

مطالعه‌ی تاثیر وزن و هندسه‌ی ساختمان بر نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی مرحله‌ای با استفاده از روش عددی اجزای محدود

فرشاد کولیوند^{۱*}؛ مصطفی شریف‌زاده^۲

۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ گروه معدن؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ دانشگاه لرستان
۲- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۴/۲۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

چکیده	واژگان کلیدی
<p>با توجه به مشکلات ترافیکی شهرهای بزرگ، نیاز به ساخت تونل‌های شهری اجتناب‌ناپذیر است. حفر تونل سبب تغییر میدان تنش برجا شده و یک ناحیه‌ی تغییر مکان در محدوده‌ی اطراف تونل بوجود می‌آورد. در این خصوص نه تنها ساختمان‌های مجاور تحت تاثیر حفاری تونل قرار می‌گیرند؛ بلکه میدان تنش و تغییر مکان حاصله، متاثر از مشخصات ساختمان‌های مجاور خواهد بود. این موضوع یکی از جنبه‌های مهم تونلسازی محیط شهری است. بنابراین لازم است پیش از مرحله‌ی ساخت، پارامترهای موثر بر این رابطه‌ی متقابل بررسی شود. در این پژوهش فاکتورهای اصلی ساختمان نظیر وزن، عرض و طول آن، با استفاده از روش اجزا محدود بصورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد، حضور ساختمان‌های سطحی اثرات دوگانه‌ای بر گودی نشست سطح زمین دارند. افزایش وزن ساختمان موجب افزایش نشست سطح زمین شده و از طرفی، صرف نظر از وزن ساختمان، بواسطه‌ی وجود پی ساختمان و صلبیت ناشی از آن، که موجب بهبود شرایط زمین می‌شود، نشست در سطح زمین نسبت به شرایط بدون وجود ساختمان، کاهش می‌یابد. افزایش عرض ساختمان منجر به کاهش نشست در سطح زمین شده و افزایش طول ساختمان، نشست در سطح زمین را افزایش می‌دهد. هر چند عرض ساختمان فاکتور موثرتری نسبت به طول ساختمان در مهار رفتار متقابل ساختمان-تونل است.</p>	<p>تونلسازی مرحله‌ای تونل‌های صدر-نیایش اجزای محدود اندرکنش ساختمان-تونل نشست سطح زمین وزن ساختمان هندسه‌ی ساختمان</p>

وجود یا عدم وجود ساختمان‌های سطحی یا زیرسطحی، الگوی ترتیب مراحل حفاری در روش‌های ساخت چندمرحله‌ای، هندسه و عمق تونل، عوامل اجرایی و شرایط آب زیرزمینی، همگی از عواملی هستند که بر نشست سطح زمین در حین ساخت تونل تاثیر دارند. تونلسازی باعث ایجاد تغییر شکل‌هایی در ساختمان‌های سطحی و زیرسطحی شده، از طرفی وجود این ساختمان‌ها نیز بر جابجایی‌های زمین در اثر تونلسازی تاثیرگذار هستند؛ از این‌رو بررسی و برآورد اثر متقابل تونلسازی و سازه‌های سطحی، از لحاظ

۱- پیشگفتار

به دلیل افزایش روزافزون جمعیت، نیاز به احداث سازه‌های سطحی و زیرسطحی و حفر تونل‌های حمل و نقل شهری برای تامین زیرساخت‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. بطور کلی حفر تونل و دیگر سازه‌های زیرزمینی منجر به حذف توده‌ای از خاک و سنگ در محل و بروز تغییرات قابل توجه در وضعیت تنش محیط اطراف آن‌ها می‌شود [1]. عوامل متعددی بر جابجایی‌های زمین، در اثر ساخت تونل تاثیرگذار هستند. شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، روش تونلسازی،

* لرستان؛ خرم‌آباد؛ کیلومتر ۵ جاده‌ی تهران؛ دانشگاه لرستان؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی؛ گروه معدن؛ کدپستی: ۴۴۳۱۶-۶۸۱۵۱؛ صندوق پستی: ۴۶۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۷۶۰۳۳۲-۰۶۶۱؛ رایانامه: far.koli@yahoo.com

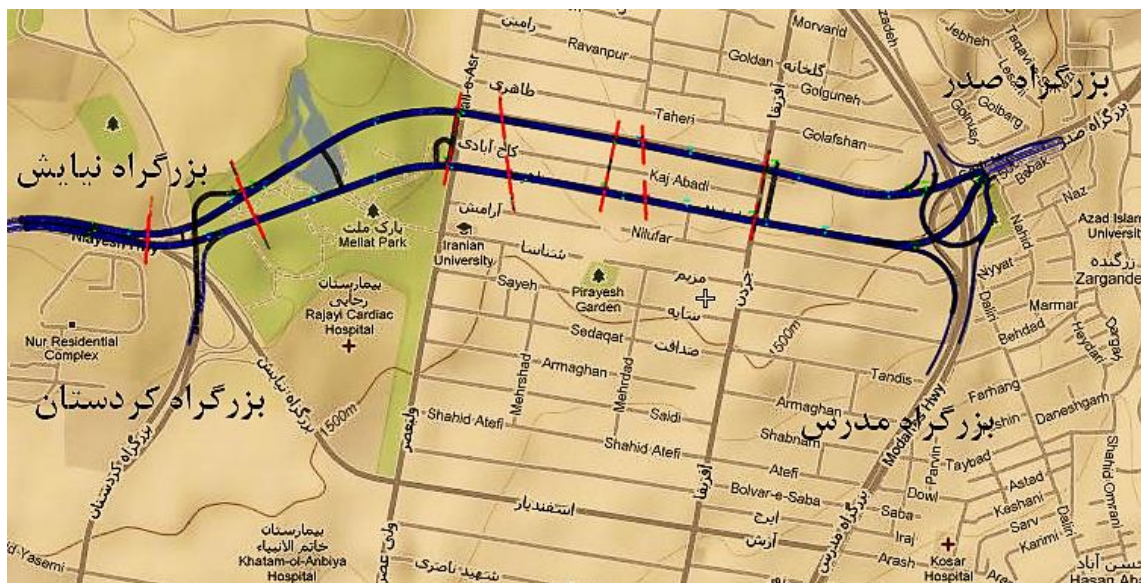
تاثیری که وجود سازه‌های سطحی بر نشست حاصل از تونلسازی دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [2]. از چند دهه‌ی گذشته تاکنون محققین متعددی مانند کاتزنباخ و برث (Katzenbach & Breth)، دساری (Desari) و همکاران، تانگ (Tang) و همکاران، ورمر (Vermeer) و همکاران، لی و رو (Lee & Rowe)، آوگارد (Augarde) و همکاران، بورد (Burd) و همکاران، گودز و سانتوس پیرا (Guedes & Santos Pereira)، لی و انجی (Lee & Ng)، کومیا (Komiya) و همکاران، دیاس (Dias)، فرانزیوس (Franzius)، آناگنوستو (Anagnostou) و دیموک (Dimmock) و همکاران مطالعات فراوانی در مورد نشست ناشی از تونلسازی در محیط شهری و عوامل موثر بر آن انجام داده‌اند. اکثر محققین با تمرکز بر عواملی از قبیل نوع خاک، خصوصیات زمین‌شناسی، شرایط تنش اولیه، تاثیر ضریب فشار جانبی (K_0)، آنیزوتروپی خاک و روش تونلسازی، بیش‌تر در ارزیابی تاثیر حفاری تونل بر آسیب‌های وارده بر ساختمان تلاش نموده و کمتر به بررسی تاثیر وجود ساختمان‌ها و عوامل مرتبط با آن بر منحنی نشست سطح زمین پرداخته‌اند [2] تا [16]. به همین علت در این مقاله، تاثیر هندسه و وزن ساختمان بر منحنی‌های نشست سطح زمین در اثر حفر تونل، بررسی شده است. بدین منظور از روش عددی اجزا محدود و کد محاسباتی PLAXIS 3D

Tunnel استفاده شده است.

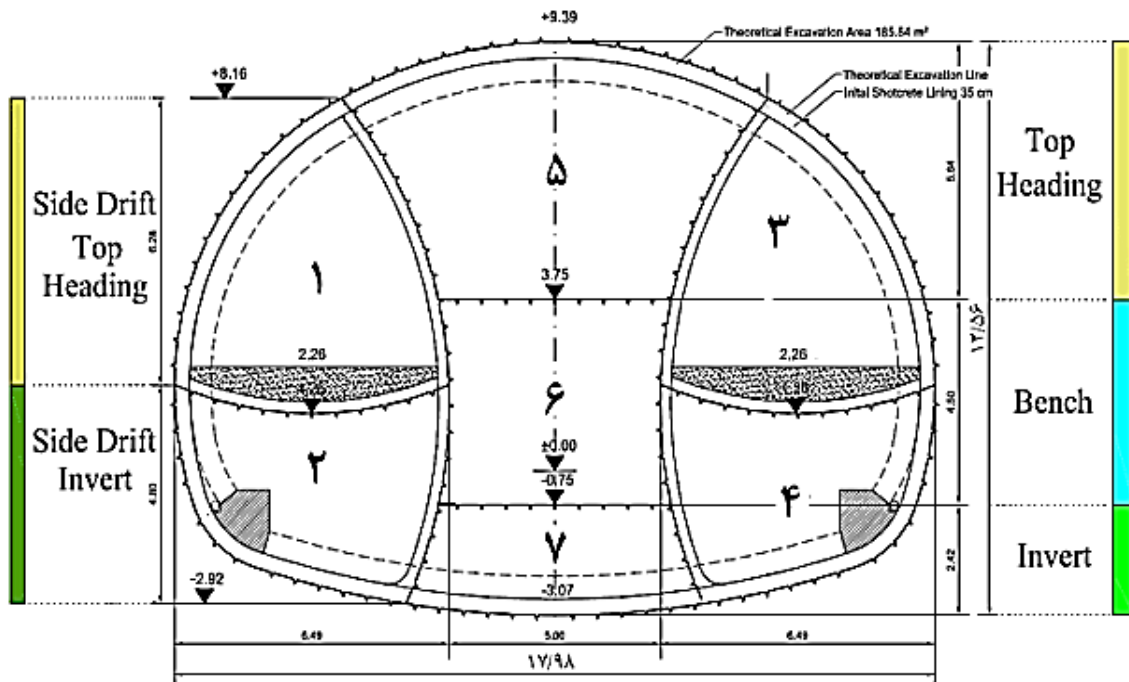
در این پژوهش پس از معرفی پروژه و تشریح خصوصیات زمین‌شناسی، عوامل ژئوتکنیکی و نحوه‌ی حفاری تونل، به ارزیابی تاثیر وزن ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه، بر منحنی‌های نشست و جابجایی افقی سطح زمین پرداخته شده است. در ادامه تاثیر هندسه‌ی ساختمان بر منحنی‌های نشست سطح زمین، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- معرفی پروژه صدر- نیایش و شرایط ژئوتکنیکی ساختگاه

پروژه‌ی تونل‌های صدر- نیایش در مسیر غرب-شرق، بزرگراه‌های صدر و نیایش با دو تونل رفت و برگشت به طول ۵۲۶۵ متر و عرض ۱۶ متر بهم وصل می‌شود (شکل ۱). مقطع اصلی تونل‌ها دارای عرض حفاری ۱۸ متر و ارتفاع ۱۲٫۵ متر است و در عمق ۱۵ متری زیر سطح زمین قرار گرفته است. با توجه به سطح مقطع بزرگ و خصوصیات لایه‌های مختلف خاکی، تونل با استفاده از روش گالری‌های کناری یا شاخ‌بزی (Sidewall Drift) حفاری می‌شود. هر کدام از گالری‌های کناری، در دو مرحله‌ی پیشانی و کف، و گالری میانی در سه مرحله‌ی پیشانی، پله و کف (در مجموع ۷ مرحله) حفاری می‌شود (شکل ۲) و [۱۷].



شکل ۱- نقشه‌ی مسیر پروژه



شکل ۲- مقطع تونل و ترتیب مراحل حفاری

عبارت دیگر حرکت مرزهای کناری در جهت افقی محدود شده و فقط اجزای جابجایی در جهت عمودی وجود دارد. مرز بالایی نیز آزاد بوده و حرکات مرز پایینی در تمام جهات محدود شده است (شکل ۳). رفتار خاک نیز با مدل خاک سخت‌شونده مدل شده است.

جدول ۱- خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاکی استفاده شده برای مدل‌سازی [۱۷]

پارامتر	واحد	مقدار
h	m	$0-15$
φ	$Degree$	34
θ	-	0.2
C	kPa	30
E_{od}	(kN/m^2)	9.423×10^4
E_{sec}	(kN/m^2)	8.077×10^4
E_{ul}	(kN/m^2)	2.827×10^5
G_{sat}	(kN/m^2)	17
G_d	(kN/m^2)	16

برای پوشش تونل از المان‌های صفحه‌ای با ضخامت 0.35 و 0.25 متر به ترتیب برای پوشش دیواره‌ی نهایی و

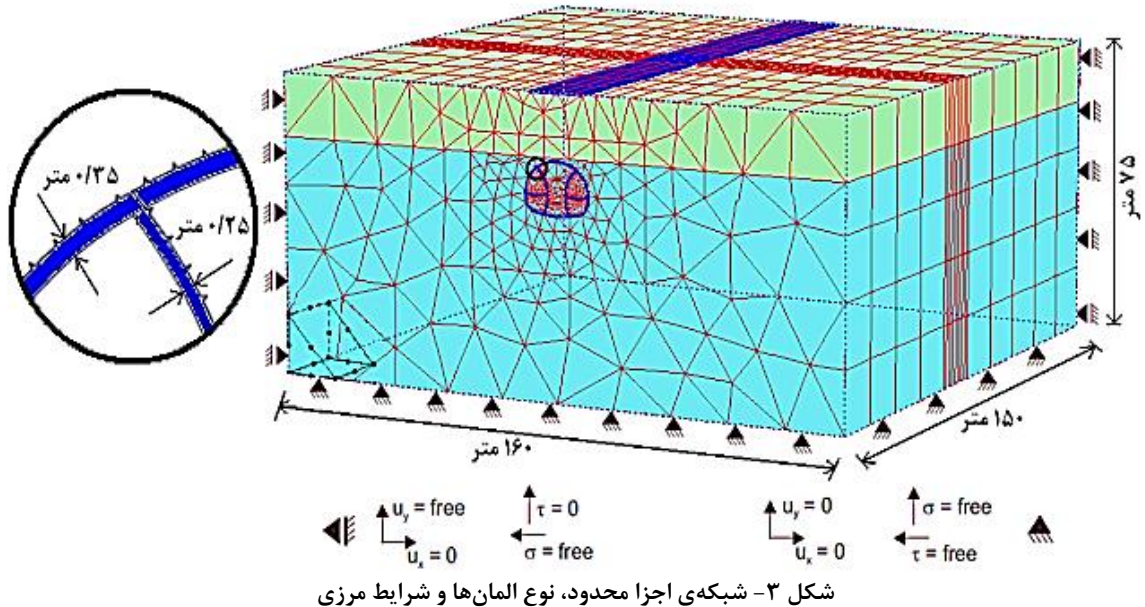
برای شناسایی لایه‌بندی زمین‌شناسی، مشخصات ژئوتکنیکی، ارزیابی سطح آب زیرزمینی و شرایط لایه‌های زیرسطحی، در مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده تعداد ۲۰ گمانه با عمق ۲۵ تا ۴۵ متر و ۲۴ چاهک به عمق ۱۰ تا ۳۰ متر حفاری شده و آزمایش‌های نفوذ مخروط استاندارد (SPT)، پرسومتر، چگالی برجا، بارگذاری صفحه و برش مستقیم انجام شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، خاک منطقه از شن ماسه‌ای متراکم و ماسه‌های متراکم حاوی سیلت و رس تشکیل شده است (GC, GM, SC, SM). بر اساس تقسیم‌بندی ترازقی، خاک‌های ریزدانه، در محدوده‌ی خاک‌های بسیار سخت و خاک‌های درشت دانه در محدوده‌ی خاک‌های خیلی متراکم قرار می‌گیرند. خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک در جدول ۱ آورده شده است [۱۷].

۳- مدل اجزای محدود محیط تونل

برای مدل‌سازی این مسئله یک شبکه‌ی اجزا محدود سه‌بعدی با استفاده از المان‌های ایزوپارامتریک ۱۵ گرهی، دارای عرض ۱۶۰ و ارتفاع ۷۵ متر بکار گرفته شده است. این مدل در جهت طولی به اندازه‌ی ۱۵۰ متر امتداد یافته است. همچنین در مرزها از شرایط استاندارد استفاده شده است. به

قسمت‌های مختلف تونل با غیر فعال کردن المان‌های خاک آن قسمت، مدل‌سازی و با فعال کردن المان‌های تعریف شده برای پوشش، سامانه‌ی نگهداری تونل مدل‌سازی می‌شود.

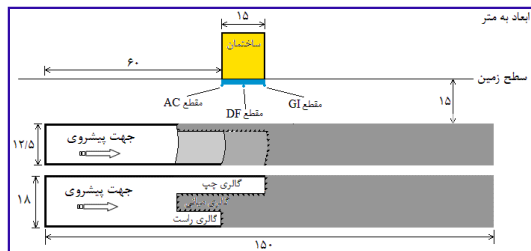
پوشش دیواره‌ی تخریبی گالری‌ها استفاده شده است (جدول ۲). دیواره‌ی تخریبی گالری‌ها پس از حفاری تمام بخش‌ها، برای حصول مقطع کامل تونل تخریب می‌شوند. حفاری



شکل ۳- شبکه‌ی اجزا محدود، نوع المان‌ها و شرایط مرزی

۴- تاثیر وزن ساختمان بر نشست

برای بررسی تاثیر وزن ساختمان‌ها بر منحنی‌های نشست، ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه را در بالای محور مرکزی تونل و در فاصله‌ی ۶۰ تا ۷۵ متری از ابتدای تونل، قرار داده و سپس تونل زیر سطح زمین حفاری شده است (شکل ۴). در این راستا ابتدا نشست سطح زمین در حالت بدون وجود ساختمان بررسی و سپس ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه مدل‌سازی شده است. پی ساختمان‌ها با مساحت مقطع ۱۵×۱۵ متر و بار گسترده‌ی ۱۰ کیلو نیوتن برای هر طبقه (معرف وزن طبقات)، در نظر گرفته شده است (جدول ۲).



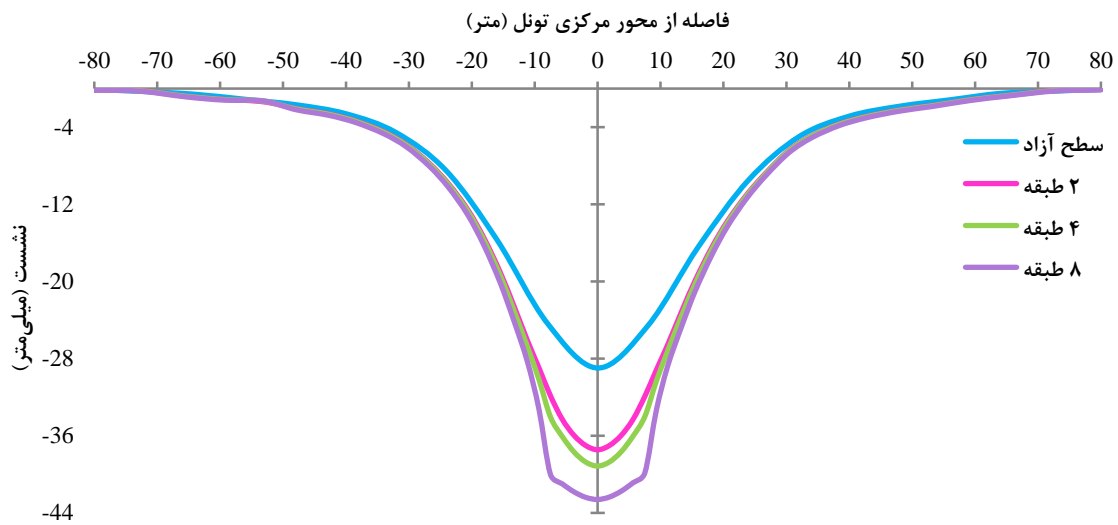
شکل ۴- مدل‌سازی ساختمان بالای محور مرکزی تونل

جدول ۲- خصوصیات و مشخصات استفاده شده برای مدل‌سازی ساختمان و پوشش تونل

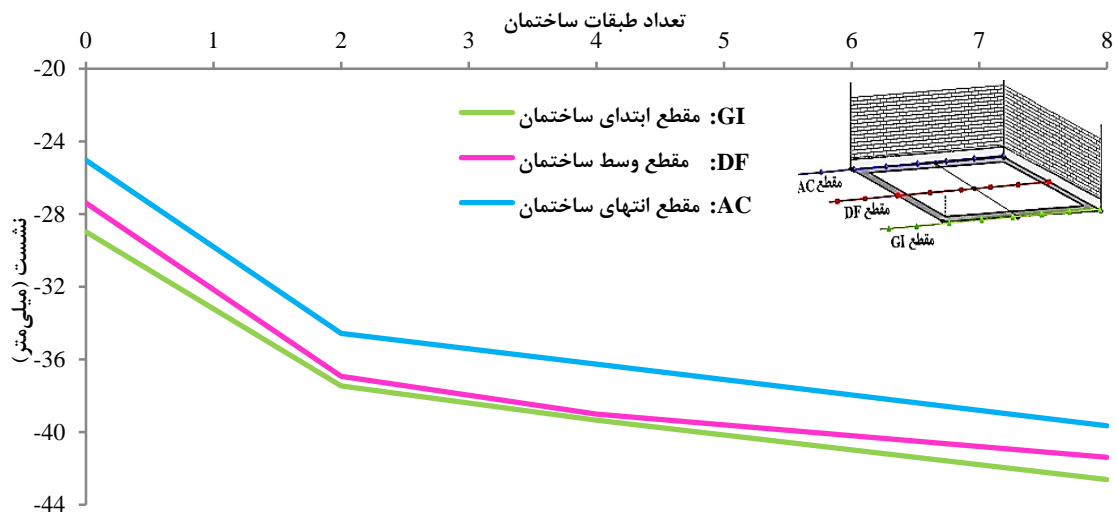
پی ساختمان			
تعداد طبقات	۲	۴	۸
d (m)	۰.۵	۰.۸	۱.۵
EA (kN/m)	۱.۰۵×10^7	۱.۶۸×10^7	۳.۱۵×10^7
EI (kNm ² /m)	۲.۱۸۷×10^5	۸.۹۶×10^5	۵.۹×10^6
W (kN)	۲۰	۴۰	۸۰
θ	۰.۲	۰.۲	۰.۲
نوع المان	کشسان	کشسان	کشسان
پوشش تونل			
نوع پوشش	پوشش اصلی	پوشش تخریبی	
d (m)	۰.۳۵	۰.۲۵	
EA (kN/m)	۷.۳۵×10^6	۵.۲۵×10^6	
EI (kNm ² /m)	۷.۵×10^4	۲.۷۳×10^4	
W_V (kN/m/m)	۷.۵	۷.۵	
θ	۰.۲	۰.۲	
نوع المان	کشسان	کشسان	

منحنی‌های نشست عرضی سطحی زمین به ازای حالت سطح آزاد و وجود ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه، در شکل ۵ نشان می‌دهد با افزایش تعداد طبقات ساختمان و در نتیجه افزایش وزن ساختمان، نشست در سطح زمین افزایش یافته است. وجود یک ساختمان ۲ طبقه، سبب افزایش نشست از حدود ۳۰ میلی‌متر در حالت سطح آزاد به ۳۷٫۵ میلی‌متر شده است. نشست در حالت ساختمان ۸ طبقه، نشست برابر با ۴۲٫۵ میلی‌متر (افزایش ۱۲٫۵

میلی‌متری) برآورد شده است. منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با طبقات مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. شیب منحنی تغییرات نشست ثابت است و به ازای افزایش یک مقدار ثابت به وزن سازه، نشست نیز بصورت متناسب با وزن، زیاد می‌شود. بدین معنی که برای یک ساختمان ۵ طبقه نیز می‌توان از روی این منحنی میزان نشست را پیش‌بینی نمود. منظور از ساختمان صفر طبقه، همان حالت سطح آزاد (بدون حضور سازه) است.



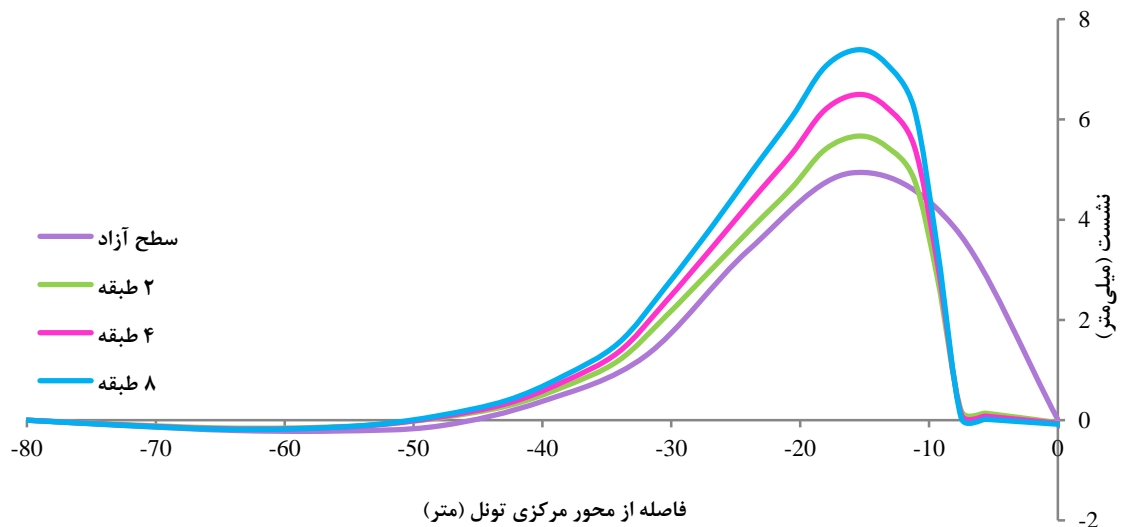
شکل ۵- منحنی‌های نشست نهایی سطح زمین به ازای ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه



شکل ۶- منحنی تغییرات نشست به ازای ساختمان‌های با تعداد طبقات مختلف

مقادیر جابجایی کل، گشتاور خمشی، نیروی محوری و برشی ایجاد شده در مقاطع ابتدا (AC)، وسط (DF) و انتهای (GI) پی ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه در جدول ۳ ارائه شده است. با افزایش تعداد طبقات ساختمان جابجایی کل، گشتاور خمشی، نیروی محوری و برشی در پی ساختمان‌ها افزایش یافته است. این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش وزن ساختمان دانست.

منحنی‌های جابجایی‌های افقی سطح زمین در شکل ۷ نشان داده شده است. مشخص است که متناسب با افزایش وزن ساختمان، جابجایی‌های افقی افزایش یافته و فرم منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین در خارج از محدوده‌ی پی ساختمان از منحنی جابجایی افقی در حالت سطح آزاد پیروی می‌نمایند. در محدوده‌ی پی به سبب صلبیت آن، جابجایی‌ها تا حد زیادی به صفر نزدیک شده‌اند.



شکل ۷- منحنی‌های جابجایی‌های افقی سطح زمین برای ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه

جدول ۳- مقادیر حداکثر جابجایی کل، گشتاور خمشی، نیروی محوری و برشی در پی ساختمان‌های ۲، ۴ و ۸ طبقه

حداکثر گشتاور خمشی (kN/m)			حداکثر جابجایی کل (mm)			تعداد طبقات
مقاطع			مقاطع			
GI	DF	AC	GI	DF	AC	
-۴۸,۲۷	-۵۶,۵۸	-۴۶,۲۹	۳۴,۵۶	۳۶,۹۲	۳۷,۴۵	۲
-۱۳۲,۳۸	-۱۳۳,۳۲	-۱۲۲,۳۴	۳۶,۲۵۲	۳۹,۰۱	۳۹,۳۴	۴
-۴۶۸,۳۶	-۴۳۵,۴۷	-۴۴۲,۸۲	۳۹,۶۴	۴۱,۳۹	۴۲,۶۱	۸
حداکثر نیروی برشی ($kN.m$)			حداکثر نیروی محوری ($kN.m$)			تعداد طبقات
مقاطع			مقاطع			
GI	DF	AC	GI	DF	AC	
۲۴,۷۰	۱۹,۷۰	۴۱,۱۵	-۳۳۶,۸۶	-۲۹۴,۲۲	-۳۴۴,۵۰	۲
-۲۷,۸۵	۲۰,۴۳	-۴۷,۵۴	-۳۵۶,۶۴	-۳۰۸,۴۹	-۳۶۱,۹۳	۴
-۳۲,۴۱	۲۱,۲۵	۵۶,۱۵	-۳۸۵,۵۹	-۳۲۸,۹۰	-۳۹۰,۸۸	۸

نشست و جابجایی زمین، ساختمان‌هایی با طول‌ها و عرض‌های مختلف در بالای محور مرکزی تونل مدلسازی و

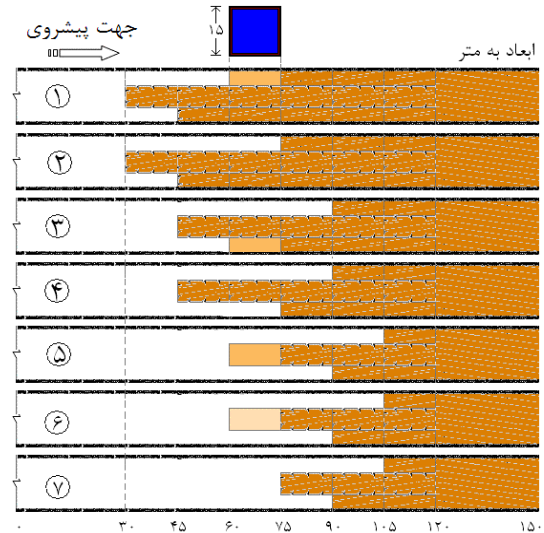
۵- تاثیر هندسه‌ی ساختمان بر نشست
به منظور بررسی تاثیر هندسه‌ی ساختمان‌ها بر منحنی‌های

۵-۱- تاثیر عرض ساختمان

در این قسمت ساختمان ۴ طبقه به طول ۱۵ متر و با عرض‌های ۱۰، ۲۰، ۳۵، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ متری در مقطع ۷۵-۶۰ متری طول تونل و بالای محور مرکزی مدلسازی شده است. در منحنی‌های نشست سطح زمین (شکل ۹)، مشخص است که کمترین نشست مربوط به ساختمان ۱۰۰ متری و بیش‌ترین نشست مربوط به ساختمان ۱۰ متری است. این بدان معناست که افزایش عرض پی ساختمان و در نتیجه افزایش صلبیت محدوده‌ی بیش‌تری از عرض سطح زمین بالای تونل، موجب کاهش نشست‌ها در سطح زمین می‌شود. در ساختمان‌های با عرض ۷۰ و ۱۰۰ متر، نشست سطح زمین، کمتر از حالت سطح آزاد است. این موضوع را می‌توان ناشی از گسترده شدن پی ساختمان و افزایش سختی زمین دانست. همچنین از عرض ۷۰ متر به بعد، تاثیر افزایش عرض ساختمان در کاهش نشست، کاهش یافته و شیب نمودار تغییرات نشست کمتر شده است (شکل ۱۰).

منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین با ساختمان‌های با عرض‌های مختلف (شکل ۱۱)، در نقاط خارج از محدوده‌ی پی از حالت سطح آزاد تبعیت نموده و در محدوده‌ی پی، صلبیت آن سبب کاهش جابجایی‌های افقی در سطح زمین می‌شود. همچنین افزایش عرض پی ساختمان، موجب کاهش جابجایی‌های افقی شده است.

نتایج منحنی‌های نشست و جابجایی افقی سطح زمین بررسی شده است. مراحل حفاری قسمت‌های مختلف هنگام عبور از زیر ساختمان در شکل ۸ آورده شده است.



مراحل ۱ و ۲:

عبور پیشانی و کف گالری سمت چپ از زیر ساختمان

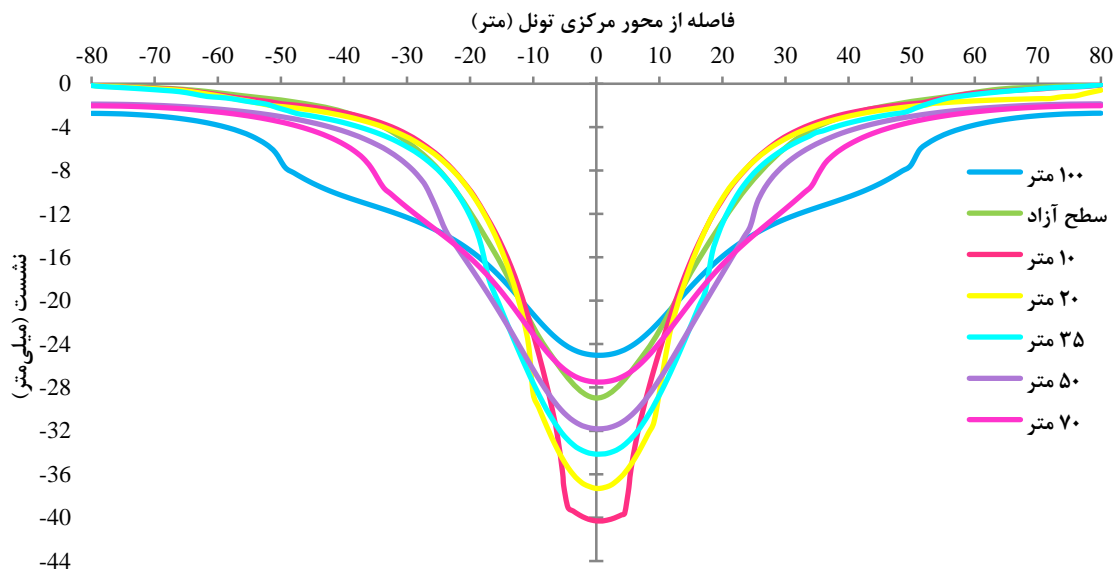
مراحل ۳ و ۴:

عبور پیشانی و کف گالری سمت راست از زیر ساختمان

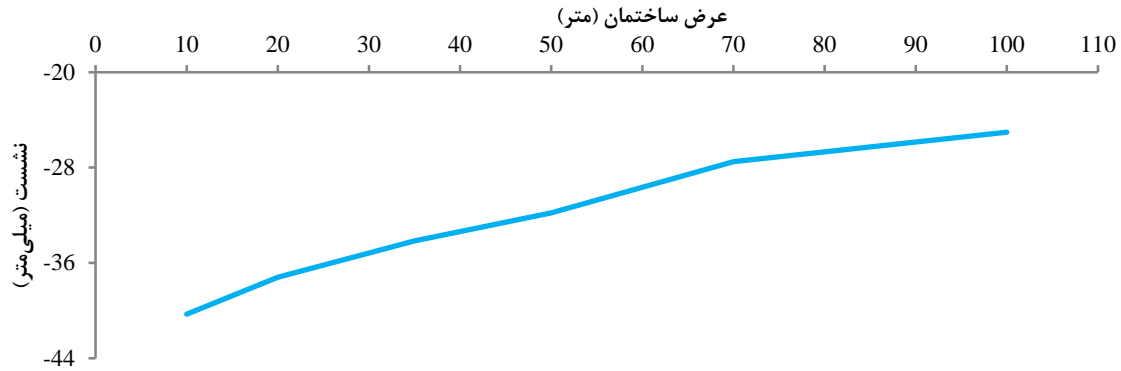
مراحل ۵، ۶ و ۷:

عبور پیشانی، پله و کف گالری میانی از زیر ساختمان

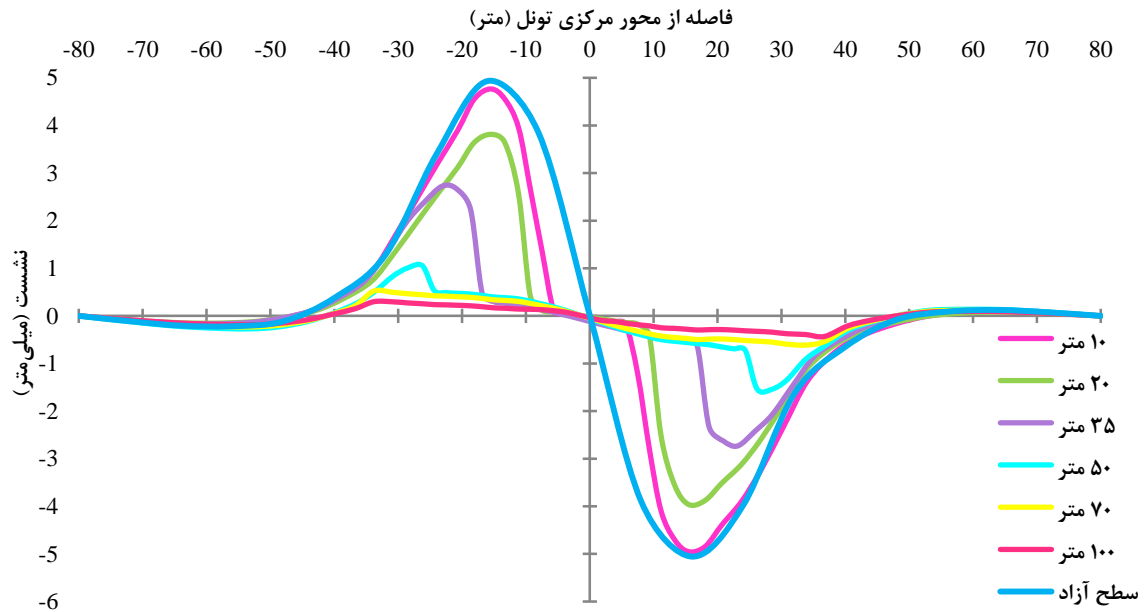
شکل ۸- مراحل عبور قسمت‌های تونل از زیر ساختمان



شکل ۹- منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین برای ساختمان‌های با عرض‌های مختلف (۴ طبقه)



شکل ۱۰- تغییرات نشست به ازای افزایش عرض ساختمان (۴ طبقه)

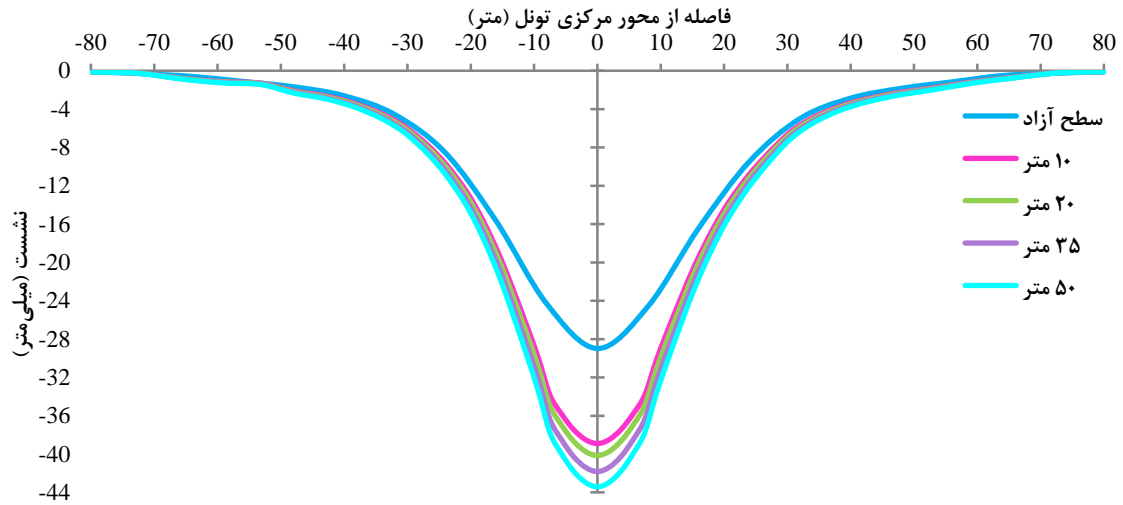


شکل ۱۱- منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های با عرض‌های متفاوت (۴ طبقه)

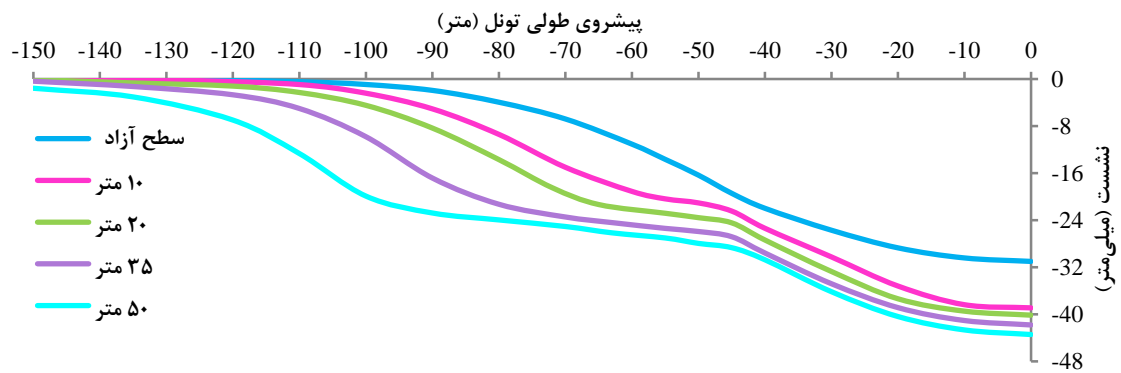
شکل ۱۳ منحنی‌های نشست طولی هنگامی که ابتدای ساختمان در مقطع ۴۵ متری طول تونل قرار گرفته و جبهه‌کار گالری میانی ۱۵ متر از مقطع انتهایی ساختمان عبور نموده است، را نشان می‌دهند. این شکل نیز افزایش میزان نشست‌ها با افزایش طول ساختمان را نشان می‌دهد. منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های با طول‌های مختلف (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که در نقاطی که پی وجود ندارد، منحنی‌های جابجایی افقی تقریباً از منحنی حالت سطح آزاد پیروی نموده و در مقاطعی که پی وجود دارد، صلبیت پی، سبب کاهش جابجایی افقی می‌شود.

۵-۲- تاثیر طول ساختمان

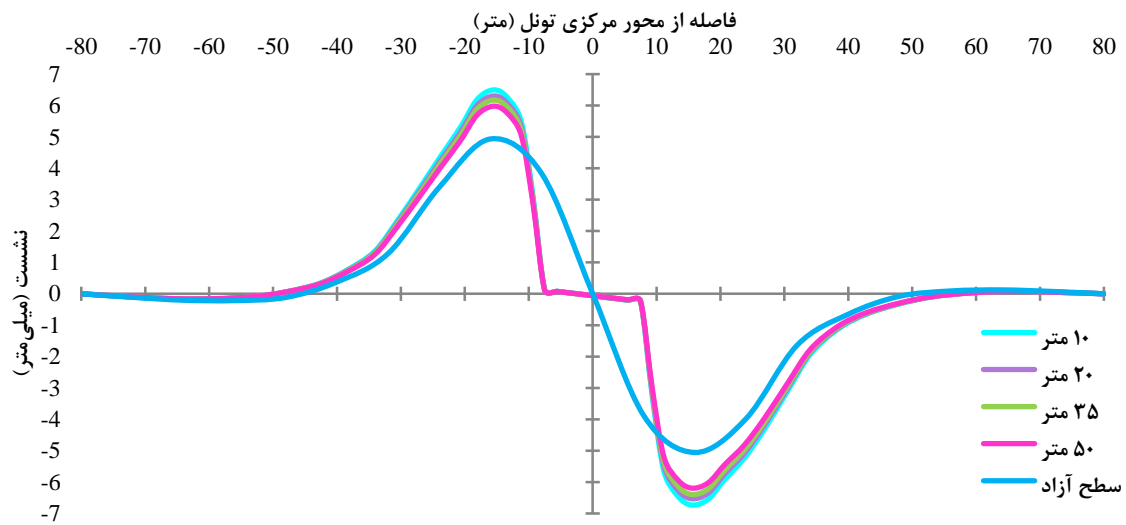
در این قسمت ساختمان ۴ طبقه با عرض ۱۵ متر و طول‌های ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ متری در بالای محور مرکزی تونل مدلسازی و تاثیر طول ساختمان بر منحنی‌های نشست و جابجایی افقی سطح زمین بررسی شده است. منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین برای ساختمان‌های با طول‌های مختلف (شکل ۱۲) نشان می‌دهد با افزایش طول ساختمان نشست‌ها افزایش یافته، هرچند که مقدار آن کم بوده و تاثیر افزایش طول ساختمان بر نشست سطح زمین، کمتر از تاثیر افزایش عرض ساختمان است.



شکل ۱۲- منحنی‌های نشست عرضی سطح زمین برای ساختمان‌های با طول‌های مختلف (۴ طبقه)



شکل ۱۳- منحنی‌های نشست طولی سطح زمین برای ساختمان‌های با طول‌های مختلف (۴ طبقه)



شکل ۱۴- منحنی‌های جابجایی افقی سطح زمین برای ساختمان‌های با طول‌های متفاوت (۴ طبقه)

۶- نتیجه‌گیری

در مورد هندسه‌ی ساختمان، افزایش عرض ساختمان موجب کاهش نشست‌ها در سطح زمین می‌شود. در ساختمان‌های ۷۰ و ۱۰۰ متری، نشست کمتر از نشست حالت سطح آزاد است. این موضوع ناشی از گسترده شدن پی ساختمان و افزایش سختی زمین است. در عرض‌های بیش‌تر از ۷۰ متر، تاثیر افزایش عرض ساختمان در کاهش نشست، کاهش یافته و شیب نمودار تغییرات نشست کمتر شده است. همچنین افزایش عرض پی ساختمان، موجب کاهش جابجایی‌های افقی سطح زمین شده و منحنی‌های جابجایی افقی در نقاط خارج از محدوده‌ی پی، از حالت سطح آزاد تبعیت می‌کند. در محدوده‌ی پی، صلبیت آن سبب کاهش جابجایی‌های افقی در سطح می‌شود. طول ساختمان نیز تاثیر کمتری نسبت به عرض ساختمان بر نیرخ نشست عرضی سطح زمین دارد. جابجایی افقی سطح زمین نیز با افزایش طول ساختمان تغییر چندانی ندارد.

در این پژوهش تاثیر هندسه و وزن ساختمان بر نشست سطح زمین، که در مطالعات پیشین محققین، کمتر مورد توجه قرار گرفته بود، بررسی و ارزیابی شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد افزایش تعداد طبقات ساختمان و در نتیجه افزایش وزن آن باعث افزایش نشست در سطح زمین می‌شود. همچنین شیب منحنی تغییرات نشست به ازای وزن ساختمان، ثابت است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این است که به ازای افزایش یک مقدار ثابت به وزن سازه، نشست نیز بصورت متناسب با آن زیاد می‌شود و تاثیر وزن ساختمان‌ها بر منحنی جابجایی‌های افقی سطح زمین بسیار کم است. با افزایش تعداد طبقات ساختمان جابجایی کل، گشتاور خمشی، نیروی محوری و برشی در پی ساختمان‌ها افزایش یافته است. این موضوع را می‌توان ناشی از افزایش وزن ساختمان دانست.

۷- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
h	m	عمق	φ	$Degree$	زاویه‌ی اصطکاک داخلی
θ	-	ضریب پواسون	C	kPa	چسبندگی
E_{od}	kN/m^2	مدول کشسانی ادمتری	E_{sec}	kN/m^2	مدول کشسانی سکانتی
E_{ul}	kN/m^2	مدول کشسانی باربرداری	G_{sat}	kN/m^2	وزن مخصوص اشباع
G_d	kN/m^2	وزن مخصوص خشک	d	m	ضخامت معادل
EA	kN/m	سختی محوری	El	kNm^2/m	سختی خمشی
W	kN	وزن طبقات	W_V	$kN/m/m$	وزن حجمی

۸- منابع‌ها

- [1] Attewell, P. B., Yeates, J., & Selby, A. R. (1986). *Soil Movements Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures*. Blackie. ISBN: 0412009110.
- [2] Franzius, J. N. (2003). *Behaviour of Buildings due to Tunnel Induced Subsidence*. London: Doctoral Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine. <https://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/985903.PDF>.
- [3] Katzenbach, R., & Breth, H. (1981). Nonlinear 3D Analysis for NATM in Frankfurt Clay. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 315-318). Rotterdam: Balkema. ISBN: 9061912105.
- [4] Desari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton, M. D. (1996). Numerical Modelling of a NATM Tunnel Construction in London Clay. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at London* (pp. 491-496). Rotterdam: Balkema. ISBN: 9054108568.

- [5] Tang, D. K. W., Lee, K. M., & Ng, C. W. W. (2000). Stress Paths around a 3-D Numerically Simulated NATM Tunnel in Stiff Clay. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at Tokyo* (pp. 443-449). Rotterdam: Balkema. ISBN: 9058091066.
- [6] Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., & Maoller, S. C. (2002). On a Smart Use of 3D-FEM in Tunnelling. *Proceedings of the 8th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics* (pp. 361-366). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 905809359X.
- [7] Lee, K. M., & Rowe, R. K. (1991). An Analysis of Three-Dimensional Ground Movements: The Thunder Bay Tunnel. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 25-41. <http://dx.doi.org/10.1139/t91-004>.
- [8] Augarde, C. E., Burd, H. J., & Houlsby, G. T. (1998). Some Experience of Modelling Tunneling in Soft Ground Using Three-Dimensional Finite Elements. *4th European conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering* (pp. 603-612). Springer-Verlag. ISBN: 3-211-83141-X. <http://www-civil.eng.ox.ac.uk/people/gth/c/c49.pdf>.
- [9] Burd, H. J., Houlsby, G. T., Augarde, C. E., & Liu, G. (2000). Modelling Tunnelling-Induced Settlement of Masonry Buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering: vol 143* (pp. 17-29). <http://www-civil.eng.ox.ac.uk/people/gth/j/j48.pdf>.
- [10] Guedes, P. F. M., & Santos Pereira, C. (2000). The Role of The Soil K_0 Value in Numerical Analysis of Shallow Tunnels. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at Tokyo* (pp. 379-384). Rotterdam: Balkema. ISBN: 9058091066.
- [11] Lee, G. T. K., & Ng, C. W. W. (2002). Three-Dimensional Analysis of Ground Settlements due to Tunnelling: Role of K_0 and stiffness Anisotropy. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at Lyon* (pp. 617-622). ISBN: 2-9510416-3-2.
- [12] Komiya, K., Soga, K., Akagi, H., Hagiwara, T., & Bolton, M. D. (1999). Finite Element Modelling of Excavation and Advancement Process of a Shield Tunnelling Machine. *Soil & Foundations*, 39(3), 37-52. http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new/people/bolton/mdb_pub/85_soils_found_vol39_no3_37_52.PDF.
- [13] Dias, D., Kastner, R., & Maghazi, M. (2000). Three Dimensional Simulation of Slurry Shield in Tunnelling. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground at Tokyo* (pp. 351-356). Rotterdam: Balkema. ISBN: 9058091066.
- [14] Anagnostou, G., (2007). Continuous Tunnel Excavation in a Poro-Elastoplastic Medium. *Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics: NUMOG X* (pp. 183-188). Rhodes. Taylor & Francis Group. ISSN: 9780415440271. <http://www.tunnel.ethz.ch/people/ganagnos/continous>.
- [15] Dimmock, P. S., & Mair, R. J., (2008). Effect of Building Stiffness on Tunnelling-Induced Ground Movement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(4), 438-450. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.08.001>.
- [16] Kimura, T., & Mair, R. J. (1981). Centrifugal Testing of Model Tunnels in Soft Clay. *The 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 319-322). Rotterdam: Balkema. ISBN: 9061912105.

[۱۷] شرکت پژوهش عمران راهوار. (۲۰۰۹). گزارش مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی بی پروژهی تونل ملت. گزارش شماره: SADR-SE00-REP-GEO-03-100-35

Study of the Effects of Building Weight and Geometry on the Surface Settlement due to Sequential Excavation Using Numerical Finite Element Approach

F. Kolivand¹; M. Sharifzadeh²

1- M.Sc. in Rock Mechanics; Mining Faculty; Department of Engineering; Lorestan University

2- Associate Professor; Department of Mining and Metallurgical Engineering; Amirkabir University of Technology

Received: 10 Jul 2012; Accepted: 25 Aug 2013

Keywords

Sequential excavation
Sadr-Nyayesh tunnels
Finite element
Building-tunnel interaction
Surface settlement
Building weight
Building geometry

Extended Abstract

Considering traffic congestion in mega cities, the need to construct urban tunnels is inevitable. The reciprocal effect of tunneling-induced ground settlement and surface buildings is an important factor during shallow tunneling design procedures in urban areas. Hence, the effective factors in this reciprocal relationship need to be appraised prior to the construction phase. In this paper, the major characteristics of buildings have been numerically simulated using 3D finite element approach. It

has been demonstrated that weight and length of buildings have shown parallel correlation with surface settlements. However, building width have had reverse trend with surface settlements.

Introduction

The main purpose of this research is the study of influence of building weight and geometry on the surface settlement due to sequential excavation method, and interaction between the building and tunnel. It has been investigated by simulating systematic construction process of the tunnel using finite element numerical method.

Methodology and Approaches

In this paper, the major characteristics of buildings have been numerically simulated using 3D finite element method. In addition, the results of study on the field data of the Nyayesh tunnel are presented.

Results and Conclusions

The results have proved that the existence of surface buildings has reciprocal effects on ground settlement troughs. The increase of the building weight will result in increase of surface settlements. On the contrary, by ignoring building weight, presence of surface building foundations will cause a less settlement compared to the green field condition which is due to increase of the rigidity of building foundation and thereby ground improvement. The increase of building width reduces the surface settlements, and the increase of the building length leads to more surface settlement, although the building width is a more effective parameter, which controls the overall tunneling-building interaction behavior than the building length. Thus, building weight and geometry effectively influence the surface settlements troughs in urban tunneling.