری را نسبت به حفاری تونل در مجاور آن مورد تحلیل قرار دادند. چن و همکاران [۴۶] نیز مشخصات تغییر شکل و آسیب ساختمان نسبت به نشست تونل‌سازی را مورد تحلیل قرار دادند. در عمده این مطالعات تمرکز محققین بر برآورد نشست و تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر آن بوده است. البته

۲- مطالعات ژئوتکنیک و روش‌شناسی تحقیق

۲-۱- مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیک

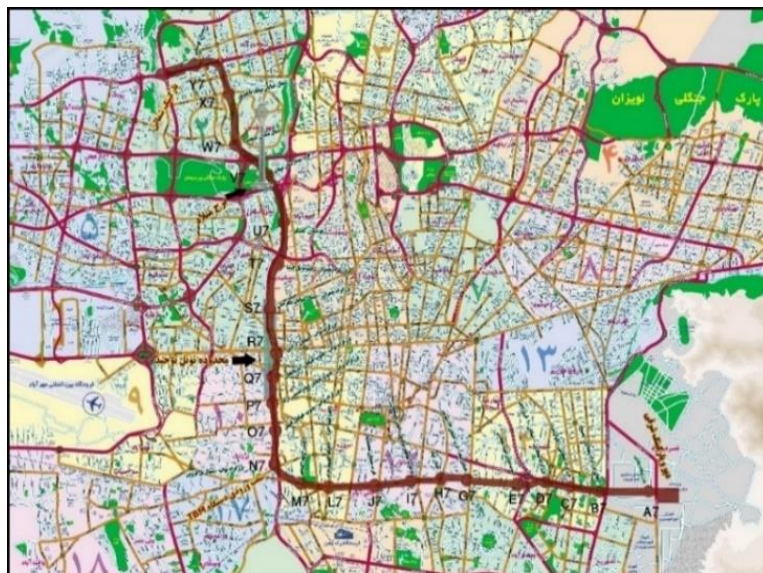
رسوبات آبرفتی گستره تهران را می‌توان در چهار سازند هزاردره (A)، کهریزک (B)، آبرفت تهران (C) و آبرفت جدید (آبرفت هولوسن) (D) تقسیم‌بندی کردند. در بین آن‌ها رسوبات نهشته‌های سازند A قدیمی‌ترین و نهشته‌های سازند B جدیدترین سری محسوب می‌شوند. ستون چینه‌شناسی آبرفت‌های تهران بر اساس تقسیم‌بندی رین در شکل ۱ نشان داده شده است [۴۷]. مطالعات به‌منظور شناسایی شرایط محیط و به دست آوردن پارامترهای ژئوتکنیکی، در سه مرحله آزمایش‌های صحرایی، آزمایشگاهی و دفتری و شامل حفاری ۶۱ گمانه (مجموع طول ۲۴۸۷/۷ متر) و ۱۶ چاهک دستی (مجموع طول ۲۹۶/۹۵ متر) انجام شده است [۴۸].

۲-۲- موقعیت پروژه

بخش شرقی-غربی تونل خط ۷ مترو تهران دارای طول ۱۲ کیلومتر و ۱۳ ایستگاه است. قطر آن ۹/۱۵ متر است که با یک دستگاه ماشین حفار تونل از نوع متعادل‌کننده فشار زمین (EPB TBM) حفاری می‌شود. مسیر شرقی-غربی خط ۷ مترو تهران نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

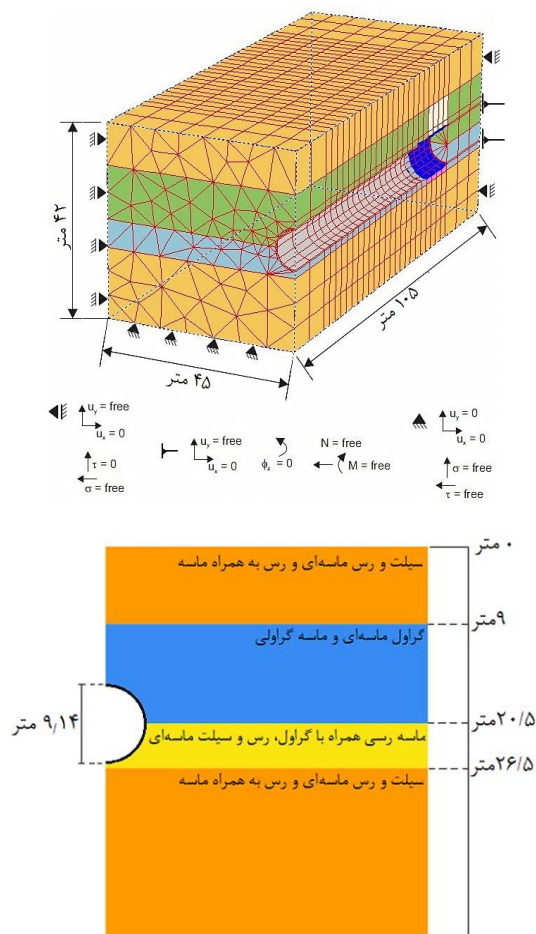
نحوه مدل‌سازی ساختمان از منظر نوع سازه، نوع پی و مصالح نما ساختمان نیز مطالعه شده است. به دلیل ویژگی‌های متفاوتی که خاک‌ها به علت تفاوت پارامترهای ژئوتکنیکی خود دارند در پاسخ به حفاری تونل، رفتارهای متفاوتی نشان می‌دهند؛ بنابراین مطالعه ارتباط پارامترهای ژئوتکنیکی و پیش‌بینی شدت آسیب ساختمان را ضروری می‌کند. بررسی مطالعات پیشین پیش‌بینی شدت آسیب ساختمان‌ها در اثر تونل‌سازی نشان می‌دهد تمرکز بر تأثیر مستقیم پارامترهای ژئوتکنیکی بر شدت آسیب ساختمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله به‌منظور بررسی شدت آسیب‌پذیری ساختمان ناشی از تونل‌سازی، تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر جابجایی‌های خاک و تغییر شکل ساختمان مطالعه شد. بدین منظور پارامترهای مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در تونل خط ۷ مترو تهران، با استفاده از روش عددی اجزا محدود مطالعه شد. شدت آسیب ساختمان‌ها بر مبنای ارزیابی پارامترهای تغییر شکل ساختمان بررسی شد. بدین‌منظور پارامترهای تغییر شکل ساختمان شامل حداکثر نشست ($S_{v,max}$)، حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$)، حداکثر شیب ساختمان (θ_{max})، حداکثر کرنش کششی (ϵ_{max}) و حداکثر اعوجاج زاویه‌ای (β_{max}) ساختمان مورد تحلیل قرار گرفتند.



شکل ۱: ستون چینه‌شناسی آبرفت‌های تهران و مسیر تونل خط ۷ مترو تهران [۴۷]

مشخصات هندسی و ویژگی‌های زمین‌شناسی در شکل ۲ و مشخصات اجزاء سپر در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: مشخصات هندسی و زمین‌شناسی

جدول ۲: مشخصات اجزاء سپر استفاده‌شده در مدل‌سازی

سپر	واحد	مقدار
سختی محوری EA	(kN/m)	8.2×10^6
سختی خمشی EI	(kNm ² /m)	8.38×10^4
وزن حجمی W	(kN/m/m)	38.15

۲-۳-۲- رفتار سنجی پروژه

به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌های عددی، از پارامتر نشست سطح زمین به‌عنوان پارامتر شاخص استفاده شد. بدین منظور داده‌های ابزار دقیق بخشی از مسیر تونل که رفتار سنجی آن به‌طور دقیق انجام شده است، برای اعتبارسنجی تحلیل‌های عددی استفاده شد. اندازه‌گیری نشست در پین‌های نشست‌سنجی، در فاصله ۴۵ متری قبل از رسیدن سینه‌کار تونل به آن شروع می‌شود. ابتدا اندازه‌گیری‌ها به‌صورت ماهانه و هفتگی و با نزدیک شدن سینه‌کار به محل پین، اندازه‌گیری به‌صورت روزانه انجام شده است. با پیشروی

۳-۲- مدل‌سازی عددی و اعتبارسنجی

۱-۳-۲- مدل‌سازی و هندسه شبکه اجزاء محدود

برای شبیه‌سازی فرآیند ساخت تونل و تحلیل شدت آسیب ساختمان از مدل‌سازی عددی استفاده شد. مدل‌سازی عددی اجازه می‌دهد محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی، روش‌های ساخت تونل، ساختمان‌ها و غیره را مدل‌سازی کنند [۴۹-۵۱]. فرآیند تونل‌سازی با روش اجزاء محدود سه‌بعدی و کد Plaxis 3DTunnel شبیه‌سازی شد. به علت تقارن، نیمه تونل مدل شده و برای اجتناب از تأثیرگذاری مرزها بر نتایج، شبکه اجزاء محدود با عرض ۴۵، ارتفاع ۴۲ و طول ۱۰۵ متر و با اجزاء مثلثی ۱۵ گرهی ساخته شد. سپر به طول ۱۰/۵ متر با اجزاء صفحه‌ای و با خواص فولاد مدل‌سازی شد. طول گام حفاری معادل با عرض سگمنت‌ها ۱/۵ متر است. سگمنت‌ها با استفاده از اجزاء حجمی و با خواص بتن مسلح مدل‌سازی شد. برای بار ترافیک، روباره ۲۰ کیلوپاسکال بر بالای مدل اعمال شد. رفتار خاک نیز با استفاده از مدل خاک سخت‌شونده مدل‌سازی شد. برای مدل‌سازی اندرکنش بین خاک و پوشش تونل از اجزاء حد واسطه^۱ استفاده شد. با توجه احداث قسمت شرقی-غربی تونل خط ۷ مترو تهران در بافت قدیمی تهران که عمده ساختمان‌ها به‌صورت آجری با پی سنگ‌چینی هستند؛ بنابراین ساختمان‌ها در مدل عددی به‌صورت یک پی بتنی (ملاتی) با اعمال بار یک ساختمان یک طبقه بر روی آن مدل‌سازی شده‌اند. ساختمان‌ها در فاصله ۱۳/۵ متری از محور مرکزی تونل (مطابق با واقعیت محل مورد مطالعه) مدل‌سازی شد. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک

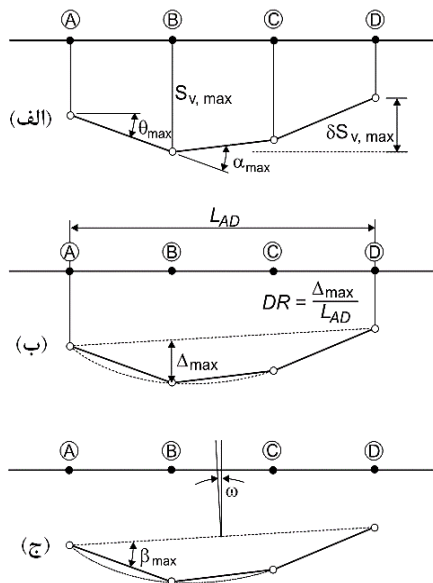
لایه‌ها	عمق	پارامتر	واحد	مقدار
L1	۲۰-۹/۵	E_{50}^{ref}	(MN/m ²)	۷۰
		C_{ref}	(kN/m ²)	۱۶
		ϕ	°	۳۴
L2	۲۰/۲۶-۵/۵	E_{50}^{ref}	(MN/m ²)	۴۰
		C_{ref}	(kN/m ²)	۳۲
		ϕ	°	۳۰
L3	۹-۰ ۲۶/۴۲-۵	E_{50}^{ref}	(MN/m ²)	۳۵
		C_{ref}	(kN/m ²)	۳۰
		ϕ	°	۲۸

مدل‌سازی عددی با نشست اندازه‌گیری شده ابزار دقیق‌ها، اعتبار مدل‌سازی عددی قوت بخشیده می‌شود. نتایج نشست حاصل از ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی، در جدول ۳ و منحنی‌های نشست متناظر با نقاط ترازیبی ابزار دقیق در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج نشست ابزار دقیق و مدل‌سازی عددی

ابزار	فاصله از محور تونل (متر)	حداکثر نشست ابزار دقیق (SP) (میلی‌متر)	حداکثر نشست مدل‌سازی عددی (NM) (میلی‌متر)	خطای مدل‌سازی (میلی‌متر)	خطا (درصد)
P1	۰	۴۶٫۶	۴۲٫۷	۳٫۹	۹٫۰۱
P2	۰	۵۴٫۲	۵۰٫۷	۳٫۵	۶٫۹۷
P3	۰	۴۸٫۷	۴۵٫۲	۳٫۵	۷٫۶۹
p4	۰	۶۱٫۶	۶۴٫۶	۳٫۰	۴٫۷
P6	۰	۵۷٫۴	۵۳٫۳	۴٫۱	۷٫۶۷

۹- کرنش افقی (ϵ_h)، نسبت تغییرات طول به طول اولیه در جهت افقی است.



شکل ۳: تعریف پارامترهای تغییر شکل ساختمان [۵۸]

به‌منظور مطالعه تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر نشست و در نتیجه شدت آسیب ساختمان مجاور، از مدل‌سازی عددی استفاده شد. در تحلیل پارامترهای خاک، خصوصیات ژئومکانیکی محیط مانند مدول الاستیسیته (E)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، بر اساس جابجایی‌ها، کرنش‌ها و فشارهای اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شوند [۵۳]. با توجه به دامنه پارامترهای ژئوتکنیکی حاصله از مطالعات ژئوتکنیک، شبیه‌سازی عددی حفاری تونل با اختصاص مقادیر مختلف پارامترهای (E)، (C) و (ϕ) به لایه

سینه‌کار و دور شدن از پین، اندازه‌گیری‌ها به‌صورت روزانه و هفتگی و سپس ماهانه انجام شده است. درواقع مقادیر نشست استفاده‌شده برای اعتبارسنجی، نشست‌های تثبیت‌شده و نهایی هستند که حد نهایی نشست بوده و بیشتر از آن رخ نداده است. در این رویکرد با مقایسه نشست

مقایسه داده‌های نشست حاصل از ابزار دقیق و نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد با پذیرش مقدار خطای کمتر از ۱۰ درصد می‌توان گفت که مدل‌سازی عددی تطابق نزدیکی با نتایج ابزار دقیق داشته و اعتبار مناسبی برای شبیه‌سازی رفتار زمین نسبت به فرآیند حفاری تونل دارد.

۴-۲- روش‌شناسی تحقیق

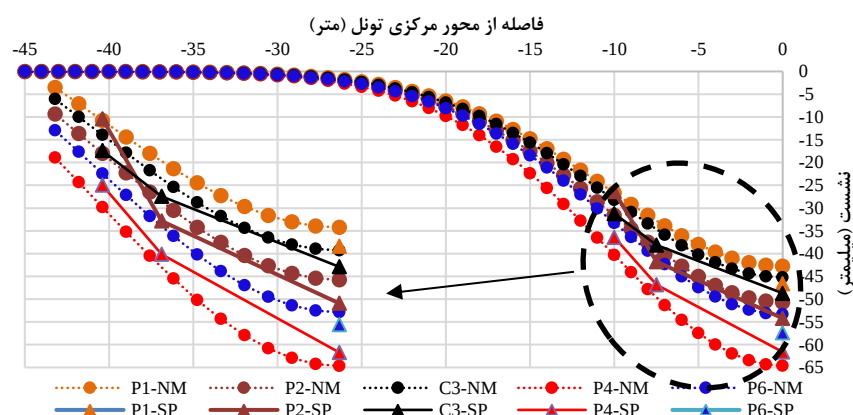
۴-۲-۱- مقدمه

در این مطالعه ابتدا معیارهای دسته‌بندی آسیب‌های ساختمان‌های مجاور تونل توصیف شده است. ورت و بولند [۵۲]، ۹ پارامتر را برای تغییر شکل ساختمان ناشی از نشست را به‌صورت زیر پیشنهاد کردند (شکل ۳):

- ۱- نشست (S_v)، حرکت قائم یک نقطه است.
- ۲- نشست نسبی (δS_v)، اختلاف نشست بین دونقطه است.
- ۳- چرخش یا شیب (θ)، تغییر در گرادیان خط مستقیمی است که دونقطه مرجع در سازه را به هم وصل می‌کند.
- ۴- کرنش زاویه‌ای (α)، فرورفتگی یا برآمدگی ایجادشده در پی ساختمان را نشان می‌دهد.
- ۵- انحناء نسبی (Δ)، حداکثر جابجایی نسبت به خط راست واصل بین دونقطه مرجع با طول L است.
- ۶- نسبت انحناء (DR)، نسبت انحناء نسبی به طول متناظر آن است ($DR = \Delta/L$).
- ۷- کجی (ω)، چرخش کل سازه به‌صورت صلب است.
- ۸- اعوجاج زاویه‌ای (β)، چرخش خط راست واصل بین دونقطه شاهد نسبت به کجی است.

$(\varepsilon_{\max})$ و حداکثر اعوجاج زاویه‌ای $(\beta_{\max})$ از هر یک از مدل‌های عددی، ارزیابی و تراز شدت آسیب ساختمان با توجه به یافته‌های محققین مختلف مورد تحلیل قرار گرفت.

L_3 انجام شد. سپس ۵ پارامتر تغییر شکل ساختمان شامل حداکثر نشست $(S_{v,\max})$ ، حداکثر نشست تفاضلی $(\delta S_{v,\max})$ ، حداکثر شیب ساختمان $(\theta_{\max})$ ، حداکثر کرنش کششی



شکل ۴: منحنی‌های نشست مربوط به نقاط ترازیبی ابزار دقیق در مسیر تونل

بنابراین پهنای ترک پارامتر ضروری در ارزیابی آسیب ساختمان به حساب می‌آید. بولند و همکاران [۵۲] بعد از بررسی‌های متعدد و استفاده از تحقیقات مشابه، آسیب‌های وارده بر ساختمان‌ها را در شش دسته (۰ تا ۵) دسته‌بندی کردند که در جدول ۴ ارائه شده است.

۲-۴-۲- معیار دسته‌بندی آسیب‌های وارد بر ساختمان

آسیب در ساختمان عمدتاً با ایجاد ترک در مواد ساختمانی همراه است. شکست در سازه در اثر ترک خوردن بیش‌ازاندازه یا انتقال بار زیاد به این سازه‌ها اتفاق می‌افتد.

جدول ۴: طبقه‌بندی آسیب‌های احتمالی وارد بر ساختمان‌ها و توصیف آن‌ها [۵۲]

رده آسیب	شدت آسیب	توصیف نوع آسیب	عرض ترک (میلی‌متر)	کرنش کششی
۰	قابل صرف‌نظر	ترک‌های موئی کمتر از ۰/۱ میلی‌متر	< ۰/۱	۰ - ۰/۰۵
۱	بسیار کم	ترک‌ها عرض بیشتر از ۰/۱ میلی‌متر تا ۱ میلی‌متر دارند. هم در دیوارهای داخلی و هم در دیوارهای خارجی نیز دیده شود	از ۰/۱ تا ۱/۰	۰/۰۵ - ۰/۰۷۵
۲	کم	ترک‌ها عرضی تا ۵ میلی‌متر دارند. درها و پنجره‌ها کمی دچار مشکل می‌شوند.	از ۱/۰ تا ۵/۰	۰/۰۷۵ - ۰/۱۵
۳	متوسط	ترک‌ها عرض بین ۵ میلی‌متر تا ۱۵ میلی‌متر دارند. در و پنجره به‌سختی باز شده ممکن است لوله‌ها دچار ترک‌خوردگی شوند.	۱۵ تا ۲۵	۰/۱۵ - ۰/۳
۴	شدید	ترک‌ها حدود ۱۵ میلی‌متر تا ۲۵ میلی‌متر بازشدگی دارند. قاب در و پنجره‌ها کج می‌شود. لوله‌ها آسیب جدی می‌بینند. بعضی دیوارها نیاز به تخریب و ساخت مجدد دارند.	۲۵ تا ۳۰	> ۰/۳
۵	خیلی شدید	ترک‌ها با عرض بیش از ۲۵ میلی‌متر امکان نیاز به بازسازی جزئی یا تمام ساختمان، تیرها و دیوارها باربری خود را از دست می‌دهند. خطر ناپایداری و ریزش ساختمان وجود دارد.	بیشتر از ۳۰	> ۰/۳

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدول الاستیسیته (E)

۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال انجام شد. در مدل‌سازی پی ساختمان با طول و عرض ۱۳/۵ متر در نظر گرفته شد که شکل ۵ نمودار حداکثر نشست $(S_{v,\max})$ و حداکثر نشست تفاضلی $(\delta S_{v,\max})$ زیر پی ساختمان به ازای مدول‌های الاستیسیته مختلف را نشان می‌دهد.

به‌منظور مطالعه تأثیر مدول الاستیسیته بر تغییر شکل زمین و در نتیجه آسیب ساختمان، شبیه‌سازی فرآیند ساخت تونل با اختصاص مدول‌های الاستیسیته ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰،

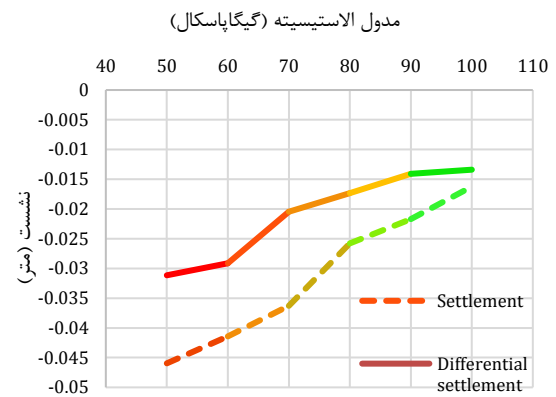
مربوط به ساختمان‌های فلزی یا ساختمان‌های بتن مسلح هستند که در این تحقیق مدنظر ما نیستند.

نتایج نشان می‌دهد با افزایش E از ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال، نشست ($S_{v,max}$) حدود ۶۵ درصد کاهش یافته است اما همچنان آسیب‌های ساختاری در ساختمان را نشان می‌دهد. کاستر و همکاران [۵۹] گفتند نشست یکنواخت ($S_{v,max}$)، زیاد خطرناک نبوده و بعید است مخاطرات زیادی برای ساختمان داشته باشد، اما می‌تواند خطرات جدی برای تأسیسات عمومی داشته باشد؛ بنابراین برآورد دقیق‌تر آسیب ساختمان در اثر نشست کلی ($S_{v,max}$) نیازمند بررسی سایر پارامترهای تغییر شکل ساختمان است.

نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$) پدیده خطرناکی است که در آن، نشست در قسمت‌های مختلف پی ساختمان متفاوت بوده و باعث تغییر شکل غیریکنواخت و آسیب ساختمان می‌شوند. این می‌تواند منجر به چرخش ساختمان، تغییر شکل و آسیب‌های بعدی شود [۵۹]. ترزاقی [۶۰] اشاره کرد برای اجتناب از آسیب ساختاری به ساختمان، نشست تفاضلی کمتر از ۲۰ میلی‌متر باشد. نتایج نشان می‌دهد در مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال نشست تفاضلی زیر پی ساختمان ۳۱ میلی‌متر است. با افزایش E تا ۷۰ مگاپاسکال، نشست تفاضلی به ۲۰ میلی‌متر کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش آسیب ساختمان است ولی مطابق با گفته‌های ترزاقی هنوز در محدوده آسیب‌های ساختاری قرار دارد. البته رانکین [۶۱] نیز پیشنهاد داد نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$) کمتر از ۱۰ میلی‌متر آسیب جدی به ساختمان وارد نخواهد کرد. با افزایش E از ۷۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال نشست تفاضلی به کمتر از ۲۰ میلی‌متر و تا ۱۳ میلی‌متر کاهش می‌یابد که کاهش آسیب ساختمان تا محدود آسیب‌های جزئی را به دنبال دارد

۳-۱-۲- حداکثر شیب (θ_{max})

ترزاقی [۶۰] توصیه کرد برای جلوگیری از آسیب به ساختمان حداکثر شیب (θ_{max}) ۰/۰۰۴ (۱/۲۵۰) باشد. اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] پیشنهاد کردند حداکثر شیب (θ_{max}) بین ۰/۰۰۲ (۱/۵۰۰) تا ۰/۰۰۴ محدود شود تا آسیب‌های جدی به ساختمان وارد نشود. همچنین گاهی لازم است برای جلوگیری از ترک رویه گچی ساختمان، نیز مقدار θ_{max} کمتر از ۰/۰۰۲ (۱/۵۰۰) تا ۰/۰۰۱ (۱/۱۰۰۰) محدود شود. پولشین و توکار [۶۲] حداکثر شیب برای ساختمان‌های



شکل ۵: نمودار حداکثر نشست ($S_{v,max}$) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$) زیر پی ساختمان به ازای مدول‌های الاستیسیته مختلف

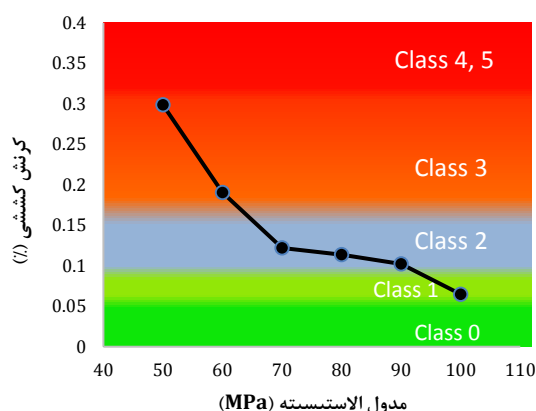
۳-۱-۱- حداکثر نشست ($S_{v,max}$) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$)

شکل ۵ نشان می‌دهد افزایش مدول الاستیسیته (E) موجب افزایش مقاومت خاک و کاهش نشست ($S_{v,max}$) زیر ساختمان می‌شود. در مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال نشست ($S_{v,max}$) ۴۶ میلی‌متر است. مایر [۵۴] نشست‌های کمتر از ۱۰ میلی‌متر زیر ساختمان را قابل اغماض دانست. البته ایشان همراه شدن نشست بیش از ۱۰ میلی‌متر در زیر ساختمان با شیب (θ_{max}) بیشتر از ۰/۰۰۲ را تأثیرگذار بر آسیب ساختمان عنوان کرده و ترازهای آسیب کمتر از ۲ را نیز قابل صرف‌نظر کردن دانست. بر این اساس، نشست ۴۶ میلی‌متر، آسیب‌های ساختاری شدید را در ساختمان ایجاد می‌کند. افزایش مقدار E از ۵۰ تا ۷۰ مگاپاسکال، منجر به کاهش نشست ساختمان با شیب نسبتاً زیاد شده و به ۲۹ میلی‌متر کاهش یافته است. هرچند با افزایش E ، نشست‌ها تا حدود ۳۷ درصد کاهش یافته، اما همچنان موجب آسیب‌های ساختاری در ساختمان می‌شود. با افزایش E به بالاتر از ۷۰ مگاپاسکال، نشست زیر ساختمان با شیب کم کاهش یافته و در مدول الاستیسیته ۱۰۰ مگاپاسکال، به ۱۶ میلی‌متر رسیده است.

انجمن تونل مقادیر ۱۰ میلی‌متر در زیر ساختمان‌ها و ۲۰ میلی‌متر در زیر خیابان‌ها را حد مجاز نشست تعریف کرده است که به نظر مایر نزدیک است [۵۵]. همچنین آتوول [۵۶] نیز مقادیر نشست کمتر از ۱۰ میلی‌متر را قابل صرف‌نظر و مقادیر بیش از ۷۵ میلی‌متر را بحرانی معرفی کرد. البته مقادیر حداکثر نشست ۷۵ میلی‌متر یا ۵۰ میلی‌متر توسط اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] و گرانت و همکاران [۵۸] نیز به‌عنوان نشست مجاز تعریف شد که

۳-۱-۳- حداکثر کرنش کششی (ϵ_{max})

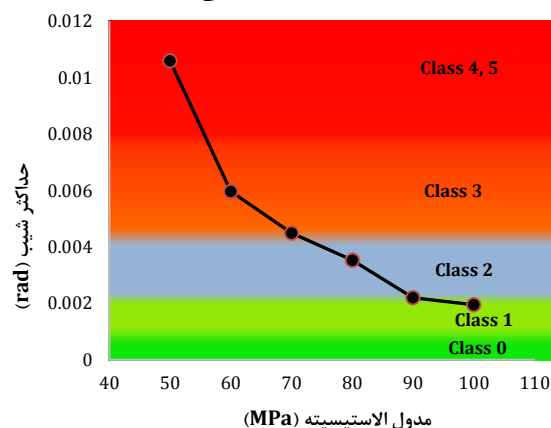
مفهوم کرنش کششی (ϵ_{max}) برای آسیب ساختمان بسیار مهم است. کرنش کششی و اهمیت آن بر آسیب ساختمان توسط محققین مختلف بررسی شد [۶۴]. توکار و پولشین [۶۲] پیشنهاد دادند کرنش حداکثر کششی بحرانی (ϵ_{max}) که منجر به ایجاد ترک در ساختمان می‌شود، ۰/۰۵ درصد است. ورت و بولرند [۵۲] کرنش کششی مجاز برای ساختمان‌های آجری را بین ۰/۱ درصد و ۰/۰۵ درصد و برای ساختمان‌های بتنی بین ۰/۰۵ درصد و ۰/۰۳ درصد معرفی کردند. نمودار حداکثر کرنش کششی به ازای مدول الاستیسیته در شکل ۷ ارائه شده است. حداکثر کرنش کششی در مدول الاستیسیته ۱۰۰ مگاپاسکال حدود ۰/۰۶۴ درصد است. با کاهش E تا ۷۰ مگاپاسکال، حداکثر کرنش کششی تا ۰/۱۲۲ درصد افزایش یافته که آسیب‌های جزئی در ساختمان ایجاد می‌کند. با کاهش E به زیر ۷۰ تا ۵۰ مگاپاسکال، افزایش حداکثر کرنش کششی با شیب زیادی افزایش یافته و تا ۰/۳ درصد افزایش یافته است که معادل رده آسیب ۳ در ساختمان است. در E کمتر از ۶۵ مگاپاسکال حداکثر کرنش کششی از ۰/۱۵ درصد عبور کرده و منجر به وقوع آسیب ساختاری در ساختمان می‌شود که با یافته‌های ورت و بولرند [۵۲] و بوسکاردین و کوردینگ [۶۴] مطابقت دارد. چون ساختمان در قسمت فرورفتگی منحنی نشست مدل‌سازی شده، کرنش‌های کششی موجب ایجاد ترک‌های کششی در قسمت پایین پی می‌شوند. این کرنش‌های کششی کمتر به دیوارهای بالایی انتقال یافته و آسیب کمتری به ساختمان وارد می‌شود.



شکل ۷: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر کرنش کششی ساختمان (ϵ_{max}) به ازای مدول الاستیسیته‌های مختلف

فولادی را ۰/۰۰۲ و برای ساختمان‌های بتنی را ۰/۰۰۵ پیشنهاد دادند. بولرند و همکاران [۶۳] بر این عقیده بودند که اگر حداکثر شیب ۰/۰۰۴ رخ دهد، نما و ظاهر ساختمان تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مایر و همکاران [۵۴] پیشنهاد کردند حداکثر شیب (θ_{max}) کمتر از ۰/۰۰۲ باشد.

نمودار شدت آسیب ساختمان براساس حداکثر شیب ساختمان به ازای مدول الاستیسیته در شکل ۶ ارائه شده است. در کمترین مدول الاستیسیته (۵۰ مگاپاسکال)، شیب ساختمان ۰/۰۱ است که موجب آسیب‌های ساختاری رده ۴ و ۵ به ساختمان می‌شود. با افزایش مدول الاستیسیته به ۶۰ و ۷۰ مگاپاسکال، شیب ساختمان با شدت بالایی کاهش یافته و به ترتیب به ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۴ می‌رسد، اما همچنان آسیب ساختاری رده ۳ را بر ساختمان تحمیل می‌کند. این موضوع با یافته‌های ترازقی [۶۰]، اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] و بولرند و همکاران [۶۳] که شیب مجاز برای جلوگیری از آسیب ساختاری را ۰/۰۰۴ اعلام کردند مطابقت نسبتاً خوبی دارد. نتایج نشان می‌دهد در مدول الاستیسیته ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال، شیب ساختمان تغییر قابل توجهی نداشته و در محدوده ۰/۰۰۱۹ تا ۰/۰۰۳۵ است. آسیب‌های ناشی از این مقدار شیب، در رده‌های ۱ و ۲ هستند که غیرساختاری بشمار می‌آیند زیرا اسکمپتون و مک‌دونالد [۶۹]، شیب مجاز برای جلوگیری از ترک در رویه گچی را ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۲ معرفی کردند. نتایج نشان می‌دهد در مدول الاستیسیته کمتر از ۷۵ مگاپاسکال شیب ساختمان از ۰/۰۰۴ عبور کرده و موجب شروع آسیب‌های ساختاری در ساختمان می‌شود. در نهایت افزایش مدول الاستیسیته از ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال موجب کاهش حداکثر شیب ساختمان و در نتیجه کاهش شدت آسیب از رده ۴ و ۵ به رده ۱ می‌شود.



شکل ۶: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر شیب ساختمان به ازای مدول الاستیسیته مختلف

۳-۱-۴- حداکثر اعوجاج زاویه‌ای (β_{max})

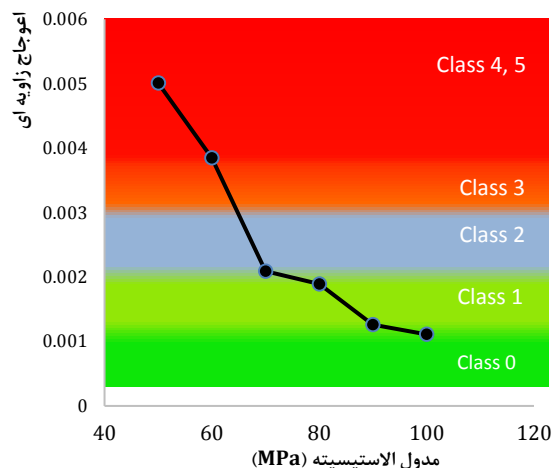
اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] دریافتند که ترک‌خوردگی در ساختمان زمانی اتفاق می‌افتد که β_{max} بیشتر از 0.0033 باشد و توصیه کردند که برای اهداف طراحی باید کمتر از 0.002 ($\frac{1}{500}$) باشد. بر اساس این معیار آسیب ساختاری در ساختمان زمانی اتفاق می‌افتد که β_{max} بیشتر از 0.0066 ($\frac{1}{150}$) رخ دهد. پولشین و توکار [۶۲] نیز در مورد اعوجاج زاویه‌ای همان معیار مک‌دونالد و اسکمپتون را توصیه کردند. جروم [۶۵] در تکمیل تحقیقات آن‌ها، اعوجاج زاویه‌ای (β) را به‌عنوان معیاری برای بررسی آسیب ساختمان به صورت جدول ۳ ارائه کرد.

جدول ۵: جزئیات روش جروم [۶۵]

اعوجاج زاویه‌ای	توصیف آسیب ساختمان
$\beta > \frac{1}{750}$	برای دستگاه‌های حساس به نشست خطرناک است.
$\beta > \frac{1}{600}$	برای اسکلت ساختمان‌ها خطرناک است.
$\beta \leq \frac{1}{500}$	در این حالت در ساختمان نباید ترک‌خوردگی اتفاق بیفتد.
$\beta > \frac{1}{300}$	ترک‌های اولیه ظاهر می‌شوند.
$\beta > \frac{1}{250}$	کجی ساختمان‌های بلند قابل توجه خواهد بود.
$\beta > \frac{1}{150}$	ترک‌خوردگی شدید در دیوارهای آجری آسیب ساختاری به سازه وارد خواهد شد.

شکل ۸ نمودار حداکثر اعوجاج زاویه‌ای به ازای مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. در مدول‌های الاستیسیته ۷۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال، حداکثر اعوجاج زاویه‌ای از 0.002 تا 0.001 کاهش یافته است که بر اساس یافته‌های اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] و جروم [۶۵] آسیب‌ها جزئی بوده و مطابق با معیار ورث و بورلند [۵۲] آسیب‌های رده ۰ و ۱ را در ساختمان ایجاد می‌کند. در مدول الاستیسیته ۶۵ مگاپاسکال، حداکثر اعوجاج زاویه‌ای تا 0.0038 افزایش یافته که موجب آسیب‌های ساختاری رده ۳ و بالاتر در ساختمان می‌شود. کاهش مدول الاستیسیته تا ۵۰ مگاپاسکال موجب افزایش حداکثر اعوجاج زاویه‌ای تا 0.005 شده است که بیشتر از معیار $\frac{1}{300}$ (شروع آسیب‌های ساختاری در ساختمان) است و آسیب‌های شدید رده ۴ و ۵ را در ساختمان ایجاد خواهند کرد. شیب نمودار کاهش حداکثر کرنش کششی، در بازه مدول الاستیسیته ۵۰ تا ۷۰ مگاپاسکال زیاد است. بدین معنی که کاهش اعوجاج زاویه‌ای به دلیل افزایش مدول الاستیسیته، در مدول‌های الاستیسیته کم (کمتر از ۷۰ مگاپاسکال) ملموس‌تر است. بر اساس

مقادیر حداکثر اعوجاج زاویه‌ای، می‌توان مرز بین آسیب‌های ساختاری و آسیب‌های جزئی در ساختمان را در مدول الاستیسیته ۶۵ مگاپاسکال تعیین کرد که در مدول الاستیسیته بالاتر از آن، آسیب‌ها ناچیز بوده و در مدول الاستیسیته کمتر از آن، آسیب‌ها شدید خواهند بود.



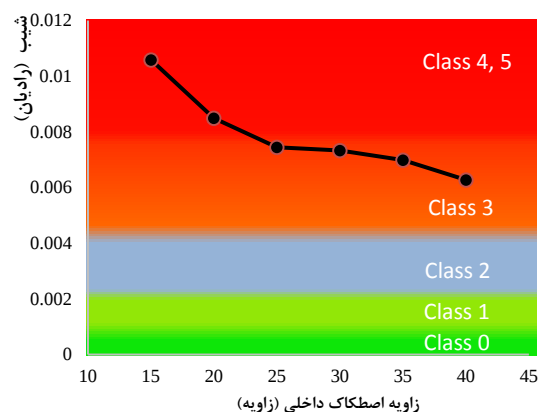
شکل ۸: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر اعوجاج زاویه‌ای ساختمان به ازای مدول الاستیسیته مختلف

۳-۲- زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)

تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر آسیب ساختمان، در شش مدل عددی با اختصاص زاویه اصطکاک داخلی ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درجه به خاک اطراف، مطالعه شد.

۳-۲-۱- حداکثر نشست ($S_{v,max}$) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$)

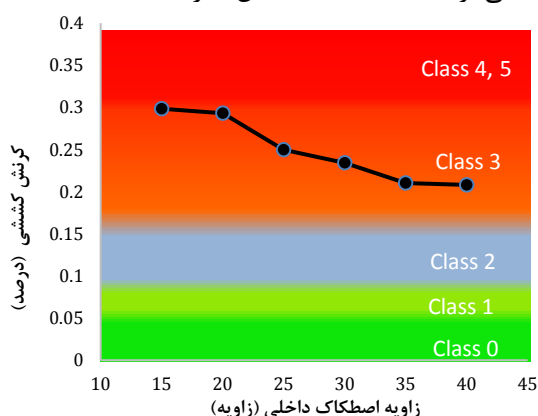
نمودار تغییرات حداکثر نشست و حداکثر نشست تفاضلی پی ساختمان به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. مشخص است در زاویه اصطکاک داخلی 15° ، نشست پی ساختمان ۴۶ میلی‌متر است که مطابق با گفته‌های بورلند [۶۳]، ساختمان دچار آسیب ساختاری رده ۳ و بیش‌تر می‌شود. افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۱۵ درجه تا ۴۰ درجه موجب کاهش نشست به ۳۷ میلی‌متر می‌شود که بازهم آسیب‌های ساختاری در ساختمان ایجاد خواهد کرد. درواقع با افزایش زاویه اصطکاک داخلی تغییر قابل‌توجهی در کاهش نشست ساختمان رخ نداده و شدت آسیب ساختمان در رده آسیب‌های شدید و ساختاری باقی می‌ماند.



شکل ۱۰: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر شیب ساختمان به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف

۳-۲-۳- حداکثر کرنش کششی (ϵ_{max})

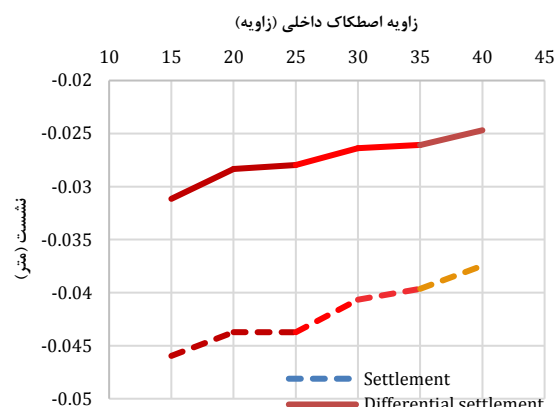
نمودار کرنش کششی به ازای زوایای اصطکاک داخلی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد در زاویه اصطکاک داخلی ۱۵ درجه کرنش کششی ۰/۳ درصد است که موجب آسیب رده ۳ تا ۴ در ساختمان می‌شود. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی تا ۴۰ درجه، کرنش کششی با شیب بسیار کم به ۰/۲ درصد کاهش یافته است که مطابق با گفته‌های ورث و بورلند [۵۲] و بوسکاردین و کوردینگ [۶۴] بازهم آسیب رده ۳ در ساختمان ایجاد خواهد کرد. بنابراین تغییر زاویه اصطکاک داخلی تأثیر اندکی بر حداکثر کرنش کششی دارد و تأثیر چندانی بر شدت آسیب ساختمان ندارد.



شکل ۱۱: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر کرنش کششی به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف

۳-۲-۴- حداکثر اعوجاج زاویه‌ای (β_{max})

نمودار اعوجاج زاویه‌ای به ازای زوایای اصطکاک داخلی در شکل ۱۲ نشان می‌دهد تغییر زاویه اصطکاک داخلی از ۱۵ تا ۴۰ درجه، موجب کاهش اعوجاج زاویه‌ای از ۰/۰۰۵ به



شکل ۹: نمودار حداکثر نشست (S_v, max) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_v, max$) زیر پی ساختمان به ازای زوایای اصطکاک داخلی

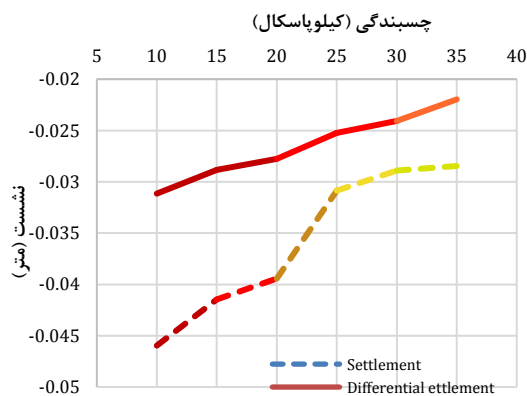
افزایش زاویه اصطکاک داخلی از 15° تا 40° موجب کاهش حداکثر نشست تفاضلی از ۳۱ میلی‌متر تا ۲۴ میلی‌متر می‌شود که در هر مقدار زاویه اصطکاک داخلی، آسیب‌های ساختاری در ساختمان ایجاد خواهد شد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی تغییر قابل توجهی در کاهش نشست تفاضلی و در نتیجه کاهش آسیب ساختمان دیده نمی‌شود.

۳-۲-۲- حداکثر شیب (θ_{max})

نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر شیب ساختمان به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف در شکل ۱۰ نشان می‌دهد افزایش زاویه اصطکاک داخلی از ۱۵ تا ۴۰ درجه سبب کاهش شیب از ۰/۰۱ تا ۰/۰۰۶۲ رادیان می‌شود. یعنی رده آسیب ساختمان از رده ۴ و ۵ به رده ۳ کاهش می‌یابد، اما بر اساس یافته‌های بورلند و همکاران [۶۳]، ترزاقی [۶۰]، اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] که شیب مجاز برای جلوگیری از آسیب ساختاری را ۰/۰۰۴ اعلام کردند، همچنان آسیب‌ها شدید خواهند بود. بنابراین افزایش ۱۷۰ درصدی زاویه اصطکاک داخلی، موجب کاهش ۴۰ درصدی شیب در پی ساختمان بوده و در نتیجه تأثیر اندکی بر کاهش آسیب ساختمان دارد.

با شیب کمتری اتفاق افتاده است. مایر [۵۴] نشست‌های کمتر از ۱۰ میلی‌متر در زیر ساختمان را قابل‌اغماض دانسته است. انجمن تونل‌مقادیر ۱۰ میلی‌متر در زیر ساختمان‌ها و ۲۰ میلی‌متر در زیر خیابان‌ها را حد مجاز نشست تعریف کرده است [۵۵] و آتوول [۵۶] نیز مقادیر نشست کمتر از ۱۰ میلی‌متر را قابل صرف‌نظر و مقادیر بیش از ۷۵ میلی‌متر را بحرانی معرفی کرد؛ بنابراین کاهش ۳۹ درصدی حداکثر نشست زیر پی ساختمان ناشی از افزایش چسبندگی خاک، نمی‌تواند شدت آسیب ساختمان را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد و آسیب‌های جدی و شدید در ساختمان به وجود می‌آید.

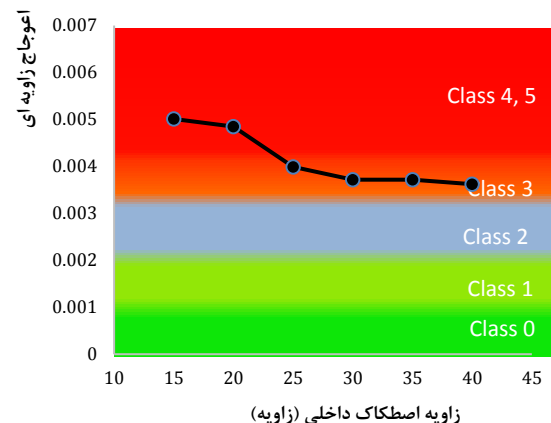
بررسی نشست‌های تفاضلی در شکل ۱۳ نیز نشان می‌دهد افزایش چسبندگی موجب کاهش حداکثر نشست تفاضلی زیر فنداسیون ساختمان از ۳۱ میلی‌متر تا ۲۲ میلی‌متر یعنی حدود ۲۹ درصد می‌شود. بنا بر گفته‌های ترزاقی [۶۰] معیار جلوگیری از آسیب به ساختمان را نشست تفاضلی کمتر از ۲۰ میلی‌متر می‌داند و همچنین یافته‌های رانکین [۶۱] نشست تفاضلی بیشتر از ۱۰ میلی‌متر موجب آسیب ساختاری و جدی به ساختمان می‌شود؛ بنابراین نتایج نشان می‌دهد آسیب وارده بر ساختمان کماکان بیش‌تر از ۲۰ میلی‌متر است که موجب آسیب ساختاری جدی به ساختمان می‌شود.



شکل ۱۳: نمودار حداکثر نشست ($S_{v,max}$) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$) زیر پی ساختمان به ازای چسبندگی (C)

بنابراین هرچند افزایش چسبندگی موجب کاهش نشست و نشست تفاضلی و در نتیجه آسیب کمتر ساختمان می‌شود، اما کاهش شدت آسیب ساختمان در اثر افزایش چسبندگی، تأثیر کمتری نسبت به تأثیر افزایش مدول الاستیسیته بر کاهش شدت آسیب ساختمان دارد.

۰/۰۳۶ و در نتیجه کاهش شدت آسیب ساختمان از رده ۴ به ۵ می‌شود. مطابق با یافته‌های اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] و جروم [۶۵] اعوجاج زاویه‌ای بالاتر از ۰/۰۳۳۳ موجب شروع آسیب‌های ساختاری ساختمان می‌شود. از این‌رو، هرچند افزایش زاویه اصطکاک داخلی موجب کاهش اندک شدت آسیب ساختمان شده است، ولی بازهم ساختمان آسیب‌های ساختاری را متحمل خواهد شد.



شکل ۱۴: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر اعوجاج زاویه‌ای به ازای زوایای اصطکاک داخلی مختلف

بررسی نتایج نشان می‌دهد تغییر زاویه اصطکاک داخلی تأثیر کمی بر پارامترهای تغییر شکل ساختمان دارد و آسیب‌های شدید ساختمان را به‌طور قابل‌توجهی کاهش نمی‌دهد. بنابراین پارامتر زاویه اصطکاک داخلی تأثیر اندکی بر شدت آسیب ساختمان دارد.

۳-۳- چسبندگی (C)

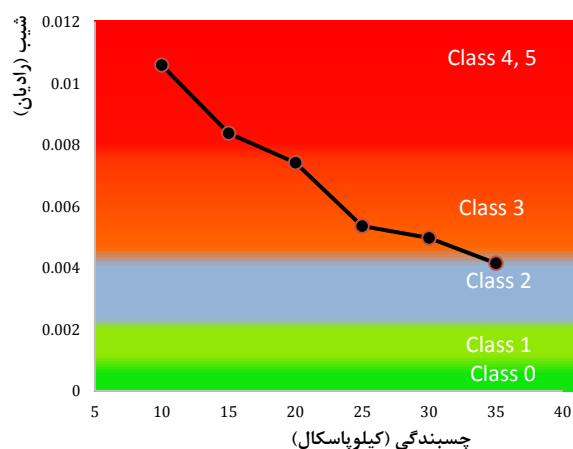
به‌منظور مطالعه تأثیر چسبندگی لایه‌های مختلف خاک بر شدت آسیب ساختمان ناشی از تونل‌سازی، مدل‌های عددی با اختصاص چسبندگی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ کیلوپاسکال به خاک محیط شبیه‌سازی شد.

۳-۳-۱- حداکثر نشست ($S_{v,max}$) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$)

نمودار تغییرات حداکثر نشست ($S_{v,max}$) و حداکثر نشست تفاضلی ($\delta S_{v,max}$) در شکل ۱۳ نشان می‌دهد با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ کیلوپاسکال تا ۳۵ کیلوپاسکال، حداکثر نشست زیر پی ساختمان از ۴۶ میلی‌متر تا ۲۸ میلی‌متر یعنی به‌اندازه ۳۹ درصد کاهش‌یافته است که این موضوع در چسبندگی‌های کمتر از ۲۵ کیلوپاسکال با شیب بیشتر و در چسبندگی‌های بالاتر از آن

۳-۳-۲- حداکثر شیب (θ_{max})

نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر شیب ساختمان به ازای چسبندگی (شکل ۱۴) نشان می‌دهد در چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال، حداکثر شیب زیر پی ساختمان ۰/۱۰۵ است. بررسی مطالعات محققین مختلف نشان می‌دهد ترزاقی [۶۰] و بورلند و همکاران [۶۳]، حداکثر شیب ۰/۰۰۴ را برای جلوگیری از آسیب به ساختمان توصیه کردند. اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] نیز حداکثر شیب بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۴ را پیشنهاد کردند. مایر و همکاران [۵۴] نیز پیشنهاد کردند حداکثر شیب (θ_{max}) کمتر از ۰/۰۰۲ باشد؛ بنابراین در چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال آسیب ساختمان ساختاری بوده و شدت آن در رده‌های ۴ و ۵ قرار می‌گیرد. افزایش چسبندگی تا ۳۵ کیلوپاسکال، کاهش تدریجی شیب را به دنبال دارد و تا ۰/۰۰۴ کاهش یافته که کاهش ۶۰ درصد را نشان می‌دهد؛ بنابراین حداکثر شیب زیر پی ساختمان تا مرز آسیب‌های ساختاری و غیرساختاری (مرز آسیب رده ۳ و رده ۲) کاهش می‌یابد، ولی همچنان ساختمان در معرض آسیب جدی قرار دارد.



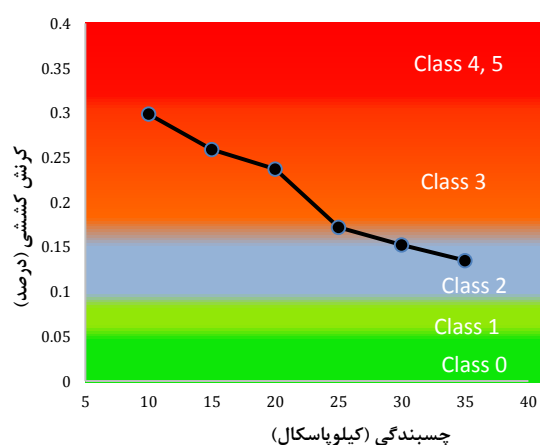
شکل ۱۴: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر شیب ساختمان به ازای چسبندگی

۳-۳-۳- حداکثر کرنش کششی (ϵ_{max})

نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر کرنش کششی به ازای چسبندگی در شکل ۱۵ نشان می‌دهد حداکثر کرنش کششی در چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال برابر با ۰/۳ درصد است. بنابراین بر اساس گفته‌های بوسکاردین و کوردینگ [۶۴] که کرنش کششی ۰/۱۵ تا ۰/۳ درصد را معیار ایجاد آسیب متوسط تا شدید (رده ۳ تا ۵) معرفی کردند، آسیب‌های ساختاری (شدت آسیب رده ۳ به بالا) در

ساختمان ایجاد می‌شود. افزایش چسبندگی تا ۲۵ کیلوپاسکال موجب کاهش حداکثر کرنش کششی تا میزان ۰/۱۷ درصد می‌شود که شدت آسیب ساختمان را تا مرز آسیب‌های ساختاری و غیرساختاری (مرز آسیب رده ۳ و رده ۲) کاهش می‌دهد. با افزایش چسبندگی از ۲۵ کیلوپاسکال تا ۳۵ کیلوپاسکال، کاهش حداکثر کرنش کششی ادامه یافته و تا ۰/۱۳ درصد کاهش می‌یابد که این سطح از کرنش کششی آسیب‌های جزئی در ساختمان ایجاد می‌کند. بنابراین افزایش چسبندگی در بازه ۱۰ کیلوپاسکال تا ۳۵ کیلوپاسکال، حداکثر کرنش کششی را تا ۵۴ درصد کاهش می‌دهد و شدت آسیب‌های وارد بر ساختمان را از آسیب‌های ساختاری (رده آسیب ۳ و ۴) به آسیب‌های غیرساختاری و جزئی (رده آسیب ۲) کاهش دهد.

توکار و پولشین [۶۲] پیشنهاد دادند حداکثر کرنش کششی که منجر به ایجاد ترک در ساختمان می‌شود، ۰/۰۵ درصد است که بسیار محافظه‌کارانه به نظر می‌رسد. ورث و بورلند [۵۲] کرنش کششی مجاز برای ساختمان‌های آجری را بین ۰/۱ و ۰/۰۵ درصد معرفی کردند که مطابقت نسبتاً مناسبی با نتایج این تحقیق دارد.



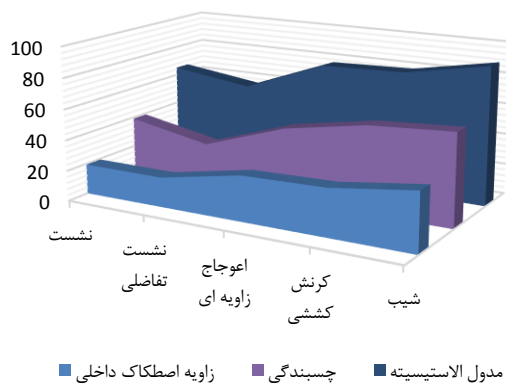
شکل ۱۵: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر کرنش کششی به ازای چسبندگی

۳-۳-۴- حداکثر اعوجاج زاویه‌ای (β_{max})

شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر اعوجاج زاویه‌ای به ازای چسبندگی در شکل ۱۶ ارائه شده است. در چسبندگی ۱۰ کیلوپاسکال حداکثر اعوجاج زاویه‌ای ایجاد شده در ساختمان ۰/۰۰۵ است که موجب ایجاد آسیب‌های ساختاری شدید (رده آسیب ۴ و ۵) در ساختمان می‌شود. با افزایش چسبندگی از ۱۵ کیلوپاسکال تا ۲۵

الاستیسیته، شدت آسیب وارد بر ساختمان از رده‌های آسیب ۴ و ۵ تا رده‌های آسیب ۰ و ۱ تغییر می‌کند. این موضوع را می‌توان ناشی از تأثیر قابل توجه مدول الاستیسیته بر انسجام و یکپارچگی خاک دانست. افزایش مدول الاستیسیته خاک موجب می‌شوند جابجایی و حرکات زمین در اثر تونل‌سازی کمتر به سطح زمین منتقل شده و شدت آسیب ساختمان کمتر شود.

پارامتر زاویه اصطکاک داخلی نیز کمترین تأثیر را بر تغییرات شدت آسیب ساختمان دارد؛ یعنی تغییرات افزایش یا کاهش زاویه اصطکاک داخلی هرچند موجب کاهش یا افزایش نشست سطح زمین می‌شود، ولی این تغییرات اندک بوده و تأثیر قابل توجهی بر شدت آسیب ساختمان ندارد.

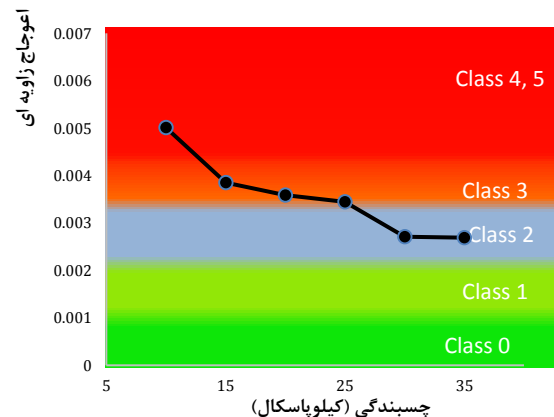


شکل ۱۷: مقایسه تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی بر شدت آسیب ساختمان ناشی از تونل‌سازی

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین چالش تونل‌سازی شهری وقوع نشست و آسیب وارد بر ساختمان‌های اطراف است. شدت آسیب ساختمان‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که خواص ژئوتکنیکی خاک یکی از آنها است. در این مطالعه تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی (مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) محدوده قطعه شرقی-غربی تونل خط ۷ مترو تهران بر پارامترهای تغییر شکل ساختمان و اثرات متعاقب آن بر شدت آسیب‌پذیری ساختمان‌های مجاور با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شد. نتایج ابزار دقیق مقطعی از مسیر تونل، برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی استفاده شد. شدت آسیب ساختمان‌ها به ازای پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس پارامترهای تغییر شکل شامل حداکثر نشست ($S_{v,max}$)، حداکثر نشست تفاضلی ($\delta_{Sv,max}$) حداکثر شیب

کیلوپاسکال مقدار حداکثر اعوجاج زاویه‌ای به تدریج و با شیب ملایمی کاهش داشته و از ۰/۰۰۳۸۵ به ۰/۰۰۳۴۴ رسیده است که کاهش ۱۰ درصدی داشته و شدت آسیب ساختمان از رده ۴ و ۵ به رده ۳ کاهش یافته است؛ اما همچنان این بازه مقادیر اعوجاج زاویه‌ای بیشتر از معیار $\frac{1}{300}$ است که توسط اسکمپتون و مک‌دونالد [۵۷] و جروم [۶۵] به عنوان مرز شروع آسیب‌های ساختاری در ساختمان پیشنهاد شده است و بنابراین آسیب‌های شدید در ساختمان ایجاد خواهد شد. در چسبندگی‌های بالاتر از ۲۵ کیلوپاسکال و تا ۳۵ کیلوپاسکال، حداکثر اعوجاج زاویه‌ای از ۰/۰۰۳۴۴ تا ۰/۰۰۲۶۹ کاهش یافته که این مقدار در گستره $\frac{1}{500}$ تا $\frac{1}{300}$ است که بر اساس گفته‌های جروم [۶۵]، نشان‌دهنده آغاز آسیب‌های جزئی و ترک‌خوردگی در جزئیات معماری ساختمان است. بنابراین افزایش چسبندگی موجب کاهش حداکثر اعوجاج زاویه‌ای در ساختمان خواهد شد به نحوی که شدت آسیب ساختمان را از رده‌های ۴ و ۵ (آسیب‌های ساختاری جدی و شدید) به رده ۲ کاهش می‌دهد و آسیب‌های ساختاری جدی در ساختمان ایجاد نخواهد شد، ولی ممکن است آسیب‌های جزئی و معماری را به دنبال داشته باشد.



شکل ۱۶: نمودار شدت آسیب ساختمان بر اساس حداکثر اعوجاج زاویه‌ای به ازای چسبندگی

شکل ۱۷ نمودار ترسیمی تأثیر هر یک از پارامترهای ژئوتکنیکی بر شدت آسیب وارد بر ساختمان در اثر تونل‌سازی را نشان می‌دهد. مساحت سطح مربوط به هر یک از پارامترها نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری آن پارامتر، بر تغییرات شدت آسیب ساختمان است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود شدت آسیب ساختمان حساسیت قابل توجهی به تغییرات مدول الاستیسیته دارد و با افزایش و کاهش مدول

شدت آسیب ساختمان را از آسیب‌های ساختاری (رده آسیب ۴) به آسیب‌های غیرساختاری (رده آسیب ۲) کاهش داده است.

زاویه اصطکاک داخلی در بازه ۱۵ تا ۴۰ درجه تغییر داشته، هرچند افزایش زاویه اصطکاک داخلی موجب شده نشست از ۴۶ میلی‌متر به ۳۷ میلی‌متر و نشست تفاضلی از ۳۱ میلی‌متر تا ۲۴ میلی‌متر کاهش یابد، این مقادیر نشست موجب ایجاد آسیب‌های ساختاری در ساختمان شده و کاهش قابل‌توجهی در شدت آسیب ساختمان را نشان نمی‌دهند. این افزایش چسبندگی موجب کاهش ۳۸ درصدی در حداکثر شیب ساختمان شده که آسیب ساختمان را از وضعیت آسیب شدید (رده ۴) به وضعیت آسیب متوسط (رده ۳) کاهش داده است. حداکثر کرنش کششی در زاویه اصطکاک داخلی ۱۵ درجه ۰/۳ درصد است که نشان‌دهنده آسیب متوسط (آسیب رده ۳) در ساختمان است. هرچند با افزایش زاویه اصطکاک داخلی تا ۴۰ درجه، موجب کاهش ۳۰ درصدی حداکثر کرنش کششی شده است اما همچنان آسیب ساختمان متوسط (آسیب رده ۳) است، یعنی تأثیر چندانی در کاهش آسیب ساختمان نداشته است. کاهش ۲۸ درصدی حداکثر اعوجاج زاویه‌ای در نتیجه افزایش زاویه اصطکاک داخلی در بازه بیان‌شده نیز موجب می‌شود آسیب‌های نسبتاً شدید ساختمان تا آسیب‌های متوسط کاهش یابد ولی همچنان ساختمان در معرض آسیب‌های ساختاری و خطرناک است.

نهایتاً اینکه شدت آسیب‌های ساختمان به میزان قابل‌توجهی نسبت به تغییرات مدول الاستیسیته حساس بوده و تغییرات اندک در مدول الاستیسیته خاک منجر به تغییر شدت آسیب ساختمان از آسیب‌های ساختاری و شدید (آسیب رده ۴ و ۵) تا آسیب‌های جزئی و قابل صرف‌نظر کردن می‌شود. در طراحی و اجرای تونل‌های شهری، باید به‌طور دقیق به مدول الاستیسیته، توجه شود هنگام حفاری در خاک‌های با مدول الاستیسیته پایین، پایش جابجایی‌های خاک در حین و پس از احداث تونل، برای ارزیابی دقیق و به‌موقع خطرات احتمالی و انجام تمهیدات لازم ضروری است. این حساسیت نسبت به زاویه اصطکاک داخلی در کمترین حد خود بوده و تغییرات زاویه اصطکاک داخلی تأثیر چندانی بر جابجایی‌های زمین و در نتیجه شدت آسیب وارد بر ساختمان‌ها نداشته است. تأثیر افزایش چسبندگی در کاهش

ساختمان (θ_{max})، حداکثر کرنش کششی (ϵ_{max}) و حداکثر اعوجاج زاویه‌ای (β_{max})، نتایج نشان می‌دهد:

با افزایش مدول الاستیسیته لایه‌های خاک، نشست و نشست تفاضلی زیر پی ساختمان و در نتیجه شدت آسیب به ساختمان کاهش می‌یابد. حداکثر نشست در مدول الاستیسیته ۵۰ مگاپاسکال حدود ۴۶ میلی‌متر است که نشان‌دهنده آسیب‌های ساختاری شدید (آسیب رده ۴ و ۵) در ساختمان است. با افزایش مدول الاستیسیته تا ۱۰۰ مگاپاسکال، نشست تا ۱۶ میلی‌متر کاهش می‌یابد که این مقدار نشست آسیب‌های جزئی در ساختمان را به دنبال دارد. حداکثر شیب ساختمان نیز با افزایش مدول الاستیسیته، از ۰/۰۱ به ۰/۰۱۹ رادیان کاهش دارد که از آسیب ساختمان را از آسیب‌های ساختاری شدید (رده آسیب ۴ و ۵) به آسیب‌های ناچیز و جزئی (رده‌های آسیب ۰ و ۱) کاهش می‌دهد. افزایش مدول الاستیسیته نیز موجب کاهش حداکثر کرنش کششی از ۰/۳ درصد به ۰/۰۶۴ شده است؛ یعنی رده آسیب نسبتاً شدید در ساختمان (آسیب رده ۳) را تا آسیب‌های ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن (رده‌های آسیب ۱ و ۲) کاهش داده است. این موضوع در مورد حداکثر اعوجاج زاویه‌ای نیز صدق می‌کند و افزایش مدول الاستیسیته، اعوجاج زاویه‌ای را از ۰/۰۰۸ به ۰/۰۰۲ کاهش داده که نشان می‌دهد آسیب نسبتاً شدید ساختمان (آسیب رده ۴) تا آسیب‌های کم و آسیب جزئیات معماری (رده‌های آسیب ۰ و ۱) کاهش داده است.

با افزایش چسبندگی از ۲۰ کیلوپاسکال تا ۱۰۰ کیلوپاسکال، نشست زیر پی ساختمان از ۴۱ میلی‌متر به ۱۱ میلی‌متر کاهش یافته که کاهش اندک آسیب را نشان می‌دهد اما آسیب واردشده بر ساختمان در رده آسیب‌های ساختاری است. افزایش چسبندگی در بازه بیان‌شده، موجب کاهش ۶۰ درصدی شیب ساختمان شده که رده آسیب را از آسیب‌های شدید (رده‌های آسیب ۴ و ۵) به آسیب متوسط (رده آسیب ۳) کاهش داده است ولی همچنان ساختمان در معرض آسیب‌های جدی قرار دارد. کاهش ۵۴ درصد حداکثر کرنش کششی نیز شدت آسیب‌های وارد بر ساختمان را از آسیب ساختاری (رده آسیب ۳ و ۴) به آسیب غیرساختاری و جزئی (رده آسیب ۲) کاهش داده است. حداکثر اعوجاج زاویه‌ای رفتاری شبیه به حداکثر کرنش کششی از خود نشان داده است که با افزایش چسبندگی در بازه بیان‌شده، کاهش ۴۷ درصدی در حداکثر اعوجاج زاویه‌ای را در پی داشته است که

due to settlement trough adjustment. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(1), 97–100.

[12] Lu, D. C., Lin, Q. T., Tian, Y., Du, X. L., & Gong, Q. M. (2020b). Formula for predicting ground settlement induced by tunnelling based on Gaussian function. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103443.

[13] Boldini, D., Losacco, N., Bertolin, S., & Amorosi, A. (2018). Finite element modelling of tunnelling-induced displacements on framed structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 222–231.

[14] Lu, D. C., Li, X. Q., Du, X. L., Lin, Q. T., & Gong, Q. M. (2020a). Numerical simulation and analysis on the mechanical responses of the urban existing subway tunnel during the rising groundwater. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103297.

[15] Ahmed, M., & Iskander, M. (2011). Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models. *Journal*

[16] Franza, A., & Marshall, A. M. (2019). Empirical and semi-analytical methods for evaluating tunnelling-induced ground movements in sands. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 47–62.

[17] Soomro, M. A., Mangi, N., Xiong, H., Kumar, M., & Mangnejo, D. A. (2020). Centrifuge and numerical modelling of stress transfer mechanisms and settlement of pile group due to twin stacked tunnelling with different construction sequences. *Computers and Geotechnics*, 121, 103449.

[18] Standing, J. R., & Selemetas, D. (2013). Greenfield ground response to EPBM tunnelling in London Clay. *Geotechnique*, 63(12), 989–1007.

[19] Cao, L. Q., Zhang, D. L., Fang, Q., & Yu, L. (2020b). Movements of ground and existing structures induced by slurry pressure-balance tunnel boring machine (SPB TBM) tunnelling in clay. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103278.

[20] Sagaseta, C. (1987). Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. *Geotechnique*, 37(3), 301–320.

[21] Verruijt, A. (1997). A complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half-plane. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 21(2), 77–89.

[22] Bobet, A. (2001). Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(12), 1258–1266.

[23] Yang, J. S., Liu, B. C., & Wang, M. C. (2004). Modeling of tunneling induced ground surface

شدت آسیب ساختمان‌ها بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی و کمتر از مدول الاستیسیته است.

مراجع

[1] Li, P. F., Wang, F., Zhang, C. P., & Li, Z. (2019). Face stability analysis of a shallow tunnel in the saturated and multilayered soils in short-term condition. *Computers and Geotechnics*, 107, 25–35.

[2] Cao, L. Q., Zhang, D. L., & Fang, Q. (2020a). Semi-analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in multi-layered clayey soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 102, 103446.

[3] Chu, Z. F., Wu, Z. J., Liu, Q. S., Weng, L., Xu, X. Y., Wu, K., & Sun, Z. Y. (2024). Viscous-elastic-plastic solution for deep buried tunnels considering tunnel face effect and sequential installation of double linings. *Computers and Geotechnics*, 165, 105930.

[4] Wan, M. S. P., Standing, J. R., Potts, D. M., & Burland, J. B. (2017). Measured short-term subsurface ground displacements from EPBM tunnelling in London Clay. *Geotechnique*, 67(9), 748–779.

[5] Li, W., & Zhang, C. P. (2020). Face stability analysis for a shield tunnel in anisotropic sands. *International Journal of Geomechanics*, 20(5), 04020043.

[6] Mollon, G., Dias, D., Soubra, A.H., 2009. Probabilistic analysis of circular tunnels in homogeneous soil using response surface methodology. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 135 (9), 1314–1325.

[7] Zhang, Z. G., Huang, M. S., & Zhang, M. X. (2011). Theoretical prediction of ground movements induced by tunnelling in multilayered soils. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(2), 345–355.

[8] Zymnis, D. M., Chatzigiannelis, I., & Whittle, A. J. (2013). Effect of anisotropy in ground movements caused by tunnelling. *Geotechnique*, 63(13), 1083–1102.

[9] Eric Leca (2007). Settlements induced by tunneling in Soft Ground"; *Tunneling and Underground Space Technology* 22.

[10] Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. In *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, pp. 225–290.

[11] Celestino, T. B., Gomes, R. A., & Bortolucci, A. A. (2000). Errors in ground distortions

tunnel and underground excavation-induced ground movements. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103222.

[35] Mei, Y., & Song, Q. (2021). Analytical solution for settlement of homogeneous structure where the tunnel passes underneath and its application. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(9), 3556-3567.

[36] Kitiyodom, P., Matsumoto, T., & Kawaguchi, K. (2005). A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunnelling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(15), 1485-1507.

[37] Huang, M., & Mu, L. (2012). Vertical response of pile raft foundations subjected to tunneling-induced ground movements in layered soil. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(8), 977-1001.

[38] Giardina, G., Van de Graaf, A. V., Hendriks, M. A., Rots, J. G., & Marini, A. (2013). Numerical analysis of a masonry façade subject to tunnelling-induced settlements. *Engineering structures*, 54, 234-247.

[39] Haji, T. K., Marshall, A. M., & Franza, A. (2018). Mixed empirical-numerical method for investigating tunnelling effects on structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 92-104.

[40] Dias, T. G., & Bezuijen, A. (2018). Pile tunnel interaction: Pile settlement vs Ground settlements. In *WTC 2018*. mci.

[41] Qi, J., Zhang, G., Jiao, Y., Shen, L., Zheng, F., Zou, J., & Zhang, P. (2023). Semi-Analytical Prediction of Ground Surface Heave Induced by Shield Tunneling Considering Three-Dimensional Space Effect. *Applied Sciences*, 13(20), 11588.

[42] Ninić, J., Gamra, A., & Ghiassi, B. (2024). Real-time assessment of tunnelling-induced damage to structures within the building information modelling framework. *Underground Space*, 14, 99-117.

[43] Fu, J., Yu, Z., Wang, S., & Yang, J. (2018). Numerical analysis of framed building response to tunnelling induced ground movements. *Engineering Structures*, 158, 43-66.

[44] Xu, J., Franza, A., Marshall, A. M., Losacco, N., & Boldini, D. (2021). Tunnel-framed building interaction: Comparison between raft and separate footing foundations. *Géotechnique*, 71(7), 631-644.

[45] Pascariello, M.N., et al., Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunnelling. *Tunnelling and*

movements using stochastic medium theory. Tunnelling and Underground Space Technology, 19(2), 113-123.

[24] Pinto, F., & Whittle, A. J. (2014). Ground movements due to shallow tunnels in soft ground. I: Analytical solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4), 04013040.

[25] Kong, F. C., Lu, D. C., Du, X. L., & Shen, C. P. (2019). Elastic analytical solution of shallow tunnel owing to twin tunnelling based on a unified displacement function. *Applied Mathematical Modelling*, 68, 422-442.

[26] Zhang, Z. G., Huang, M. S., Zhang, C. P., Jiang, K. M., & Bai, Q. M. (2020). Analytical prediction of tunneling-induced ground movements and liner deformation in saturated soils considering influences of shield air pressure. *Applied Mathematical Modelling*, 78, 749-772.

[27] Franza, A., & DeJong, M. J. (2019). Elastoplastic solutions to predict tunneling-induced load redistribution and deformation of surface structures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(4), 04019007.

[28] Milillo, P., Giardina, G., DeJong, M. J., Perissin, D., & Milillo, G. (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment: The London crossrail case study. *Remote Sensing*, 10(2), 287.

[29] Klar, A., & Marshall, A. M. (2015). Linear elastic tunnel pipeline interaction: the existence and consequence of volume loss equality. *Géotechnique*, 65(9), 788-792.

[30] Elioab, E. K., Vua, H. U. N. G., Yvesa, B. O. H. A. L., Rasoola, M. E. H. D. I. Z. A. D. E. H., Michelb, K. H. O. U. R. I., Oliviera, D. E. C. K., & Pierreb, R. A. H. M. E. (2019). Influence of equivalent stiffness on the behavior of buildings subjected to soil settlements. *Interface*, 31(1000), 0-3.

[31] Yiu, W. N., Burd, H. J., & Martin, C. M. (2017). Finite-element modelling for the assessment of tunnel-induced damage to a masonry building. *Géotechnique*, 67(9), 780-794.

[32] Moosazadeh, S., Namazi, E., Aghababaei, H., Marto, A., Mohamad, H., & Hajihassani, M. (2019). Prediction of building damage induced by tunnelling through an optimized artificial neural network. *Engineering with Computers*, 35, 579-591.

[33] Franza, A., Ritter, S., & Dejong, M. J. (2020). Continuum solutions for tunnel-building interaction and a modified framework for deformation prediction. *Géotechnique*, 70(2), 108-122.

[34] Son, M., & Cording, E. J. (2020). Estimation of building damage in a 3D distorting structure to

- Paper presented at the Geotechnical aspects of underground construction in soft ground.
- [55] Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES), settlement induced by tunnelling
- [56] Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures.
- [57] Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727-768.
- [58] Grant, R., Christian, J. T., & Vanmarcke, E. H. (1974). Differential settlement of buildings. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(9), 973-991.
- [59] Kastner, R., Standing, J., & Kjekstad, O. (2003). Avoiding damage caused by soil-structure interaction: Lessons learnt from case histories: Thomas Telford.
- [60] Terzaghi, C., Settlement of structures in Europe and methods of observation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1938. 103(1): p. 1432-1448.
- [61] Rankin, W. J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 5(1), 79-92.
- [62] Polshin, D. E., & Tokar, R. A. (1957, August). Maximum allowable non-uniform settlement of structures. In *Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 1, pp. 402-405)*. London: Butterworth's.
- [63] Burland, J. B., Broms, B. B., & De Mello, V. F. (1978). Behaviour of foundations and structures.
- [64] Boscardin, M.D. and E.J. Cording, Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989. 115(1): p. 1-21.
- [65] Bjerrum, L., & Lo, K. Y. (1963). Effect of again of the shear-strength properties of a normally consolidated clay. *Geotechnique*, 13(2), 147-157.
- Underground Space Technology, 2023. 131: p. 104845.
- [46] Chen, J., Tian, C., Luo, Y., Li, Y., Liu, W., Chen, H., & Zhu, H. (2024). Deformation behavior and damage characteristics of surface buildings induced by undercrossing of shallow large-section loess tunnels. *Engineering Failure Analysis*, 162, 108422.
- [47] Rieben, H. (1955) The Geology of the Tehran Plain. *American Journal of Science*, 253, 617-639. <https://doi.org/10.2475/ajs.253.11.617>
- [48] SAHEL consulting corporation (2009), Geotechnical supplementary studies report, line 7 of Tehran subway (In Persian)
- [49] Idris, J., Verdel, T., & Al-Heib, M. (2008). Numerical modelling and mechanical behaviour analysis of ancient tunnel masonry structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(3), 251-263.
- [50] Shahin, H. M., Nakai, T., Ishii, K., Iwata, T., & Kuroi, S. (2016). Investigation of influence of tunneling on existing building and tunnel: model tests and numerical simulations. *Acta Geotechnica*, 11, 679-692.
- [51] Boldini, D., Losacco, N., Franza, A., DeJong, M. J., Xu, J., & Marshall, A. M. (2021). Tunneling-induced deformation of bare frame structures on sand: Numerical study of building deformations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(11), 04021116.
- [52] Wroth, C., & Burland, J. (1974). Settlement of buildings and associated damage. In *SOA Review, Conf. Settlement of Structures*. Cambridge, UK: Pentech Press.
- [53] Hudson J.A., (1992). *Comprehensive rock engineering*, p.543-562, Japan, Railway Construction Public, (1996). *Evaluation of Mechanical Stability of Underground Exavation*.
- [54] Mair, R., Taylor, R., & Burland, J. (1996). Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling.