

تخمین پاسخ ساختمان قاب‌بندی شده به نشست‌های القایی در اثر حفاری تونل‌های کم‌عمق

مهرداد امامی تبریزی^{۱*}؛ امیر نیم تاج^۲؛ حسین عمرانی خیابانیان^۳

۱- عضو هیأت‌علمی؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی سهند

۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، مرکز تحقیقات زلزله، دانشگاه صنعتی سهند

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۲۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.5029.1290

واژگان کلیدی	چکیده
تونل کم‌عمق	حفاری تونل در محیط‌های خاکی اغلب منجر به نشست در سطح زمین می‌شود که در محیط‌های شهری
سختی سازه	سازه‌های موجود از این نشست‌ها متأثر می‌گردند. استفاده از رویکرد سختی نسبی از جمله روش‌های برآورد
سختی نسبی	خرابی‌های محتمل سازه‌ها در اثر نشست‌های مذکور است. سختی نسبی بر اساس مقادیر سختی سازه،
ضریب تعدیل	سختی زمین و برخی خصوصیات هندسی حاکم محاسبه می‌گردد. اهمیت برآورد دقیق سختی سازه موجود
نشست زمین	سبب شده که روش‌های متعددی برای این منظور ارائه گردد؛ بنابراین روش‌های مختلف برآورد سختی سازه
	مورد ارزیابی قرار گرفته و دقیق‌ترین روش به کمک تحلیل‌های عددی، تعیین شده‌است. مقادیر سختی نسبی بر اساس سختی محاسبه‌شده
	جدید سازه، محاسبه شده‌اند. همچنین رابطه‌ای بین سختی نسبی محاسبه‌شده پیشین و سختی نسبی پیشنهادی ارائه گردیده است. مقایسه
	مقادیر ضریب تعدیل به دست‌آمده از این پژوهش با مقادیر مشابه پیشین نشان‌دهنده آن است که در مطالعات پیشین ضرایب تعدیل دست-
	پایینی در نظر گرفته شده‌است. این موضوع منجر به برآوردی خوش‌بینانه از خرابی محتمل القاشده به سازه می‌گردد؛ بنابراین در این پژوهش
	ضرایب تعدیل بهبودیافته، دارای انطباق بیشتر با نتایج تحلیل‌های عددی، پیشنهاد شده‌اند. بر این اساس رابطه‌ای جهت محاسبه ضریب تعدیل
	پیشنهادی بر اساس سختی نسبی ارائه شده‌است. روش پیشنهادی این پژوهش، تخمین دقیق‌تری از تأثیر حفاری تونل بر سازه‌های مجاور ارائه
	می‌نماید که ضمن حفظ سادگی در محاسبات، در راستای ایمنی بیشتر گام برداشته است.

۱- مقدمه

تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که مقطع عرضی این نشست‌ها از یک منحنی گاوسی تبعیت می‌کند (Abdoli Fazel, et al., 2015), (Emami Tabrizi & Faraji, 2018). این نشست در محدوده‌های شهری، می‌تواند موجب تخریب سازه‌های مجاور و زیرساخت‌های موجود گردد. در بسیاری از موارد، برآورد رفتار سازه‌های مجاور تونل‌های کم‌عمق، اغلب به کمک مدل‌سازی سازه به صورت یک تیر الاستیک صورت می‌پذیرد. این تیر معادل، با خصوصیات مکانیکی مشابه سازه موردنظر مدل می‌شود. سپس منحنی نشست زمین زیر تیر مذکور اعمال شده و پاسخ تیر ارزیابی

نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های کم‌عمق در محیط‌های نرم تقریباً اجتناب‌ناپذیر است. تخمین خرابی سازه‌های مجاور حفاری‌ها در ۳ گام کلی صورت می‌پذیرد: ۱- برآورد تغییر مکان زمین در شرایط زمین آزاد؛ ۲- اعمال تغییر مکان محاسبه‌شده در گام قبل به سازه که به صورت تیر الاستیک معادل‌سازی شده است؛ ۳- در صورت مشخص شدن شرایط بحرانی با توجه به تخمین صورت گرفته در گام پیشین، تحلیل دقیق مسئله با جزئیات.

* نویسنده مسئول؛ تبریز؛ دانشگاه صنعتی سهند؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران؛ کد پستی: ۵۳۳۱۸۱۷۶۳۴؛ صندوق پستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ شماره‌ی تلفن: ۰۴۱-۳۳۴۴۳۴۴۴؛ دورنگار: ۰۴۱-۳۳۴۴۳۴۳۴؛ رایانامه: m.emami@sut.ac.ir

استفاده از روش تیر معادل، توسط میرحبیبی و سروش نیز مورد تأیید قرار گرفته است (Mirhabibi & Soroush, 2012).

موضوع حائز اهمیت در استفاده از روش تیر معادل، محاسبه دقیق سختی سازه است. فرانزیوس سختی سازه را به روش محورهای موازی محاسبه نموده است (Franzius, 2003). پس از وی، میرحبیبی و سروش سختی سازه را حاصل از مجموع سختی دال‌های سازه در نظر گرفته‌اند (Mirhabibi & Soroush, 2012). گو و مایر علاوه بر سختی خمشی دال‌ها، با در نظر گرفتن تأثیر سختی خمشی ستون‌ها و تیرهای یک قاب دارای اتصالات گیردار، سختی خمشی یک سازه مجاور حفاری تونل را ارائه نموده‌اند (Goh & Mair, 2014). ایشان سازه را با روش تیر معادل و همین‌طور به صورت یک سازه کامل، مدل و سپس تحلیل عددی نموده‌اند. ایشان بر این باورند که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل‌ها، روش مورد استفاده برای محاسبه سختی سازه که توسط ایشان به کار رفته است، از دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌های موجود در این زمینه برخوردار است.

در این مقاله، روشی جهت برآورد تغییر مکان یک سازه، در مجاورت تونل ارائه شده است. روش پیشنهادی این تحقیق، در گام دوم از مراحل سه‌گانه تخمین خرابی سازه‌های مجاور حفاری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور محققین پیشین از جمله فرانزیوس منحنی‌های تغییرات ضریب تعدیل (*Modification Factor*) نسبت به سختی نسبی را ارائه نموده‌اند (Franzius, 2003). چنان‌که گفته شد وی در تحقیقات خود از فرضیات ساده‌کننده‌ای بهره برده است که از آن جمله می‌توان به ساده‌سازی روش محاسبه سختی سازه‌های موجود بر روی سطح زمین اشاره نمود. وی برای این کار از روش محورهای موازی استفاده نموده است. او اذعان دارد که این فرض علیرغم ساده‌سازی روند حل مسئله، موجب بروز تقریب‌های قابل‌توجهی در جواب‌های حاصل می‌شوند. از همین رو در این پژوهش، تلاش شده است که سختی سازه به روشی دقیق‌تر محاسبه شده و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، سختی اجزای مختلف سازه نظیر دال‌ها و ستون‌ها در محاسبات دخالت داده می‌شوند. شایان ذکر است که در تراز

می‌گردد (Franzius, 2003). مزیت استفاده از روش تیر معادل در محاسبات، سادگی و سرعت نسبی محاسبات در مقایسه با روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی دقیق است (Netzel, 2009). تیلور و بورلند با استفاده از همین روش، احتمال بروز آسیب در یکی از خطوط در حال توسعه مترو لندن را پیش‌بینی نموده‌اند. مزیت کار ایشان عدم استفاده از تحلیل‌های عددی بوده است. در حقیقت ایشان، تنها از روابط تحلیلی و جداول ارائه‌شده پیش از خود استفاده نموده‌اند (Taylor & Burland, 1996). فارل و همکاران با انجام آزمایش‌های سانتریفوژ مشاهده نمودند که ساختمان‌های موجود، در قسمت فرورفتگی بیش‌تر در معرض آسیب‌های ناشی از حفاری می‌باشند (Farrell, et al., 2014).

از سوی دیگر، پت و ادینبوروک با استفاده از روش المان محدود به مطالعه عددی تأثیر سختی سازه بر روی تغییر مکان ناشی از حفاری بر روی سطح زمین پرداخته‌اند (Potts & Addenbrooke, 1997). ایشان سختی سازه را به کمک روش محورهای موازی محاسبه و در مدل‌های خود وارد نموده‌اند. همچنین پارامترهایی نظیر عرض ساختمان، سختی خمشی، سختی زمین و عمق تونل را نیز در نظر گرفتند. ایشان تلاش نموده‌اند که تأثیر پارامترهای مذکور را بر پاسخ سازه به نشست القاشده، ارزیابی نمایند. ایشان دریافتند که با افزایش سختی نسبی، تغییر شکل مشاهده‌شده در سازه کاهش می‌یابد. فرانزیوس و همکاران با استفاده از مدل‌سازی عددی، به مطالعه پارامتریک عوامل دخیل در نشست زمین پرداخته و بر اساس مشاهدات خود تعریف جدیدی برای سختی نسبی ارائه نموده‌اند که علاوه بر سختی سازه، مدول الاستیسیته خاک و عرض ساختمان که توسط پت و ادینبوروک در نظر گرفته شده بود، طول ساختمان و عمق تونل را نیز شامل می‌شود (Franzius, et al., 2004) و (Potts & Addenbrooke, 1997). ملکی و همکاران ساختمان مجاور تونل را با دو رویکرد تیر معادل و مدل‌سازی به صورت یک قاب سه‌بعدی به صورت عددی شبیه‌سازی و عنوان نمودند که جهت اهداف عملی می‌توان از روش تیر معادل به عنوان روشی ساده جهت مدل‌سازی خصوصیات سازه و تأثیر آن بر نشست سطح زمین بهره جست (Maleki, et al., 2011). دقت نتایج حاصل از

از این رو در این پژوهش همین موضوع مورد توجه قرار گرفته است. بررسی رفتار سازه‌های دارای مهاربندی و دیوار برشی و همچنین مواردی نظیر ترک‌خوردگی سازه‌ها مستلزم تحقیقات بیشتر است.

۲- سختی نسبی

سختی نسبی (*Relative Stiffness*) اولین بار توسط پتس و ادنبروک (۱۹۹۷) معرفی شده است. ایشان با انجام آنالیز اجزای محدود خصوصیات مختلف سازه را بر نشست سطح زمین مورد ارزیابی قرار داده‌اند. سپس با شناسایی عوامل مؤثر در این زمینه سختی نسبی خمشی را تعریف نموده‌اند (*Potts & Addenbrooke, 1997*):

$$\rho = \frac{K_{st}}{E_s(B/2)^4} \quad (1)$$

در رابطه فوق، ρ سختی نسبی، K_{st} سختی خمشی سازه، E_s مدول الاستیسیته خاک در نیمه عمق تونل و B عرض سازه می‌باشند. فرانزیوس علاوه بر پارامترهای یاد شده، طول سازه و عمق تونل را نیز در تحلیل‌های خود مورد ارزیابی قرار داد. بر این اساس، وی رابطه زیر را به عنوان سختی نسبی معرفی نمود (*Franzius, 2003*):

$$\rho^* = \frac{K_{st}}{E_s Z_0 B^2 L_0} \quad (2)$$

که در این رابطه، ρ^* سختی نسبی پیشنهادی محقق اخیر، Z_0 عمق تونل و L_0 طول سازه می‌باشند. در تحلیل‌های دوبعدی، طول سازه (L_0) برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. وی معتقد است که رابطه فوق از دقت بهتری در ارائه نتایج برخوردار است.

۳- نسبت تغییر شکل و ضرایب تعدیل

همانطوریکه در شکل ۱ نمایش داده شده است، برای محاسبه نسبت تغییر شکل (*Deflection Ratio*) که از این پس به اختصار به صورت *DR* نشان داده می‌شود، لازم است که دو نقطه ابتدا و انتهای هر یک از دو محدوده فرورفتگی و یا برآمدگی به یکدیگر متصل شوند. بیشینه اختلاف میان منحنی تغییر شکل زمین و خط مذکور (Δ) تعیین می‌گردد. نسبت تغییر شکل به صورت حاصل تقسیم مقدار (Δ) به طول محدوده مورد بررسی (L) تعریف شده است.

هر طبقه سختی خمشی ناشی از سختی خمشی دال کف و تیرهای موجود در آن طبقه است. با توجه به این که سختی خمشی دال در هر طبقه به مراتب بیش از سختی تیرها است، لذا از سختی خمشی تیرها در مقایسه با دال چشم-پوشی شده است. چنین فرضی توسط محققان پیشین نیز به کار گرفته شده است (*Potts & addenbrooke, 1997*)، (*Franzius, 2003*) و (*Goh & Mair, 2014*).

دیگر مزیت روش یاد شده در آن است که سختی هر یک از این اجزا را بسته به موقعیت قرارگیری آن‌ها در محدوده فرورفتگی (*Sagging*) یا برآمدگی (*Hogging*) لحاظ می‌نماید. رابطه‌ای برای محاسبه سختی نسبی مورد نظر بر حسب سختی نسبی حاصل از روش محورهای موازی ارائه شده است. همین‌طور رابطه‌ای به منظور محاسبه ضریب تعدیل در محدوده فرورفتگی بر حسب سختی نسبی سازه بیان گردیده است. به بیان دیگر، با استفاده از روابط موازی، می‌توان به پاسخ سازه با در نظر گرفته شدن اثر اجزا سازه‌ای مختلف آن، در محدوده فرورفتگی، دست یافت.

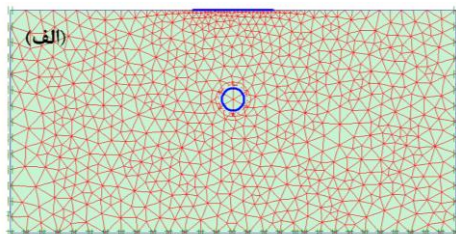
روش پیشنهادی این پژوهش، برای تخمین اولیه خرابی‌های محتمل سازه‌های تحت تأثیر نشست‌های القایی مورد استفاده قرار می‌گیرد (*Burland & Wroth, 1974*) و (*Boscardin & Cording, 1989*). با توجه به هدف چنین روش‌هایی استفاده از آن‌ها برای برآورد خرابی سازه‌های پیچیده و خاص مناسب نیست (*Netzel, 2009*). چنین رویکردی در تحقیقات پژوهشگران پیشین نیز به کار گرفته شده است (*Mair, et al., 1996*)، (*Farrell, et al., 2014*)، (*Potts & addenbrooke, 1997*)، (*Franzius, et al., 2006*) و (*Goh & Mair, 2014*). در این راستا، سازه در نظر گرفته شده در این پژوهش دارای قاب‌های ساده و منظم در هر دو جهت است.

استفاده از تیر معادل به جای سازه، در سازه‌های بنایی که دیوارها نقش تعیین‌کننده در رفتار سازه دارند، مناسب است لیکن استفاده از تیر معادل با اعمال اصلاحاتی برای سازه‌های قاب‌بندی شده با سیستم قاب خمشی نیز تطبیق داده شده است (*Goh & Mair, 2014*). از سوی دیگر علیرغم اصلاح سختی تیر معادل توسط محققین اخیر، موضوع اندرکنش خاک-سازه مورد توجه ایشان نبوده است

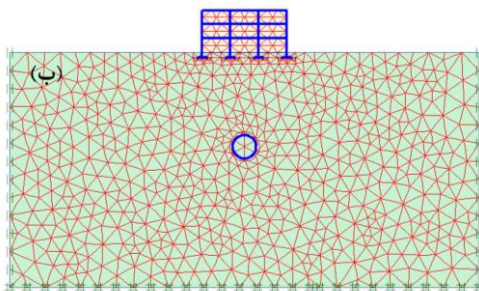
است. تونل حفاری شده دارای شعاع 3.4 m و در عمق 20 m از سطح زمین قرار گرفته است. برای مدل‌سازی سازه سطحی، قاب میانی یک ساختمان در مدل در نظر گرفته شده است. دال‌ها دارای ضخامت 15 cm و ستون‌ها با عرض 50 cm و فاصله محور میانی ستون‌ها از یکدیگر برابر 6 m است. مصالح در نظر گرفته شده برای سازه دارای مدول الاستیسیته GPa ۲۳ و نسبت پواسون 0.15 است. ساختمان موردنظر به صورت تیر معادل مدل‌سازی شده است. سازه سطحی با عرض‌های مختلف 1.2 ، 2.4 ، 3.6 ، 4.8 و 6.0 متر و فواصل مختلف از محور تونل (e/B) برابر با 0.0 ، 0.2 ، 0.4 و 0.6 و همین‌طور با تعداد طبقات 1 ، 3 ، 5 و 10 طبقه در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده را نشان می‌دهد.

۵- صحت سنجی مدل‌سازی عددی

دقت مدل‌سازی عددی صورت گرفته، از مقایسه نتایج به-دست‌آمده از مدل‌های ساخته شده این پژوهش، توسط نرم‌افزار $PLAXIS^{2D}$ (Brinkgreve, et al., 2002) با نتایج فرآینوس ارزیابی شده است. به منظور صحت سنجی مدل‌ها، تغییر مکان زمین در اثر عرض‌های مختلف سازه محاسبه شده است (Franzius, 2003).



الف) به روش تیر معادل



ب) مدل‌سازی قاب سازه

شکل ۲- مدل ساخته شده برای سازه با عرض 24 m و 3 m طبقه

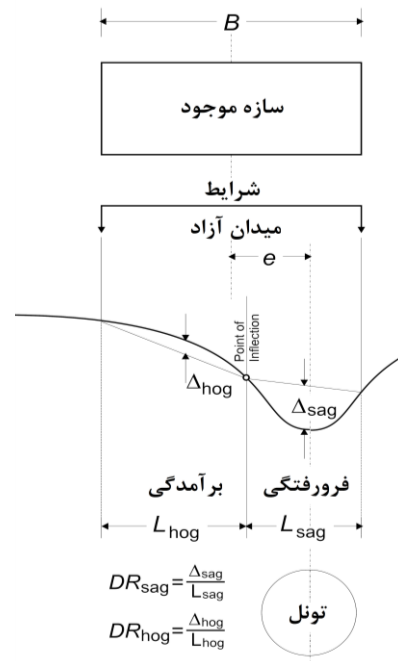
همچنین تغییر مکان زمین تحت اثر تغییر در تعداد

ضریب تعدیل (M^{DR}) حاصل از تقسیم نسبت تغییر شکل (DR) سازه ناشی از نشست القاشده به آن در اثر حفاری تونل (DR^{str}) به نسبت تغییر شکل منحنی نشست میدان آزاد (DR^{GF}) محاسبه می‌شود. روابط (۳) و (۴) ضرایب تعدیل را برای دو محدوده فرورفتگی و برآمدگی ارائه می‌دهند (Franzius, et al., 2006):

$$M_{sag}^{DR} = \frac{DR_{sag}^{str}}{DR_{sag}^{GF}} \quad (3)$$

$$M_{hog}^{DR} = \frac{DR_{hog}^{str}}{DR_{hog}^{GF}} \quad (4)$$

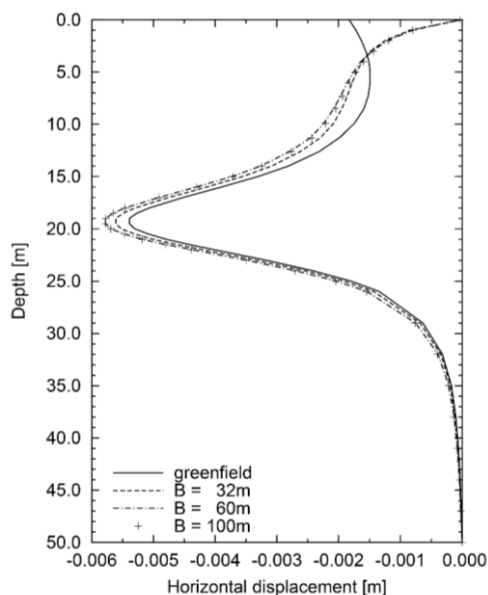
در روابط فوق M_{sag}^{DR} و M_{hog}^{DR} به ترتیب ضرایب تعدیل در ناحیه فرورفتگی و برآمدگی هستند.



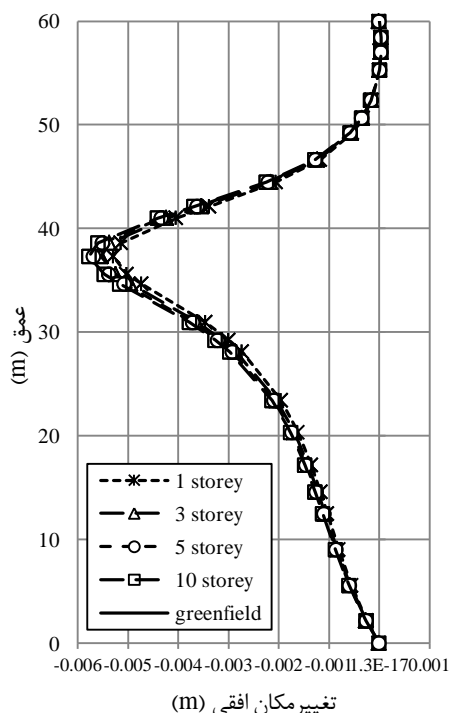
شکل ۱- تعریف نسبت تغییر شکل (DR)

۴- مسئله موردنظر در این پژوهش

به منظور فراهم آمدن امکان مقایسه بهتر، در این پژوهش از توده خاک در نظر گرفته شده توسط فرآینوس استفاده شده است (Franzius, 2003). این توده خاک شامل یک لایه با چسبندگی 5 KN/m^2 و زاویه اصطکاک داخلی 25° است. همین‌طور مدول الاستیسیته این توده خاک برابر با 20 MPa

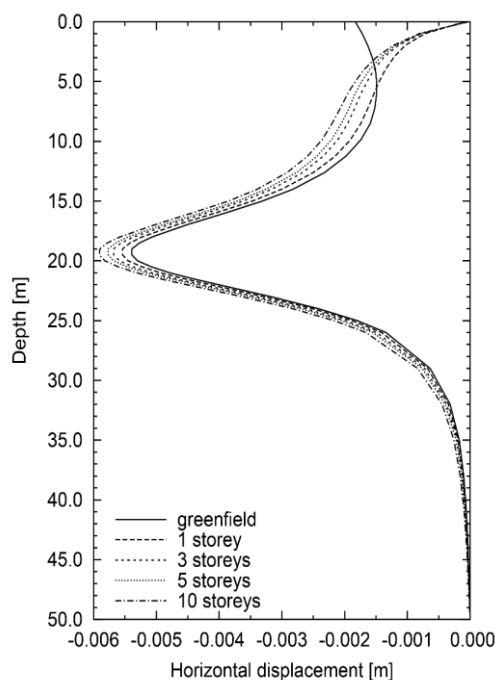


شکل ۴- تغییر مکان افقی پروفیل خاک در فاصله ۶ m از محور تونل برای ساختمان پنج طبقه



شکل ۵- تغییر مکان افقی به دست آمده توسط $PLAXIS^{2D}$ برای پروفیل خاک در فاصله ۶ m از محور تونل برای ساختمانی با عرض ۱۰۰ متر

طبقات ساختمان موجود مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است، با توجه به اینکه فرانزیوس از روش محورهای موازی برای محاسبه سختی سازه بهره برده، در این مرحله از پژوهش، سختی سازه مورد نظر با همین روش محاسبه و به تیر معادل مدل شده تخصیص داده شده است (Franzius, 2003). شکل های ۳ و ۴ به ترتیب، تغییر مکان افقی پروفیل خاک، ارائه شده توسط فرانزیوس را در فاصله ۶ m از محور تونل در مقابل تعداد طبقات و عرض ساختمان نشان می دهند.



شکل ۳- تغییر مکان افقی پروفیل خاک در فاصله ۶ m از محور تونل برای ساختمانی با عرض ۱۰۰ m

همچنین شکل های ۵ و ۶ نمودارهای مشابه حاصل از مدل سازی عددی مسئله در $PLAXIS^{2D}$ را نمایش می دهند. چنان که در این شکل ها مشاهده می شود، تغییر مکان های حاصل از هر دو پژوهش روند مشابهی را دنبال می نمایند. به منظور تعیین میزان کمی همبستگی منحنی های متناظر در شکل های ۳ تا ۶ از روش نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) استفاده شده است. ضرایب همبستگی به دست آمده در جدول ۱، ارائه شده اند.

با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین این نتایج با نتایج حاصل از تحلیل عددی مسئله که در آن سازه به‌طور کامل مدل شده، مقایسه شده‌اند.

۶-۱- روش‌های محاسبه سختی سازه

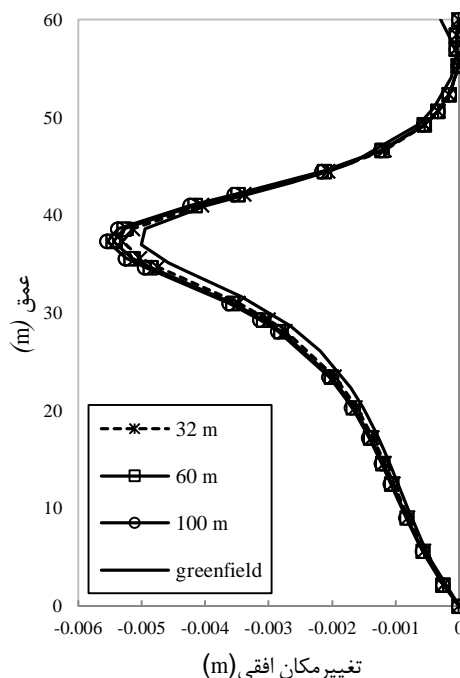
سختی خمشی سازه‌ای که تحت تأثیر تغییر مکان سطح زمین بر اثر حفاری تونل قرار گرفته از روش‌های مختلفی قابل محاسبه است. روش محورهای موازی از جمله این روش‌ها است (Timoshenko, 1930). بر اساس این روش، در یک سازه n طبقه که دارای $n+1$ دال است سختی خمشی سازه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$K_{st} = E \sum_{i=1}^{n+1} (I_i + A_i H_i^2) \quad (5)$$

در رابطه فوق، K_{st} سختی خمشی سازه، E مدول الاستیسیته مصالح دال، I_n ممان اینرسی هر دال، A_n سطح مقطع هر دال و H_n فاصله تار خنثی هر دال از تار خنثی سازه است. این روش علیرغم سادگی در محاسبه، مقادیر سختی دست‌بالایی را ارائه می‌نماید (Goh & Mair, 2014). به منظور برآورد دقیق‌تر، سختی خمشی سازه به صورت مجموع سختی خمشی هر دال پیشنهاد گردید (Lambe, 1973):

$$K_{st} = \sum_{i=1}^{n+1} K_i \quad (6)$$

مزیت این روش سادگی آن در محاسبات است؛ اما عدم محاسبه سختی خمشی ستون‌های سازه در محاسبه سختی خمشی کل، نقطه‌ضعف این روش محسوب می‌شود. به این منظور می‌توان از رابطه مایهوف (رابطه (۷)) استفاده نمود (Meyerhof, 1953).



شکل ۶- تغییر مکان افقی به‌دست آمده توسط $PLAXIS^{2D}$ برای پروفیل خاک در فاصله ۶ m از محور تونل برای ساختمان پنج طبقه

۶-۲- بررسی روش‌های مختلف محاسبه سختی

تیر معادل

دقت نتایج حاصل از روش تیر معادل منوط به تعیین دقیق خصوصیات این تیر از جمله سختی آن است. به همین منظور، در این پژوهش روش‌های پرکاربرد محاسبه سختی سازه معرفی و نتایج حاصل از تحلیل‌های مبتنی بر هر کدام

جدول ۱- ضرایب همبستگی نش - ساتکیف برای نمودارهای ارائه‌شده جهت صحت‌سنجی

برای سازه با عرض‌های مختلف (شکل‌های ۳ و ۵)				برای سازه با تعداد طبقات مختلف (شکل‌های ۴ و ۶)				
میدان آزاد	۳۲ m	۶۰ m	۱۰۰ m	میدان آزاد	۱	۳	۵	۱۰
۰٫۹۳	۰٫۹۵	۰٫۹۵	۰٫۹۲	۰٫۹۴	۰٫۹۴	۰٫۹۲	۰٫۹۲	۰٫۹۳

که بعضا از آن‌ها به عنوان میانقاب‌ها یاد می‌شود، باید گفت که اگرچه در بسیاری از موارد میانقاب‌ها نقش جداکننده را بر عهده دارند لیکن بر حسب نوع اجرا در افزایش سختی جانبی سازه مؤثر می‌باشند. چنان‌که پیش‌تر نیز عنوان شد، روش‌های تخمین سختی سازه مدنظر اغلب برآورد دسته بالایی از سختی سازه ارائه می‌نمایند. از این رو از سختی میانقاب‌ها چشم‌پوشی شده است.

۶-۲- دقت روش‌های محاسبه سختی سازه

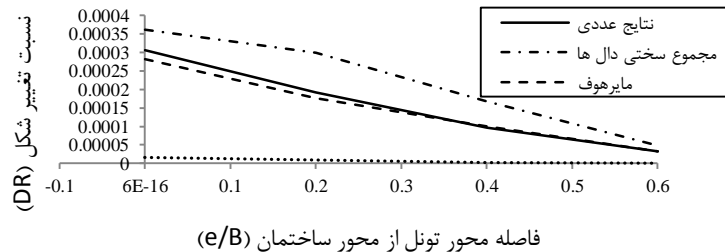
در این بخش، سختی به‌دست‌آمده برای سازه توسط هر روش نسبت به سختی محاسبه شده توسط نرم‌افزارهای عددی مقایسه شده است. برای این منظور سازه‌هایی با عرض‌های ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸ و ۶۰ متر و فواصل مختلف از محور تونل (e/B) برابر با ۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و همین‌طور با تعداد طبقات ۱، ۳، ۵ و ۱۰ طبقه با سه روش مختلف سختی تحلیل شده‌اند که برخی از نتایج حاصله در شکل‌های ۷ تا ۹ آورده شده‌اند. شکل ۷ تغییرات نسبت تغییر شکل (DR) را نسبت به فاصله محور تونل از محور ساختمان (e/B) نشان می‌دهد. ساختمان در نظر گرفته شده در این نمودار، دارای سه طبقه و عرض 24 m است.

$$K_{st} = \sum_1^{n+1} C_i K_i \quad (7)$$

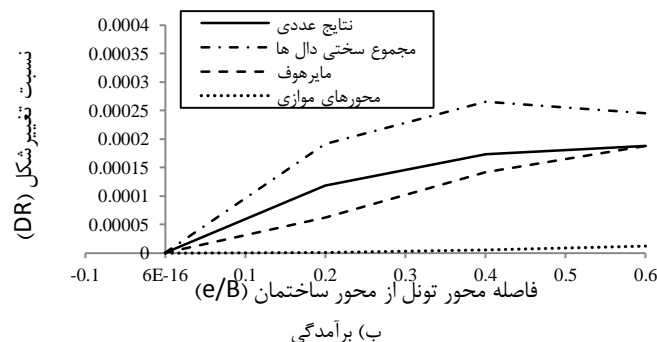
که در آن C_n عبارت است از (Goh & Mair, 2014):

$$C_i = \left[1 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \left(\frac{K_{LC} + K_{UC}}{K_{LC} + K_{UC} + K_B} \right) \right] \quad (8)$$

در رابطه اخیر، x طول قسمتی از تیر است که در ناحیه فرورفتگی یا برآمدگی قرار گرفته، l طول دهانه هر تیر، $K_{LC} = (EI/h)_{LC}$ سختی متوسط ستون‌های پایینی، $K_{UC} = (EI/h)_{UC}$ سختی متوسط ستون‌های بالایی و $K_B = (EI/l)_B$ سختی متوسط تیرهای هر طبقه می‌باشد. استفاده از روش‌های محاسبه سختی سازه که در این پژوهش مدنظر هستند، اغلب منجر برآورد دست بالایی سختی می‌شوند (Potts & Addenbrooke, 1997) و (Franzius, et al., 2006). بر این اساس در محاسبه سختی سازه، از سختی خمشی پی سازه صرف‌نظر شده است که موجب کاهش سختی محاسبه شده سازه می‌شود. شایان ذکر است که رویکرد مشابهی توسط سایر محققین نیز به کار گرفته شده است (Franzius, 2003) و (Goh & Mair, 2014). در مورد دیوارهای بیرونی و داخلی ساختمان



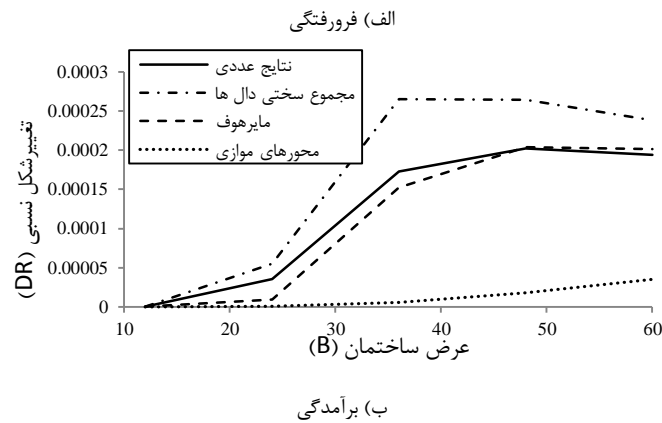
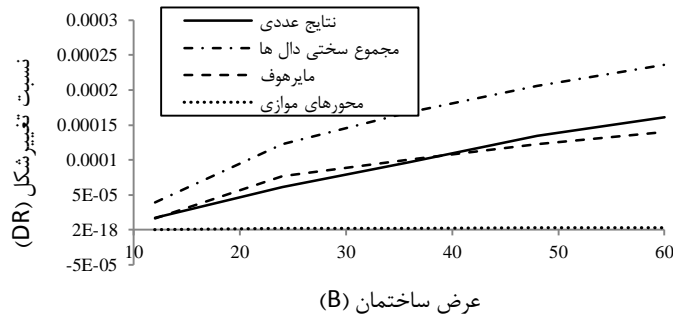
الف) فرورفتگی



شکل ۷- تغییرات نسبت تغییر شکل به فاصله ساختمان از محور تونل در محدوده

نسبت تغییر شکل (DR) نسبت به تعداد طبقات (n) برای ساختمانی با عرض (B) معادل 24 m و نسبت (e/B) برابر 0.2 نشان داده شده است.

در شکل ۸ تغییرات نسبت تغییر شکل (DR) را به عرض (B) یک ساختمان سه طبقه با نسبت خروج از محور (e/B) برابر 0.2 را نمایش می‌دهد. در شکل ۹ تغییرات



شکل ۸- تغییرات نسبت تغییر شکل به عرض ساختمان

ساختمان‌ها در محدوده فرورفتگی رخ داده‌اند (Farrel, et al., 2014). همچنین با توجه شکل های ۷ تا ۹ مشاهده می‌گردد که اختلاف مشاهده شده در سختی سازه میان مقادیر به‌دست‌آمده از روش محورهای موازی و روش مایر هوف، در محدوده فرورفتگی بیش‌تر از محدوده برآمدگی است. لذا توجه این پژوهش نیز بر محدوده فرورفتگی است. با توجه به داده‌های ارائه‌شده توسط فرانزیوس می‌توان رابطه زیر را برای منحنی‌های محدوده فرورفتگی ارائه نمود (Franzius, 2003):

$$M_{sag}^{DR} = m \cdot \exp(p \cdot \rho^*) + n \cdot \exp(q \cdot \rho^*) \quad (9)$$

که در آن ρ^* سختی نسبی به‌دست‌آمده از روش محورهای موازی، M_{sag}^{DR} ضریب تعدیل پیشنهادی فرانزیوس برای محدوده فرورفتگی و ضرایب p ، q ، m و n ضرایب ثابت

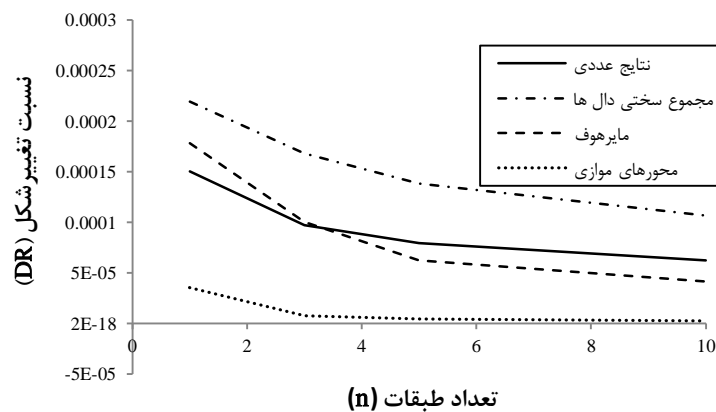
چنان که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، نتایج مدل‌سازی عددی انجام گرفته با نتایج ارائه‌شده از سختی محاسبه شده به کمک روش مایر هوف مطابقت بهتری را نشان می‌دهند. این موضوع با نتایج ارائه‌شده توسط گو و مایر نیز مطابقت دارد (Goh & Mair, 2014). بنابراین در ادامه این پژوهش، از رابطه مایر هوف برای محاسبه سختی سازه در راستای محاسبه سختی نسبی استفاده شده است.

۷- محاسبه ضرایب تعدیل مسئله

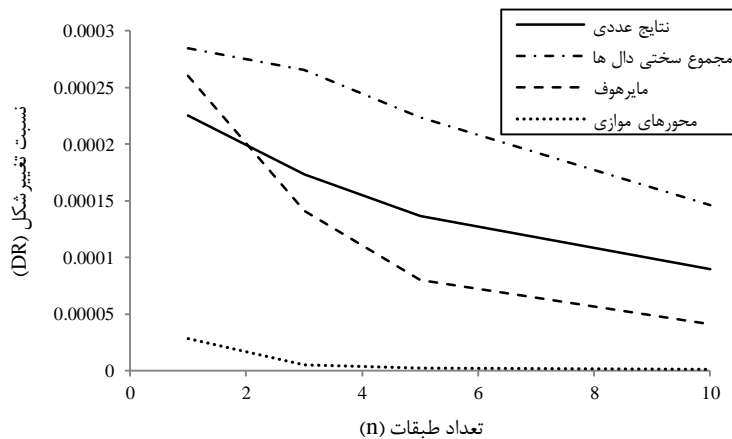
منحنی‌های تغییرات ضریب تعدیل در مقابل سختی نسبی توسط فرانزیوس ارائه شده است (Franzius, 2003). نکته شایان توجه آن است که اغلب آسیب‌های مشاهده‌شده در

می‌باشند. این ضرایب ثابت در مقادیر فاصله محور تقارن پی از محور تونل (e/B) تغییر می‌نمایند. این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده‌اند. چنان که پیش‌تر عنوان شد، فرانزیوس در محاسبات خود، سختی سازه‌هایی که بر روی سطح زمین قرار دارند را بر اساس روش محورهای موازی تعیین نموده است. این روش علیرغم سادگی، موجب تخمین دست بالای سختی سازه می‌گردد (Farrel et al., 2014)، (Goh & Mair, 2014) و (Franzius, et al., 2006). لذا تغییر شکل ساختمان و به تبع آن، آسیب‌های وارد به آن کمتر از مقادیر حقیقی ارزیابی می‌شوند. در این پژوهش، سختی نسبی از رابطه (۲)، محاسبه شده است. لیکن به جای استفاده از روش محورهای موازی برای محاسبه سختی سازه، از روش پیشنهادی گو و مایر در روابط (۷) و (۸) استفاده شده است (Goh & Mair, 2014).

می‌باشند. این ضرایب ثابت در مقادیر فاصله محور تقارن پی از محور تونل (e/B) تغییر می‌نمایند. این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده‌اند. چنان که پیش‌تر عنوان شد، فرانزیوس در محاسبات خود، سختی سازه‌هایی که بر روی سطح زمین قرار دارند را بر اساس روش محورهای موازی تعیین نموده است. این روش علیرغم سادگی، موجب تخمین دست بالای سختی سازه می‌گردد (Farrel et al., 2014)، (Goh & Mair, 2014).



الف) فرورفتگی



ب) برآمدگی

شکل ۹- تغییرات نسبت تغییر شکل به تعداد طبقات ساختمان

نسبی محاسبه شده بر اساس روش محورهای موازی، می‌توان رابطه همبستگی زیر را ارائه نمود:

شکل ۱۰ مقایسه سختی نسبی محاسبه شده بر اساس هر دو روش سختی را نشان داده است. از محاسبه سختی نسبی با استفاده از روش اخیر و مقایسه آن با مقادیر سختی

که در این روابط (M_{mod}^{DR}) ضریب تعدیل پیشنهادی این پژوهش، κ و λ ضرایب ثابت هستند که در جدول ۲ ارائه شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود در رابطه فوق، ضریب تعدیل پیشنهادی (M_{mod}^{DR}) بر اساس نسبت سختی به‌دست‌آمده از روش محورهای موازی ارائه شده است. دلیل این امر، حفظ سادگی در محاسبات و عدم نیاز به محاسبه سختی اجزا سازه‌ای موردنیاز در رابطه (۸) است. به بیان دیگر در این رابطه ضمن حفظ سادگی و سرعت در محاسبات، نتایجی ارائه شده‌اند که تطابق بهتری با نتایج مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته دارند. شکل ۱۱، نتایج فرآیند پروسه را با نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش مقایسه می‌نماید (Franzius, 2003).

$$\rho_{mod} = \alpha(\rho^*)^\beta \quad (10)$$

که در آن، ρ_{mod} سختی نسبی محاسبه‌شده در این پژوهش، ρ^* سختی نسبی از روش محورهای موازی و α و β مقادیر ثابت بوده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌گردد، و با توجه به این‌که کلیه منحنی‌های ارائه‌شده در شکل ۱۰ از رابطه (۹) پیروی می‌نمایند، مقدار قابل قبول ρ_{mod} بین $2e^{-2}$ تا $4e^{-5}$ است. با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۱۰) می‌توان نوشت:

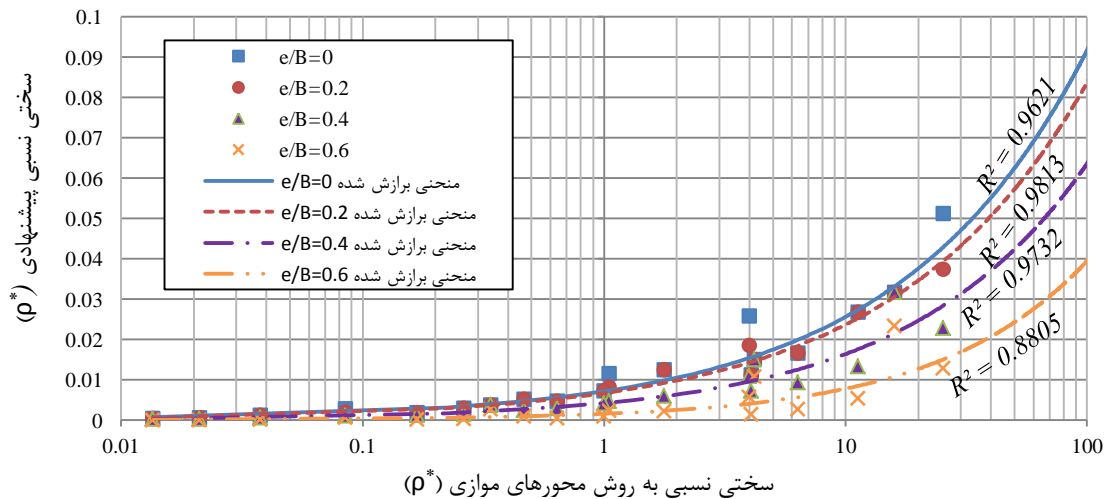
$$M_{mod}^{DR} = m \cdot \exp(p \cdot \alpha(\rho^*)^\beta) + n \cdot \exp(q \cdot \alpha(\rho^*)^\beta) \quad (11)$$

با بازنویسی این رابطه، رابطه (۱۲) به دست خواهد آمد:

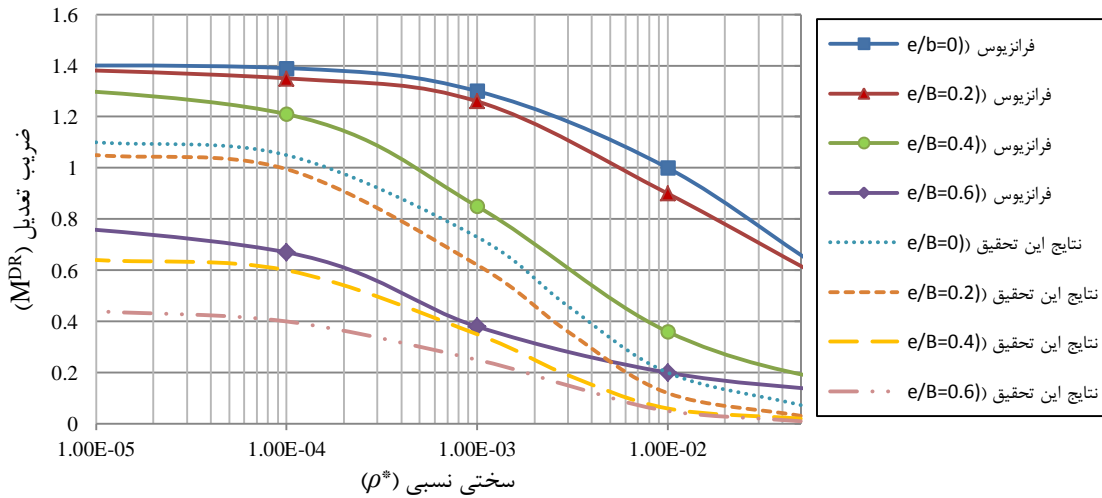
$$M_{mod}^{DR} = m \cdot \exp(\kappa \cdot \rho^*) + n \cdot \exp(\lambda \cdot \rho^*) \quad (12)$$

جدول ۲- مقادیر ثابت استفاده شده در روابط

e/B	α	β	p	q	m	n	κ	λ
۰	۰٫۰۰۹۷	۰٫۴۲	-۱۵٫۶۶	-۰٫۰۰۱۱	۰٫۷۱۱۹	۰٫۲۵۲۷	-۳٫۹۸۰۰	-۰٫۳۱۵۲
۰٫۱	۰٫۰۰۸۵	۰٫۴۳	-۷۶٫۶۸	-۰٫۴۴۱۵	۰٫۷۱۹۸	۰٫۲۹۱۷	-۵٫۴۷۲۶	-۰٫۴۱۵۲
۰٫۲	۰٫۰۰۸	۰٫۴۴	-۸۵٫۲۵	-۰٫۶۸۴۵	۰٫۷۲۵۳	۰٫۳۳۱۰	-۶٫۸۱۱۲	-۰٫۴۸۹۷
۰٫۳	۰٫۰۰۶۳	۰٫۵۵	-۴۵۳٫۶۰۷	-۰٫۹۲۵۲	۰٫۵۴۵۱	۰٫۲۷۱۷	-۶٫۷۵۹۱	-۰٫۳۹۲۰
۰٫۴	۰٫۰۰۵	۰٫۵۷	-۶۱۸٫۵	-۱٫۸۰۸۰	۰٫۳۴۰۸	۰٫۳۰۷۹	-۸٫۵۵۰۰	-۰٫۵۴۱۰
۰٫۵	۰٫۰۰۳۷	۰٫۶۴	-۸۲۴٫۵۳	-۱٫۳۹۹۳	۰٫۳۲۴۵	۰٫۲۵۰۰	-۸٫۰۲۵۱	-۰٫۳۶۸۹
۰٫۶	۰٫۰۰۲	۰٫۷۱	-۱۰۹۱	-۱٫۲۰۷۱	۰٫۲۹۰۶	۰٫۱۹۱۴	-۷٫۶۵۶۰	-۰٫۲۲۱۸



شکل ۱۰- تغییرات سختی نسبی حاصل از روش محورهای موازی (ρ^*) و روش به‌کارگرفته شده در این پژوهش (ρ_{mod})



شکل ۱۱- ضرایب تعدیل پیشنهادی

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه تأثیر نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل‌های کم‌عمق بر سازه‌های مجاور پرداخته شد. برای نیل به این هدف، از رویکرد سختی نسبی استفاده گردید. در این راستا سختی نسبی محاسبه و نشست سطح زمین و در نتیجه نسبت تغییر شکل برای شرایط مختلف حضور سازه بر روی سطح زمین با استفاده از مدل‌سازی عددی محاسبه گردید. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، نتایج ذیل قابل اشاره هستند:

- ۱- مطابق نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۷ الی ۹، روش مایرهورف با محاسبه اثر سختی خمشی ستون‌ها و دال‌های طبقات، نزدیک‌ترین مقادیر سختی خمشی سازه را نسبت به مقادیر به‌دست‌آمده از محاسبات عددی ارائه نموده است.
- ۲- سختی محاسبه شده برای یک ساختمان مشخص به روش مایرهورف حدوداً ۰/۰۱ سختی محاسبه شده سازه به روش محورهای موازی برای همان ساختمان است. شایان ذکر است که این مقدار مطلق نبوده و برای ساختمان‌های مختلف با تغییراتی همراه است.
- ۳- مقادیر محاسبه شده ضرایب تعدیل که بر اساس روش پیشنهادی این پژوهش محاسبه شده‌اند نسبت به ضرایب تعدیل مطالعات پیشین فرانزیوس در

سالهای ۲۰۰۳ و ۲۰۰۶ کاهش یافته‌اند. میزان این کاهش برای $e/B=0$ حدود ۷۵٪ است که با افزایش خروج از محوریت این مقدار کاهش یافته و در $e/B=0.6$ به ۵۰٪ می‌رسد.

۴- به منظور محاسبه سختی نسبی مورد استفاده در این پژوهش، رابطه‌ای میان سختی نسبی مذکور و سختی نسبی مورد استفاده در تحقیقات پیشین ارائه شده است (رابطه (۱۰)).

۵- رابطه‌ای جهت محاسبه ضرایب تعدیل (M^{DR}) پیشنهادی ارائه گردیده است (رابطه (۱۱)). بر اساس این رابطه، سختی سازه با روش ساده محورهای موازی محاسبه می‌شود اما مقادیر ضریب تعدیل حاصل از رابطه مذکور، مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل تیر معادلی با سختی محاسبه شده اجزا مختلف سازه است. به بیان دیگر، گرچه محاسبه سختی به روش محورهای موازی صورت گرفته است، جواب حاصل از این رابطه به جواب تحلیل‌های عددی شامل مدل قاب کامل، نزدیک است.

۶- نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که روش‌های ارائه‌شده قبل از این، به دلیل دست بالا در نظر گرفتن سختی سازه، آسیب کم‌تری را برای ساختمان‌ها برآورد می‌نمایند. این موضوع در

نهایت منجر به تخمین خوش‌بینانه‌ای از خرابی‌های
 محتمل در ساختمان‌های مجاور تونل‌های کم‌عمق
 می‌گردد.
 ۹- سیاهه نمادها
 نمادهای مورد استفاده در این پژوهش، در جدول ۳، نشان
 داده شده‌اند.

جدول ۳- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
ρ^*	m^{-1}	سختی نسبی	I_n	m^4	ممان اینرسی طبقات
ρ_{mod}^*	بی‌بعد	سختی نسبی اصلاح‌شده	A_n	m^2	سطح مقطع طبقات
K_{st}	$N.m$	سختی خمشی سازه	H_n	m	ارتفاع طبقات
E_s	N/m^2	مدول یانگ خاک	K_n	$N.m$	سختی خمشی هر طبقه
Z_o	m	عمق تونل	C_n	بی‌بعد	ضریب اصلاح سختی خمشی مایر هوف
DR_{hog}^{Str}	بی‌بعد	نسبت تغییر شکل در حضور سازه در منطقه برآمدگی	X	m	طول منطقه فرورفتگی یا برآمدگی
DR_{hog}^{GF}	بی‌بعد	نسبت تغییر شکل میدان آزاد در منطقه برآمدگی	L	m	طول دهانه تیر
M_{sag}^{DR}	بی‌بعد	ضریب تعدیل منطقه فرورفتگی	K_{LC}	$N.m$	سختی متوسط ستون‌های پایینی
M_{hog}^{DR}	بی‌بعد	ضریب تعدیل منطقه برآمدگی	K_{UC}	$N.m$	سختی متوسط ستون‌های بالایی
E	N/m^2	مدول یانگ بتن	K_B	$N.m$	سختی متوسط تیرها
n	بی‌بعد	شماره طبقه	κ	بی‌بعد	ضرایب پیشنهادی جهت بهبود ضرایب تعدیل

۱۰- مراجع

- Abdoli Fazel, A., Emami Tabrizi, M. & Afshin, H. (2015). Physical modeling of settlement in sandy soil due to mechanized tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Engineering*, 4(1), 69-84.
- Boscardin, M. & Cording, E. (1989). Building response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.*, 115(1), 1-21.
- Brinkgreve, R., Al-khoury, R., Bakker, K., Bonnier, P., Brand, P., Broere, W., Burd, H., Stoys, G., Vermeer, P. & Haag, D. (2002). *Plaxis, User's Manual Version 8.0*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Burland, J. & Wroth, C. (1974). Settlements of buildings and associated damage. Review paper. *Conference on Settlement of Structures*. (pp.611-654). Cambridge. Pentch Press. London.
- Emami Tabrizi, M. & Faraji, S. (2018). Investigating the settlement caused by twin tunnels in different relative density of sand using laboratory modelling. *Tunnelling and Underground Space Engineering*, 6(2), 67-80. DOI: 10.22044/TUSE.2018.4993.1289.
- Farrell, R., Mair, R., Sciotti, A. & Pigorini, A. (2014). Building response to tunnelling. *Soils and Foundations*, 54(3), 269-279, DOI: 10.1016/j.sandf.2014.04.003.
- Franzis, J., Potts, D. & Burland, J. (2006). The response of surface structures to tunnel construction. *Geotechnical Engineering, ICE*, 159(1), 3-17, DOI: 10.1680/geng.2006.159.1.3.
- Franzius, J. (2003). *Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence (Ph.D. thesis)*. Imperial

College of Science, Technology and Medicine.

- Franzius, J., Potts, D. & Addenbrooke, T. (2004). *The influence of building weight on tunnelling-induced ground and building deformation*. *Soils and Foundations*, 44(1), 25-38. DOI: 10.3208/sandf.44.25.
- Goh, K. & Mair, R. (2014). *Response of framed buildings to excavation-induced movements*. *Soils and Foundations*, 54(3), 250–268, DOI: 10.1016/j.sandf.2014.04.002.
- Lambe, T. (1973). *Predictions in soil engineering*. *Geotechnique*, 23(2), 151-202.
- Mair, R., Taylor, R. & Burland, J. (1996). *Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunnelling*. *Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. (pp. 713-718). Rotterdam. ISBN: 905410 856 8.
- Maleki, M., Sereshteh, H., Mousivand, M. & Bayat, M. (2011). *An equivalent beam model for the analysis of tunnel-building interaction*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 524–533, DOI:10.1016/j.tust.2011.02.006.
- Meyerhof, G. (1953). *Some recent foundation research and its application to design*. *Structural Engineer*, 31(6), 151-167.
- Mirhabibi, A., & Soroush, A. (2012). *Effects of surface buildings on twin tunnelling-induced ground settlements*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 29, 40-51, DOI: 10.1016/j.tust.2011.12.009.
- Netzel, H. (2009). *Building response due to ground movements*. (Ph.D. thesis). Delft University of Technology. ISSN: 978-1-58603-995-0.
- O'Reilly, M. & New, B. (1982). *Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction*. *Pub. of Institution of Mining and Metallurgy*, 173-181, ISSN: 090048862X.
- Potts, D. & Addenbrooke, T. (1997). *A structure's influence on tunnelling-induced ground movements*. *Geotechnical Engineering, ICE*, 125(2), 109–125.
- Timoshenko, S. (1930). *Strength of materials*. D. Van Nostrand Company inc. New York.

Estimation of Framed Building Response to the Induced Settlements of Shallow Tunneling

M. Emami Tabrizi¹; A. Nimitaj²; H. Omrani Khiabani³

1. Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology
2. Ph.D. Student in Geotechnics; Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology
3. M.Sc. Student in Geotechnics; Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology

Received: 11 November 2016; Accepted: 08 May 2019
DOI: 10.22044/TUSE.2019.5029.1290

Keywords

*Shallow Tunnels
Structural Stiffness
Soil Stiffness
Modification Factor
Ground Settlement*

Extended Abstract

Summary

Induced ground surface settlement due to tunneling causes damages to the adjacent structures. Relative stiffness approach is a well-known method of estimation of these probable damages based on soil to building stiffness ratio. Importance of calculation of the structural stiffness in an accurate way necessitates a comparison between the results of different available methods. In this study, the numerical analysis is performed to recognize the most suitable method of the calculation of the bending stiffness of the buildings. The obtained modification factors are then plotted versus the calculated relative stiffness. The numerical results show that the amounts of the settlement that are underestimated by conventional methods. Therefore, in this paper a correction factor is proposed to improve previous modification factors. The proposed approach maintains the simplicity in the calculation process besides of its more accurate results.

Introduction

In conventional methods, the ground settlement of the greenfield condition is evaluated, and then, applied to the investigated building. The induced deformation to the building is affected by its stiffness. Therefore, estimating an accurate value of the stiffness leads to the results for better understanding of the response of the building. Various approaches such as the parallel axes, Lambe and Meyerhof methods are available to calculate the bending stiffness of a building. However, selection of an efficient method for calculation of the building stiffness is important.

Methodology and Approaches

The problem is analyzed by finite element method based PLAXIS^{2D} software considering different geometries. It includes buildings with variable numbers of stories and different widths of footings. Settlement trough is obtained for each condition and bending stiffness of each building is calculated based on the length of the hogging and the sagging part of the building. The deflection ratio and the modification factors are then calculated. The obtained modification factors versus the relative stiffness are plotted in a semi-logarithmic domain.

Results and Conclusions

The obtained results from this research work indicate that the conventional methods of estimation of the building deformation due to tunneling predict underestimated values in the sagging part of the settlement where the majority of the building is damaged. Therefore, this study has been made to look into this problem by introducing a new correction factor. By using this factor, the damage can accurately be determined.