

### بررسی اثر حفر تونل برنشست سازه‌های اطراف آن با نگرش ویژه بر ارتفاع و عرض سازه مطالعه موردی: تونل مترو اصفهان

#### پژوهشی

محمد امیری<sup>۱\*</sup>؛ مهدی عامری سیاهویی<sup>۲</sup>؛ صدیقه قاسمی<sup>۳</sup>؛ رعنا صالحیان<sup>۴</sup>

۱- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، amirii@hormozgan.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قشم، mehdiameri3628@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری؛ مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی، s\_ghasemi\_888@yahoo.com

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، raanaslhn@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۸/۰۹

شماره صفحات: ۵۷ تا ۶۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2021.10517.1412

واژگان کلیدی	چکیده
تونل ارتفاع سازه عرض سازه نشست مجاز ابزار دقیق	در احداث ساختارهای زیرزمینی شهری، عبور تونل‌ها از زیر سازه‌های سطحی امری اجتناب‌ناپذیر است. پیش‌بینی و کنترل تغییر شکل‌های حاصل از حفاری، به ویژه نشست سطحی زمین، همواره باید پیش از حفاری مورد توجه قرار گیرد. به این منظور در مقاله به بررسی اثر حفر تونل بر نشست ساختمان‌های مجاور تونل با نگرش ویژه بر ارتفاع و عرض سازه پرداخته شده است. تونل مترو اصفهان به صورت موردی در نظر گرفته شده است و از نرم‌افزار <i>FLAC2D</i> جهت مدل‌سازی در استفاده شده است. در این مقاله محدوده ایستگاه میدان آزادی تا ایستگاه شیخ کلینی و اطلاعات ساختمان‌های منطقه در نظر گرفته شده و به بررسی اثر عرض و ارتفاع سازه‌های اطراف تونل بر میزان نشست سطح زمین در اثر حفر تونل پرداخته شده است. با توجه به تراکم زیاد سازه‌ها در این منطقه و برنامه توسعه شهری احتمال تخریب بسیاری از سازه‌ها و احداث سازه‌های جدید در این منطقه وجود دارد. جهت تعیین مشخصات ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه در سه منطقه مطالعات ژئوتکنیکی صورت گرفته است و جهت صحت‌سنجی نتایج با استفاده از ابزار دقیق نشست سازه مجاور در مدت زمان ۹۰ روز بررسی شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته، در ساختمان با عرض ۱۰ متر و تعداد طبقات ۴ (ارتفاع ۱۲ متر) محدوده‌ی مجاز ساخت سازه در حدود ۱٫۶۵ متر و با افزایش تعداد طبقات به ۸ و ۱۲ طبقه این فاصله به حدود ۴٫۵ و ۹ متر رسیده است و نسبت به ساختمان ۴ طبقه به ترتیب ۲٫۷۲ و ۵٫۴۵ برابر افزایش یافته است. با افزایش تعداد طبقات به ۱۲، محدوده مجاز ساخت سازه برای عرض ۲۰ و ۳۰ متر به ترتیب نسبت به ساختمان با عرض ۱۰ متر به ترتیب ۱٫۵ و ۲٫۷ برابر افزایش یافته است. لازم به ذکر است، نتایج به دست آمده برای مناطق مشابه با منطقه مورد نظر از نظر ویژگی‌های ساختگاه و مشخصات تونل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

شناخته شده است (Yu, et al., 2019). با این وجود احداث تونل ممکن است، باعث ایجاد حرکت زمین شود، که می‌تواند بر سازه‌های زمینی و زیر زمینی مجاور تأثیر منفی

#### ۱- مقدمه

حفر و احداث تونل در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از مسائل مهم به‌منظور کاهش ازدحام ترافیک در مناطق شهری

\* هرمزگان؛ بندرعباس؛ کیلومتر ۹ جاده میناب؛ دانشگاه هرمزگان؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دپارتمان مهندسی عمران؛ شماره تماس: ۰۹۱۷۷۲۹۲۸۹۶

فاکتورهای مختلفی را بر روی نشست تونل‌های دوقلوی مترو استانبول که با استفاده از دستگاه EPB حفاری می‌شوند، مورد بررسی قرار داد (Mahmutoglu, 2011).

چن و همکاران (۲۰۱۱) فشار آب، نشست‌های سطح زمین و زیرسطح زمین و جابجایی‌های افقی در طول ساخت تونل‌های موازی دوقلوی مترو هانگژو (Hangzhou) در چین را مورد مطالعه قرار دادند (Chen, et al., 2011).

لامبورگی و همکاران (۲۰۱۱) با اطلاعات پروژه مترو شهر مادرید اسپانیا و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و مدل‌سازی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D با آنالیز حساسیت مدل‌های رفتاری مختلف خاک به بررسی تأثیر سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته و پروفیل‌های طولی نشست را در حالت‌های مختلف به دست آورده‌اند (Lambrughi, et al., 2011).

حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و برداشت‌های برج، به بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل متروی استانبول پرداختند. این تونل‌ها، به صورت دوقلوی است و از روش (New NATM Austrian Tunneling Method) برای حفاری آن استفاده شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که با افزایش سربار، میزان نشست نیز افزایش می‌یابد (Hasanpour, et al., 2012).

امیری و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر اثر هندسه مقطع بر روی میزان نشست زمین در اثر حفر تونل تک و دوقلوی پرداختند و نتایج نشان داد که حداکثر و حداقل نشست به ترتیب در حالت تونل نعلی شکل و تونل دو قوسی اتفاق افتاده است. از سوی دیگر با افزایش فاصله دو تونل از یکدیگر میزان نشست حدود ۲٪ کاهش می‌یابد؛ همچنین با افزایش فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها به بیش از سه برابر قطر تونل‌ها، تغییرات میزان نشست تقریباً ثابت می‌شود (Amiri, et al., 2019).

قیاصی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی اندرکنش بین شالوده‌های عمیق و تونل قطار شهری تحت بارهای لرزه‌ای و رفتار تونل و گروه شمع در طی اعمال زلزله و همچنین تأثیر افزایش فاصله گروه شمع از تونل بر روی رفتار اندرکنشی آن‌ها پرداختند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که میزان

داشته باشد و باعث خرابی سازه‌های اطراف شود (Li, et al., 2020). تونل‌های مترو اغلب در کنار پی ساختمان‌ها ساخته می‌شوند و نگرانی مهم در این زمینه، تأثیر حفاری روی پی سازه‌های مجاور است که می‌تواند سبب ایجاد نشست متقارن و نامتقارن در سازه‌ها شود (Bayat, et al., 2015). درحالی که تونل‌ها می‌توانند در مقابل حرکت‌های کوچک مقاوم باشند، فونداسیون‌های سطحی و یا شمع‌های بارگذاری شده توسط پایه‌های پل‌های مجاور تونل‌ها می‌توانند باعث حرکت‌های ناپایدار کننده و یا افزایش سطح توزیع تنش در خاک اطراف تونل شوند که ممکن است سبب بروز آسیب به تونل‌ها شود (Ghiasi, et al., 2020).

سازه‌های مدفون بسته به شکل هندسی، عمق دفن و پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی و لرزه‌ای رفتار متفاوتی را هنگام حفاری از خود نشان می‌دهند (Vahdani, et al., 2019). انتخاب شکل دهانه و بررسی میزان نشست سطح زمین در حالت تونل تک و دوقلوی از نکات بسیار مهم در احداث تونل متروها است (Amiri, et al., 2019). عملیات حفاری و ساخت تونل، منجر به بروز تغییراتی در تنش‌ها و شرایط هیدرولوژیکی ناحیه حفاری و پیرامون آن می‌شود. این تغییرات معمولاً با جابجایی‌ها و تغییرشکل‌های داخلی سریع در جبهه حفاری و جمع شدگی دیواره‌های تونل همراه است (Leca & New, 2007).

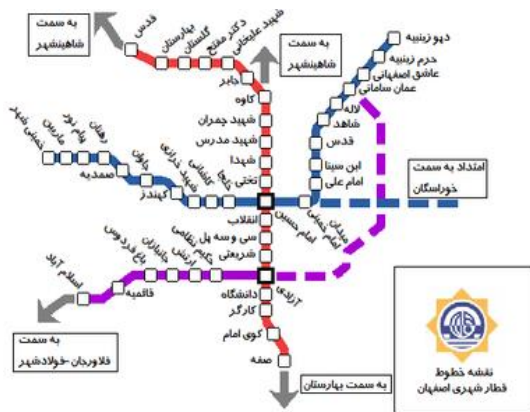
پک (۱۹۶۹) روشی را جهت ارزیابی و تحلیل نشست‌های سطحی ارائه داد. وی بر پایه مشاهدات انجام‌شده در چندین پروژه تونل‌سازی بیان کرد، که منحنی نشست ایجاد شده در سطح زمین توسط یک منحنی گاوسی بیان می‌شود (Peck, 1969).

وحدتی‌راد و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از نرم‌افزار Plaxis به بررسی نشست حاصل از حفر خط ۲ تونل تبریز پرداخته‌اند و اثر آن را روی میزان نشست بازار زیرزمینی واقع روی تونل، بررسی کردند (Vahdatirad, et al., 2009).

اوکک (۲۰۰۹) نشست‌های کوتاه‌مدت سطح و تأثیرات آن‌ها روی ساختمان‌ها را برای تونل‌های دوقلوی متروی استانبول با استفاده از روش اجزای محدود بررسی کرد (Ocak, 2009).

محمودقلو (۲۰۱۱) با استفاده از روش اجزای محدود

خود می‌شود. در مقاله حاضر اثر نشست سازه‌های مجاور در اثر حفر تونل، در قطعه یک این مسیر از ایستگاه میدان آزادی تا ایستگاه شیخ کلینی بررسی شده است.



شکل ۱- نقشه تونل مترو اصفهان، خط (۱) صفه-قدس (مسیر قرمز رنگ)

(The urban & suburban trains, 2011)

## ۲-۲- مدل سازی هندسی

خط شمالی- جنوبی مترو اصفهان از ترمینال مسافربری کاوه به ترمینال مسافربری صفه به روش *TBM* اجرا شده است. در مدل سازی عددی انتخاب ابعاد مدل اهمیت خاصی دارد. در این پژوهش با استفاده از آزمون سعی و خطا طول مدل در حدود ۳۰ متر (حدود ۵ برابر قطر تونل) در نظر گرفته شده و با مرز مناسب جایگزین شده است. (Amiri, et al., 2019). تعیین مرز مناسب با توجه به شرایط منطقه مورد نظر و رفتار محیط مرزی مشخص شده است. در این مقاله کف مدل که بر روی سنگ بستر قرار دارد و جابجایی آن صفر است، در دو جهت  $x$  و  $y$  ثابت شده و دو طرف مرز راست و چپ تونل نیز در جهت  $x$  ثابت شده است.

تعداد ناحیه‌های استفاده شده در مدل سازی ۲۴۰۰ عدد است. در مش بندی سعی شده است که برای دقت بیشتر نتایج، ناحیه‌های نزدیک به تونل ریزتر باشند و هر چه فاصله از تونل بیشتر می‌شود، ناحیه‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. محدوده تونل مترو مورد بررسی در این مطالعه (محدوده ایستگاه میدان آزادی تا ایستگاه شیخ کلینی) از زیر جاده این محدوده عبور می‌کند. بر اساس مطالعات میدانی انجام شده فاصله نزدیک‌ترین ساختمان در سمت راست و چپ از

جابجایی تونل و گروه‌شمع در جهت زلزله در طی لرزش با گذشت زمان افزایش می‌یابد (Ghiasi, et al., 2020).

با توجه به مبحث هفتم مقرارت ملی ساختمان (۱۳۹۲) نشست مجاز در حالت استفاده از پی‌های نواری برای خاک‌های ماسه‌ای و دانه‌ای برابر ۲۵ میلی‌متر است. جهت تعیین محدوده مجاز ساخت سازه باید فاصله‌ی مناسب جهت نشست سازه برابر ۲۵ میلی‌متر در حالت‌های مختلف عرض و ارتفاع سازه تعیین نمود. ساخت ساختمان‌ها در اطراف تونل امری اجتناب ناپذیر است. از سوی دیگر در پژوهش‌های صورت گرفته به صورت خاص، یک فاصله ایمن برای ساخت سازه‌های اطراف تونل‌ها ارائه نشده است؛ بنابراین در این پژوهش سعی می‌شود، حداقل فاصله مورد نیاز برای ساخت سازه‌ها در اطراف تونل تعیین شود؛ بنابراین هدف مقاله حاضر ارائه یک منحنی استاندارد برای فاصله مناسب احداث سازه مجاور تونل بر اساس عرض و ارتفاع سازه‌ها است. بر این اساس تاثیر عرض و ارتفاع سازه بر اندرکنش بین سازه و خاک برای تونل مترو اصفهان به صورت موردی بررسی شده است و اثر ساخت سازه‌های مجاور تونل بر پاسخ تونل بررسی می‌شود و فاصله مناسب ساخت برای ابعاد مختلف سازه تعیین شده است.

## ۲- روش تحقیق

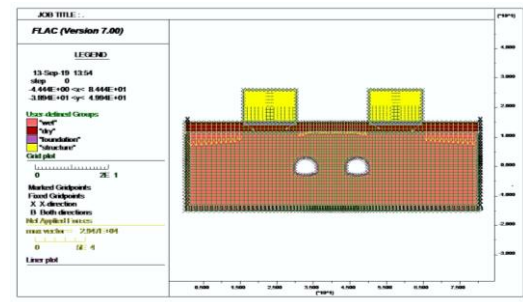
### ۲-۱- معرفی تونل مترو اصفهان

بر اساس مطالعات انجام گرفته، سیستم قطار سبک شهری اصفهان شامل پنج خط است. در اولین مرحله خط شمالی- جنوبی از ترمینال مسافربری کاوه شروع شده و به ترمینال مسافربری صفه ختم می‌شود. این خط ۱۲/۵ کیلومتر است که حدود ۱۲ کیلومتر آن زیرزمینی بوده و در مجموع ۱۵ ایستگاه احداث شده است. نقشه تونل مترو اصفهان در شکل ۱، نشان داده شده است (The urban & suburban trains, 2011). مقطع تونل مترو اصفهان به شکل دو قوسی بوده و قطر تونل در قسمت میانی ۷ متر است. تونل‌ها در عمق ۱۵ متری زمین بوده و سطح آب زیرزمینی تقریباً در عمق ۳ متری سطح زمین است. بار ترافیکی موجود روی تونل‌ها معادل با ۲۰ کیلونیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها دو برابر قطر (۱۴ متر) است. با توجه به اینکه حفر تونل باعث نشست سطح زمین مجاور

آبرفتی (*Alluvium*) به ضخامت تقریباً ۴ متر بر روی *Sandstone* قرار دارد (Amiri, et al., 2019). مدل رفتاری استفاده شده برای خاک منطقه مدل رفتاری الاستیک پلاستیک نرم شونده است و زاویه اتساع خاک نیز حدود ۸ درجه منظور شده است (Kasper & Meschke, 2006). برای تعیین مشخصات مکانیکی خاک از محل تونل نمونه‌گیری انجام شده و با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی، مشخصات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک تعیین شده است. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این مقاله بر اساس استاندارد *ASTM* صورت گرفته است (ASTM, 2004). زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و چسبندگی ( $C$ ) خاک بر اساس استاندارد *ASTM, D 3080* و دانسیته ( $\gamma$ ) بر اساس استاندارد *ASTM, D 854* تعیین شده است (ASTM D 3080, 2011; ASTM D 3080, 2011; 854, 1999). پارامترهای مقاومتی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۱، ارائه شده است.

برای مدل‌سازی ساختمان‌ها در هر ۵ متر از طول ساختمان یک ستون در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری که برای ساختمان و فونداسیون و همچنین شاتریت اطراف تونل در نظر گرفته شده، مدل رفتاری الاستیک است. خصوصیات سازه‌ای که در تحلیل‌ها به کار برده شده است، در جدول ۲، ارائه شده است.

مرکز تونل به ترتیب ۵ و ۲/۵ متر است. با توجه به شرایط واقعی مطالعه موردی، سختی فونداسیون‌ها به صورت نواری در تحلیل‌ها وارد شده است. این فونداسیون‌ها دارای عرض ۱۲۰ سانتی‌متر هستند که در فواصل ۵ متری از هم قرار دارند. مدل مش‌بندی شده تونل مترو اصفهان و ساختمان‌های مجاور در شکل ۲، نشان داده شده است. شایان ذکر است، بار سازه‌ها به صورت یک بارگسترده در مدل اعمال شده است.



شکل ۲- مدل مش‌بندی شده تونل مترو اصفهان

۲-۳- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح در مسیر شیخ کلینی-آزادی  
در مسیر شیخ کلینی-آزادی قطعه سنگ‌هایی با جنس متفاوت وجود دارد. ولی جنس غالب سنگ‌های مسیر از نوع تانوب شیل و ماسه‌سنگ (*Sandstone*) است. همچنین

جدول ۱- برخی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه مورد مطالعه (تونل مترو اصفهان مسیر شیخ کلینی-آزادی)

Material	$\gamma(kN/m^3)$	$\nu$	$E(kN/m^2)$	$C (kN/m^2)$	$\phi$	$\Psi$
Alluvium	۱۸	۰/۳	$۸ \times 10^4$	۴۳	۲۵	-
Sandstone	۲۰	۰/۳۲	$۱/۷ \times 10^5$	۳۲	۳۴	۸

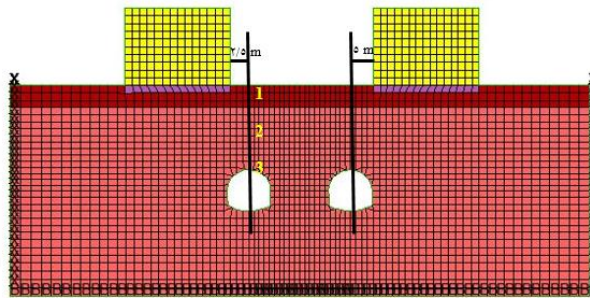
جدول ۲- خصوصیات مصالح ساختمان

$E_{concrete}$ (GPa)	$\nu_{concrete}$	$\gamma_{concrete}$ ( $kg/m^3$ )	Column dimensions ( $cm^2$ )	Beam dimensions ( $cm^2$ )	Foundation thickness (cm)
۲۵	۰/۱۵	۲۵۰۰	$۸۰ \times ۸۰$	$۵۰ \times ۵۰$	۱۰۰

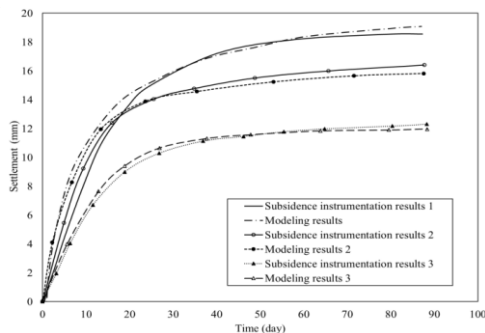
گرفتن وزن ساختمان، جرم سقف و دیواره‌های ساختمان بر اساس آئین‌نامه‌های موجود محاسبه و با توجه به حجم ساختمان، چگالی یکنواخت برای ساختمان محاسبه و مدل‌سازی شده است. شایان ذکر است با توجه به اینکه عمق تونل یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر نشست سازه‌های مجاور است، با توجه به مطالعه موردی و برداشت‌های صورت گرفته عمق تاج تونل ۱۲ متر در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۴- صحت‌سنجی نتایج با نتایج ابزار دقیق

جهت مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج ابزار دقیق و صحت‌سنجی نتایج، سه نقطه در بالای تونل غربی در نظر گرفته شده است. یک نقطه در نزدیکی تاج تونل (۱۲ متری سطح زمین)، یک نقطه در میانه ارتفاع بالای تونل (۶ متری سطح زمین) و دیگری در سطح زمین در نظر گرفته شده است. مکان نقاطی که نتایج ابزار دقیق آن‌ها استفاده شده (شکل ۳) با عدد ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- نحوه‌ی مدل‌سازی و مش‌بندی و مکان ابزار دقیق‌های مورد نظر در طرح



شکل ۴- مقایسه نتایج به دست آمده از ابزار دقیق قرار گرفته در موقعیت ۱، ۲ و ۳ با نتایج مدل‌سازی (سطح زمین)

پارامترهای  $\gamma$ ،  $C$  و  $\Phi$  از این جدول و پارامترهای  $K$  و  $G$  با استفاده از پارامترهای  $E$  و  $\nu$  و با استفاده از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند (Landau & Lifshitz, 1970).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

شایان ذکر است که بر اساس اطلاعات موجود و مطالعات میدانی برای سازه‌های مورد مطالعه چهار عرض مختلف ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. بر اساس فواصل سازه‌های اطراف خط مسیر شیخ کلبینی-آزادی فواصل ۳/۵، ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ متر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای بررسی تأثیر ارتفاع سازه بر اندرکنش خاک و سازه، شش مدل مختلف از تعداد طبقات ساختمان در نظر گرفته شده است. بر این اساس تعداد طبقات ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ (ارتفاع هر طبقه ۳ متر) برای ساختمان‌های مجاور در نظر گرفته شده است. جهت در نظر

در شکل ۴، مقایسه بین نتایج به دست آمده از ابزار دقیق نقاط ۱، ۲ و ۳ و نتایج به دست آمده از نرم‌افزار *FLAC2D* در مدت زمان ۹۰ روز نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۴) بیش‌ترین اختلاف میزان نشست به دست آمده از مدل‌سازی با نرم‌افزار و نتایج ابزار دقیق در نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۲/۷۱، ۳/۰ و ۱/۶ درصد است. بر اساس نتایج ارائه شده، میزان خطای اندک و کمتر از ۳ درصد است، بر این اساس می‌توان بیان نمود که مدل در نظر گرفته شده برای آنالیز نمونه‌ها مناسب است.

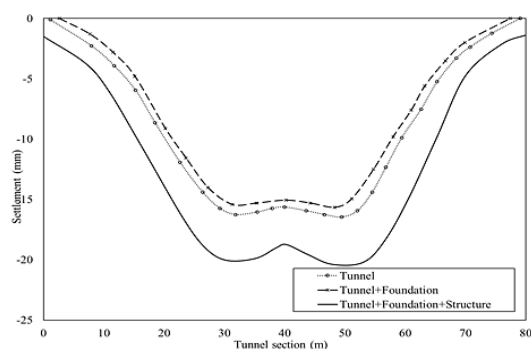
### ۳- بحث و بررسی نتایج

#### ۳-۱- بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر

#### تونل، در سه حالت زمین بکر، فونداسیون و

#### فونداسیون - سازه

در شکل ۵، منحنی تغییرات نشست زمین در سه حالت ارائه شده است. حالت اول نشست سطح زمین در حالت حفر تونل و زمین بکر، حالت دوم شرایط حفر تونل در صورت وجود فونداسیون ساختمان اطراف تونل (قبل از حفر تونل فونداسیون اجرا شده است) و حالت سوم نیز شرایط حفر تونل در حالت وجود فونداسیون و ساخت کامل سازه (قبل از حفر تونل فونداسیون و سازه اجرا شده است) است. شایان ذکر است برای محاسبه میزان نشست و تغییر شکل‌ها تحت تاثیر وزن فونداسیون و سازه، ابتدا بدون در نظر گرفتن تونل، این دو مدل طراحی و میزان نشست و تغییر شکل آن‌ها محاسبه و در مدل‌های نهایی لحاظ شده است.



شکل ۵- نشست سطح زمین به علت حفاری تونل در سه حالت زمین

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۵، نشست سطح زمین در حالت حفر تونل و وجود فونداسیون سازه کم‌تر از حالت بدون وجود فونداسیون است. در حقیقت از آنجا که وجود فونداسیون نسبت به خاک دستی منطقه صلبیت بیشتری ایجاد می‌کند، باعث ایجاد صلبیت بیشتری می‌شود و میزان نشست سطح زمین در حالت وجود فونداسیون کم‌تر از حالت زمین بکر شود. لازم به ذکر است، همانگونه که در شکل ۵، مشاهده می‌شود، این تفاوت بسیار اندک و قابل چشم پوشی است. از طرفی بعد از ساخت کامل سازه به علت

اعمال وزن سازه نشست سطح زمین افزایش پیدا کرده است. بر اساس نتایج حاصل شده حداکثر نشست در سه حالت مورد بررسی، در بالای تونل‌های غربی و شرقی اتفاق افتاده است. حداکثر نشست در حالت زمین، وجود فونداسیون و وجود فونداسیون و سازه به ترتیب برابر ۱۶/۵، ۱۶/۲ و ۲۰ میلی‌متر است؛ بنابراین اعمال بار سازه باعث بیشترین اختلاف نشست نسبت به حالت زمین بکر شده است و این مقدار برابر ۳/۸ میلی‌متر است. از طرفی در محدوده ساختمان‌ها اختلاف نشست‌ها بیشتر بوده است و هر چه از محدوده ساختمان‌ها دورتر شود، اختلاف نشست‌ها کاهش پیدا می‌کند.

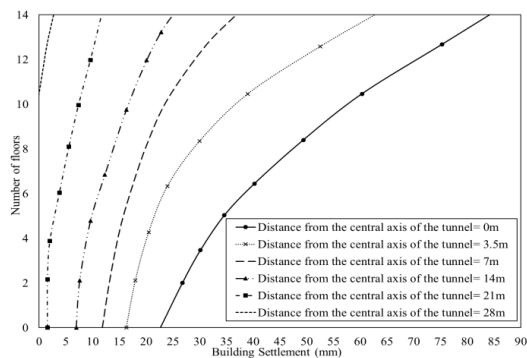
شکل ۶، منحنی جابجایی افقی را در طول مقطع تونل در سه حالت بیان شده را نشان می‌دهد. در هر سه حالت جابجایی‌های افقی کم و در حد دهم میلی‌متر بوده است. جابجایی‌های افقی سمت راست از محور مرکزی مقداری مثبت و سمت چپ از محور مرکزی مقداری منفی دارد و این نشان دهنده این است که توده خاک سمت راست محور مرکزی بین دو تونل به سمت راست و توده سمت چپ محور مرکزی تونل به سمت چپ حرکت کرده است. در حالت ساخت سازه حداکثر جابجایی افقی خاک سمت راست به اندازه ۱ میلی‌متر به سمت راست و حداکثر جابجایی افقی خاک سمت چپ به اندازه ۱ میلی‌متر به سمت چپ است. در حالت حفاری تونل بدون وجود سازه حداکثر جابجایی افقی توده خاک بالادست به اندازه ۰/۸ به سمت راست و توده خاک سمت چپ به اندازه ۰/۸ میلی‌متر به سمت چپ است. در حالت وجود فونداسیون و حفاری تونل، حداکثر جابجایی افقی توده خاک سمت راست به اندازه ۰/۶ به سمت راست و خاک سمت چپ به اندازه ۰/۶ میلی‌متر به سمت چپ جابجا شده است. در این حالت نیز مشاهده می‌شود، جابجایی افقی در حالت وجود فونداسیون به علت صلبیتی که ایجاد می‌کند، مقدار کم‌تری نسبت به حالت زمین بکر دارد. در حالت اعمال ساخت کل سازه، جابجایی‌ها نسبت به حالت زمین بکر افزایش پیدا می‌کند. در کل جابجایی‌های افقی اتفاق افتاده در سه حالت مقدار اندکی بوده و در حد دهم میلی‌متر است.



میلی متر کاهش می‌یابد و در فاصله ۲۸ متری نشست در سطح زمین مشاهده نمی‌شود، از سوی دیگر مشاهده می‌شود با افزایش تعداد طبقات به طور منطقی میزان نشست افزایش می‌یابد.

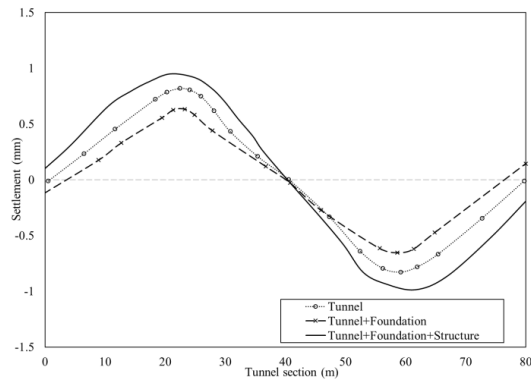
برای ساختمان احداث شده بر روی محور مرکزی تونل با افزایش تعداد طبقات به ۴ طبقه (۱۲ متر) میزان نشست به ۳۱ میلی متر رسیده و حدود ۴۰٪ افزایش یافته است. با افزایش تعداد طبقات به ۸ (۲۴ متر) و ۱۲ طبقه (۳۶ متر) میزان نشست به ترتیب به ۴۸ و ۷۰ میلی متر افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش تعداد طبقات به ۱۲ طبقه میزان نشست نسبت به زمین بکر و ساختمان ۴ طبقه به ترتیب بیش از ۳ و ۲/۲ برابر افزایش یافته است.

با فاصله گرفتن از محور مرکزی تونل میزان نشست و همچنین میزان رشد نشست با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد. به نحوی که برای ساختمان ۱۲ طبقه در فاصله ۷ متری (معادل قطر تونل) و ۲۱ متری (۳ برابر قطر تونل) میزان نشست حدود ۳۰ و ۱۰ میلی متر است که نسبت به سازه احداث شده روی محور تونل میزان نشست حدود ۵۷٪ و ۸۵٪ کاهش یافته است. شایان ذکر است در فاصله ۲۸ متری از محور مرکزی تونل تنها در سازه‌هایی با بیش از ۱۰ طبقه (۳۰ متر) نشست مشاهده می‌شود که این میزان نشست نیز بسیار ناچیز است.



شکل ۷- نشست ساختمان‌ها در اثر حفر تونل برای عرض سازه برابر ۱۰ متر در تعداد طبقات و فواصل مختلف از محور مرکزی تونل

در ادامه با ثابت نگه داشتن عرض سازه برابر ۱۵ متر (شکل ۸)، تعداد طبقات و فاصله ساختمان از محور مرکزی تونل تغییر می‌کند. بر اساس نتایج ارائه شده در این حالت



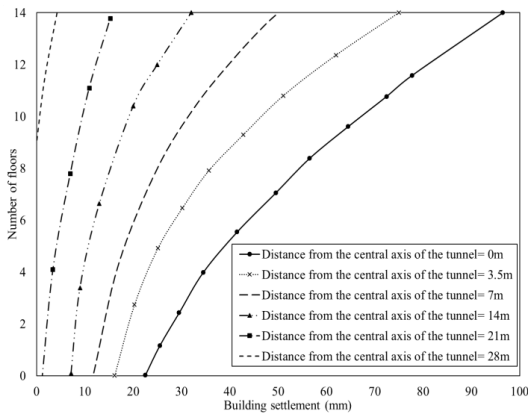
شکل ۶- جابجایی افقی سطح زمین به علت حفاری تونل در سه حالت زمین بکر، زمین با فونداسیون ساختمان و زمین با فونداسیون و ساختمان

### ۳-۲- بررسی اثر ارتفاع، عرض و فاصله سازه از محور مرکزی تونل، بر میزان نشست سطح زمین

در ابتدا با در نظر گرفتن عرض ثابت سازه به اندازه ۱۰ متر، تعداد طبقات (ارتفاع هر طبقه ۳ متر) ساختمان و فاصله ساختمان از محور مرکزی تونل تغییر داده می‌شود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷ با افزایش تعداد طبقات میزان نشست زیر سازه در اثر حفر تونل افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ارتفاع، شیب منحنی کم‌تر می‌شود و این نشان دهنده این است که با افزایش ارتفاع سازه اثر آن بر میزان نشست زیر سازه در اثر حفر تونل بیشتر می‌شود. از طرفی همانطور که انتظار می‌رود با افزایش فاصله ساختمان از محور مرکزی تونل میزان نشست به وجود آمده در زیر سازه به علت حفر تونل کاهش پیدا می‌کند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود، فاصله نمودارها با افزایش فاصله از محور مرکزی تونل کاهش پیدا می‌کند که این نشان دهنده این است که با افزایش فاصله ساختمان از محور مرکزی تونل، اثر فاصله کم‌تر می‌شود. به این صورت که در فواصل کم‌تر تغییرات میزان نشست بیشتر از فواصل زیاد است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، در حالت عدم احداث سازه میزان نشست در سطح زمین در بالای محور مرکزی تونل حدود ۲۲ میلی متر است. با افزایش فاصله از محور مرکزی به اندازه ۷ متر میزان نشست در حدود ۱۱

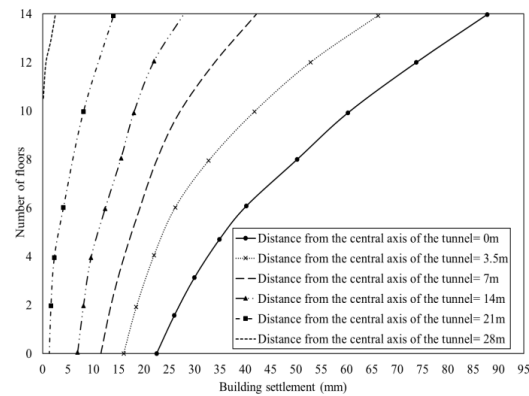
طبقات به ۱۲ طبقه میزان نشست نسبت به زمین بکر و ساختمان ۴ طبقه به ترتیب بیش از ۳/۷ و ۲/۳ برابر افزایش یافته است. برای ساختمان ۱۲ طبقه در فاصله ۷ متری (معادل قطر تونل) و ۲۱ متری (۳ برابر قطر تونل) میزان نشست حدود ۴۰ و ۱۲ میلی‌متر است، که نسبت به سازه احداث شده بر روی محور تونل میزان نشست حدود ۵۱٪ و ۸۵٪ کاهش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده، برای عرض سازه ۲۰ متری برای سازه ۱۲ طبقه روی محور مرکزی در مقایسه با عرض سازه ۱۰ متری میزان نشست حدود ۱۳/۵٪ افزایش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده برای ساختمان ۴ و ۸ طبقه احداث شده بر روی محور مرکزی میزان نشست برابر ۳۵ و ۵۵ میلی‌متر است که نسبت به عرض ۱۰ متر به ترتیب حدود ۱۳٪ و ۱۴/۵٪ افزایش یافته است.



شکل ۹- نشست ساختمان‌ها در اثر حفر تونل برای عرض سازه برابر ۲۰ متر در تعداد طبقات و فواصل مختلف از محور مرکزی تونل

در شکل ۱۰، منحنی تغییرات نشست برای عرض ۳۰ متر و تعداد طبقات مختلف ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده برای ساختمان ۴ طبقه و ۸ طبقه احداث شده بر روی محور مرکزی میزان نشست برابر ۴۱ و ۶۴ میلی‌متر است که نسبت به عرض ۱۰ متر به ترتیب حدود ۳۲٪ و ۳۳٪ افزایش یافته است. برای سازه ۱۲ طبقه در محور مرکزی میزان نشست ۹۱ میلی‌متر و در فاصله ۷ متری (معادل قطر تونل) و ۲۱ متری (۳ برابر قطر تونل) میزان نشست حدود ۵۱ و ۲۰ میلی‌متر است، که نسبت به سازه

شیب نمودارها کم‌تر از حالت عرض ثابت ۱۰ متر است و نشان دهنده نشست بیشتر در طبقات و فواصل مختلف نسبت به عرض ۱۰ متر است. بر اساس نتایج ارائه شده برای ساختمان ۴ و ۸ طبقه احداث شده بر روی محور مرکزی میزان نشست برابر ۳۲ و ۵۱ میلی‌متر است که نسبت به عرض ۱۰ متر به ترتیب حدود ۱۸٪ و ۶/۲٪ افزایش یافته است. برای سازه ۱۲ طبقه (ارتفاع ۳۶ متری) در محور مرکزی میزان نشست ۷۴ میلی‌متر و در فاصله ۱۴ و ۲۸ متری میزان نشست نسبت به محور مرکزی ۷۱٪ و ۹۸٪ کاهش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده، عرض سازه ۱۵ متری برای سازه ۱۲ طبقه روی محور مرکزی در مقایسه با عرض سازه ۱۰ متری میزان نشست حدود ۵/۷٪ افزایش یافته است، دلیل این امر افزایش وزن سازه است. نتایج مشابه برای عرض ثابت ۲۰ و ۳۰ متر در شکل ۹ و شکل ۱۰، ارائه شده است.

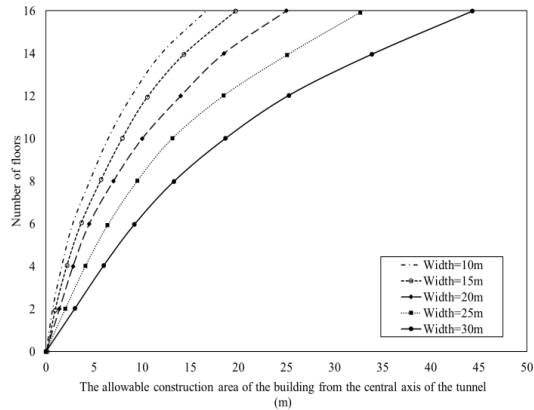


شکل ۸- نشست ساختمان‌ها در اثر حفر تونل برای عرض سازه برابر ۱۵ متر در تعداد طبقات و فواصل مختلف از محور مرکزی تونل

در شکل ۹، منحنی تغییرات نشست برای سازه با عرض ۲۰ متر و تعداد طبقات مختلف ارائه شده است. برای ساختمان احداث شده بر روی محور مرکزی تونل با افزایش تعداد طبقات به ۴ طبقه (۱۲ متر)، میزان نشست به ۳۴ میلی‌متر رسیده و نسبت به عرض ۱۰ متر حدود ۹/۶٪ افزایش یافته است. با افزایش تعداد طبقات به ۸ (۲۴ متر) و ۱۲ طبقه (۳۶ متر) میزان نشست به ترتیب به ۵۵ و ۸۱ میلی‌متر افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش تعداد



ساختمان برای عرض ۲۰ و ۳۰ متر به ترتیب نسبت به ساختمان با عرض ۱۰ متر محدوده مجاز ساخت به ترتیب ۱٫۵ و ۲٫۷ برابر افزایش یافته است.



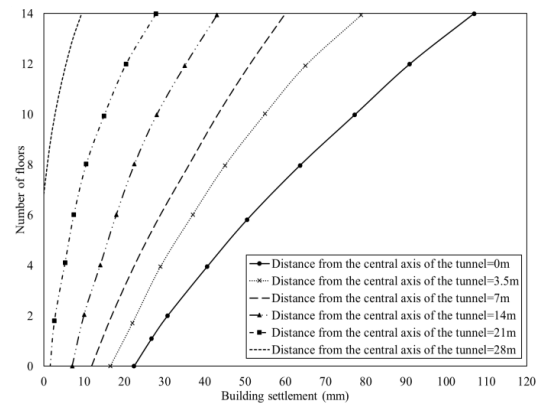
شکل ۱۱- محدوده مجاز ساخت ساختمان از محور مرکزی تونل به ازای عرض‌های مختلف و تعداد طبقات مختلف ساختمان سازه

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی محدوده مجاز ساخت و اندرکنش خاک و سازه در اثر حفر تونل با نگرش ویژه بر ارتفاع و عرض سازه پرداخته شده است. به صورت موردی تونل مترو شهر اصفهان مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته برخی از نتایج به شرح ذیل است:

۱. در اثر حفاری تونل‌ها، حداکثر نشست به وجود آمده در بالای تونل غربی و شرقی، در سطح زمین به وجود آمده و برابر ۲۰ میلی‌متر است.
۲. از آنجا که وجود فونداسیون باعث ایجاد صلبیت بیشتری می‌شود، بنابراین میزان نشست سطح زمین در حالت وجود فونداسیون کم‌تر از حالت زمین بکر است.
۳. حداکثر نشست در حالت زمین بکر، وجود فونداسیون و وجود فونداسیون و سازه به ترتیب برابر ۱٫۶۵، ۱٫۶۲ و ۲۰ میلی‌متر است. بنابراین اعمال بار سازه باعث بیشترین اختلاف نشست نسبت به حالت زمین بکر می‌شود و این مقدار برابر ۳٫۸ میلی‌متر است.
۴. با افزایش ارتفاع سازه اثر آن بر میزان نشست سازه در اثر حفر تونل بیشتر می‌شود و با افزایش فاصله ساختمان از

احداث شده بر روی محور تونل میزان نشست حدود ۰٫۴۴٪ و ۰٫۷۸٪ کاهش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده، برای سازه ۱۲ طبقه به عرض ۳۰ متر روی محور مرکزی در مقایسه با عرض سازه ۱۰ متری میزان نشست حدود ۰٫۲۳٪ افزایش یافته است.



شکل ۱۰- نشست ساختمان‌ها در اثر حفر تونل برای عرض سازه برابر ۳۰ متر در تعداد طبقات و فواصل مختلف از محور مرکزی تونل

#### ۳-۳- تعیین محدوده مجاز ساخت سازه

با توجه به مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲) جهت تعیین محدوده مجاز ساخت سازه باید نشست سازه برابر ۲۵ میلی‌متر در حالت‌های مختلف عرض و ارتفاع سازه تعیین شود. بر این اساس در شکل ۱۱، محدوده مجاز ساخت به ازای عرض‌های و ارتفاعات متفاوت از سازه ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۱، در ساختمان با عرض برابر ۱۰ متر و تعداد طبقات برابر ۴ (ارتفاع ۱۲ متر) محدوده‌ی مجاز ساخت ساختمان در حدود ۱٫۶۵ متر و با افزایش تعداد طبقات به ۸ و ۱۲ طبقه این فاصله به حدود ۴٫۵ متر و ۹ متر رسیده است و نسبت به ساختمان ۴ طبقه به ترتیب ۲٫۷۲ و ۵٫۴۵ برابر افزایش یافته است.

با افزایش عرض ساختمان و در تعداد طبقات یکسان محدوده مجاز ساخت ساختمان افزایش می‌یابد. در ساختمان با عرض ۱۰ متر و تعداد طبقات ۸، محدوده مجاز ساخت ساختمان حدود ۴٫۵ متر و در ساختمان با عرض ۲۰ و عرض ۳۰ متر این محدوده به ترتیب به ۷ و ۱۳ متر افزایش یافته است و با افزایش تعداد طبقات به ۱۲ طبقه محدوده ساخت

محور مرکزی تونل، میزان نشست به وجود آمده در زیر سازه کاهش پیدا می‌کند.

۵. به عنوان یک نتیجه کاربردی با توجه به نتایج حاصل شده و مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان محدوده مجاز

ساخت سازه در حالت‌های مختلف عرض و ارتفاع سازه به شرح جدول ۳، ارائه شده است.

#### ۵- فهرست نمادها

در جدول ۴، سیاهه‌ی نمادها نشان داده شده است.

جدول ۳- محدوده مجاز ساخت سازه از محور مرکزی تونل در عرض و تعداد طبقات مختلف سازه

Number of floor	Building width (m)				
	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
۲	۰/۹	۱	۱/۵	۲	۳
۴	۱/۵	۲	۲/۸	۴	۶
۶	۲/۷	۳/۷	۴/۵	۶/۵	۹
۸	۴/۵	۵/۵	۷	۹/۵	۱۳/۵
۱۰	۶/۵	۸	۱۰	۱۳	۱۸/۵
۱۲	۸/۵	۱۰/۵	۱۴	۱۸	۲۵/۵

جدول ۴- سیاهه‌ی نمادها

شرح	واحد	نماد
وزن مخصوص	$kN/m^2$	$\gamma$
ضریب پواسون	---	$\nu$
مدول یانگ	$kN/m^2$	$E$
چسبندگی	$kN/m^2$	$C$
زاویه اصطکاک داخلی	$^\circ$	$\phi$
زاویه اتساع خاک	$^\circ$	$\psi$
مدول برشی	$kN/m^2$	$G$
مدول حجمی	$kN/m^2$	$K$

#### ۶- مراجع

- Amiri, M., Rajabi, S., & Darabi, M. (2019). Study of the Effect of Cross-sectional Geometry of Single and Twin Tunnels on the Ground Surface Settlement (Case study: Isfahan's Metro Tunnel). *Journal of civil environmental engineering*, 49.2(95), 35-46.
- ASTM, D. (1999). *Standard test method for specific gravity of soils. Test method A Procedure for Oven-Dried Specimens.*
- ASTM, D. (2011). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM West Conshohocken.*
- Bayat, H., Hasanlourad, M., & Hasanlou, M. R. (2015). *Investigation of the Effect of Mechanized Excavation on Urban Tunnels in Surrounding Buildings and Numerical Session Control. Eighth National Congress of Civil Engineering.*
- Ghiasi, V., Esmaili, K., & Arzjani, D. (2020). *Pile-Tunnel Interaction in Subway Tunnels under Seismic*

*Loads. Journal of civil environmental engineering.*

- Hasanpour, R., Chakeri, H., Ozelik, Y., & Denek, H. (2012). Evaluation of surface Settlements in the Istanbul Metro in terms of analytical, numerical and direct measurements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 3, 499-510.
- Lambrugh, A., Rodríguez, L.M., & Castellanza, R. (2011). Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB Mechanized excavation *Computers and Geotechnics Journal*, 40, 97-113.
- Landau, L., & Lifshitz, E. (1970). *Theory of Elasticity Course of Theoretical Physics (2nd Edition ed., Vol. 7, pp. 13): Pergamon: Oxford.*
- Leca, E., & New, B., (2007). Settlements induced by tunneling in soft ground tunneling and underground space technology. (22(2)), 119-149.
- Li, P., Zou, H., Wang, F., & Xiong, H. (2020). An analytical mechanism of limit support pressure on cutting face for deep tunnels in the sand. *Computers and Geotechnics*, 119, 103372.
- Mahmutoglu, Y. (2011). Surface subsidence induced by twin subway tunneling in soft ground conditions in Istanbul. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 115-131.
- Ocak, I. (2009). Environmental effects of tunnel excavation in soft and shallow ground with EPBM: The case of Istanbul. *Environmental Earth Science*, 59, 347-352.
- Peck, R. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proc. 7th ICSMFE*, 1969, 225-290.
- trains, *The urban and subrban trains.* (2011). Isfahan.
- Vahdani, R., Fakhriyeh, H., & Gerami, M. (2019). Seismicity Acceleration Spectrum of Ground Surface under the Effects of Urban Metro Tunnels with Circular Cross Section in Alluvial Soils. *Tunneling & Underground Space Engineering* 8(1), 57-71.
- Vahdatirad, M.J., Ghodrat, H., Firuzian, S., & Barari, A. (2009). Analysis of Underground Market Settlement in Tabriz Urban Railway. *European Journal of Scientific Research*, 36(4), 595-605.
- Yu, L., Zhang, D., Fang, Q., Cao, L., Xu, T., & Li, Q. (2019). Surface settlement of subway station construction using pile-beam-arch approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90, 340-356.

## *Investigation of the effect of tunnel excavation on the surrounding structures with a superior attitude on the heights and widths of the structures; Case study: Isfahan metro tunnel*

**M. Amiri<sup>\*1</sup>; M. Ameri Siahou<sup>2</sup>; S. Ghasemi<sup>3</sup>; R. Salehian<sup>4</sup>**

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, amiri@hormozgan.ac.ir

2-MSc Student, Faculty of Engineering, Islamic Azad University of Qeshm, mehdiameri3628@gmail.com

3- PhD Student, Faculty of Engineering, Kharazmi University, s\_ghasemi\_888@yahoo.com

4- MSc Student, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, raanaslhn@gmail.com

Received: 17 Aug 2021; Accepted: 31 Oct 2021

DOI: 10.22044/tuse.2021.10517.1412

---

### **Keywords**

**Tunnel**  
**Structural height**  
**Width of structure**  
**Allowable settlement**  
**Underground space**  
**Instrumentation**

---

### **Extended Abstract**

#### **Summary**

In constructing urban underground structures, tunnels passing through subsurface structures is inevitable. Before drilling, the prediction, and control of deformations, especially surface land meetings, should always be considered. According to the analysis, in the buildings with the width of 10 meters and the number of floors 4 (height of 12 meters), the permissible area of construction of the adjacent structure is about 1.65 meters. With increasing the number of floors to 8 and 12, this distance reaches to about 4.5 and 9 meters in which, compared to the 4-story building, show an increase of 2.72 and 5.45 times, respectively. By increasing the number of floors to 12, the permissible range of construction for the widths of 20 and 30 meters increases to 1.5 and 2.7 times, compared to the building with the width of 10 meters, respectively. The obtained results can be used for similar areas in terms of the characteristics of the construction site and the specifications of the tunnel. In this paper, the effect of tunnel excavation on the settlement of buildings adjacent to the tunnel with a particular attitude on the height and width of the structure has been investigated. In this regard, Isfahan metro tunnel is considered as a case, and FLAC2D software is used for modeling in this case. Moreover, in this paper, the range of Azadi Square station to Sheikh Kolayni station and the information of buildings in the area are considered, and the effect of width and height of structures around the tunnel on the amount of ground surface settlement due to tunnel excavation is investigated. To determine the geotechnical characteristics of the study area, geotechnical studies have been carried out in three regions, and the results have been evaluated using the adjacent structure meeting instrument within 90 days.

### **Introduction**

In recent years, tunnel excavation and construction have been recognized as one of the most important issues to reduce traffic congestion in urban areas (Yu et al., 2019). However, tunnel construction may cause ground movement, which can have a negative impact on the adjacent ground and underground structures and cause the destruction of surrounding structures (Li et al., 2020).

According to the seventh topic of national building regulations, the permissible settlement in the use of strip foundations for sandy and granular soils is equal to 25 mm. To determine the allowable scope of construction of the structure, the appropriate distance for the meeting of the structure should be determined equal to 25 mm in different conditions of the width and height of the structure. Construction of buildings around the tunnel is inevitable. On the other hand, a safe distance for constructing structures around tunnels has not been provided in specific research.

---

Therefore, in this study, an attempt has been made to determine the minimum distance required to construct structures around the tunnel. Therefore, the purpose of this paper is to present a standard curve for the proper distance of construction of the adjacent tunnel structure based on the width and height of the structure. Accordingly, the effect of width and height of the structure on the interaction between structure and soil for the Isfahan metro tunnel has been investigated. Moreover, the effect of the construction of adjacent tunnel structures on the tunnel response has been examined. As a result, the appropriate construction distance for different dimensions of the structure has been determined.

### Methodology and Approaches

Isfahan urban light train system consists of five lines based on the studies. In the first stage, the north-south line starts from Kaveh passenger terminal and ends at Soffeh passenger terminal. This line is 12.5 km, in which about 12 km is in underground, and a total of 15 stations have been constructed. Isfahan metro tunnel comprises of two arcs, and the tunnel diameter in the middle part is 7 meters.

Isfahan metro tunnel has been implemented by TBM method, thus, the boundary conditions on each side along 33 meters (about 10 times the diameter of the tunnel) are considered in the modeling study, and the calibrated tunnel maintenance system is also considered. The number of zones used in the modeling is 2400. According to the field studies, the distance between the nearest building on the right and left sides of the tunnel center is 5 and 2.5 meters, respectively. According to the actual conditions of the case study, the hardness of foundations has been inserted into the analysis as a band. These foundations have the width of 120 cm and are located at distances of 5 meters apart.

### Results and Conclusions

The results of this investigation are briefly given in the following:

1. Due to the excavation of tunnels, the maximum settling at the top of the western and eastern tunnels and the ground level is equal to 20 mm.
2. The maximum settling in the original ground mode, foundation, and structure are 16.5, 16.2, and 20 mm, respectively. Therefore, applying the load of the structure causes the most significant difference in settling compared to the pristine ground state that is equal to 3.8 mm.
3. According to the results and the seventh topic of the national building regulations, the permissible area of construction in different modes of width and height of the structure is presented in Table 1.

**Table 1. Allowable area of construction of structures from the central axis of the tunnel in the width and number of different floors of the structure.**

Number of floors	Building width (m)				
	10	15	20	25	30
2	0.9	1	1.5	2	3
4	1.5	2	2.8	4	6
6	2.7	3.7	4.5	6.5	9
8	4.5	5.5	7	9.5	13.5
10	6.5	8	10	13	18.5
12	8.5	10.5	14	18	25.5