

تأثیر اثر هندسه مقطع بر روی میزان نشست زمین در اثر حفر تونل تک و دوقلو مطالعه موردی: تونل مترو اصفهان

محمد امیری^{۱*}، سعید رجبی^۲ و مهدیه دارابی^۳

^۱ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان

^۳ کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه بوعلی سینا

(دریافت: ۹۶/۸/۱۳، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۵)

چکیده

امروزه افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی مدرن، منجر به توسعه زیرساخت‌ها و اجرای تونل‌های شهری (مترو) شده است. انتخاب شکل دهانه و بررسی میزان نشست سطح زمین در حالت تونل تک و دوقلو از نکات بسیار مهم در احداث تونل متروها است. بر این اساس شکل دهانه باید به نحوی انتخاب شود که علاوه بر تأمین میزان نشست مجاز، مقاومت کافی در برابر تنش‌های وارده داشته و تغییر مکان و کرنش‌های برشی ایجاد شده در محدوده مجاز باشد. هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر هندسه مقطع تونل بر میزان نشست سطح زمین در حالت تونل تک و دوقلو با نگرش ویژه به مترو شهر اصفهان است. با توجه به این که خاک، یک محیط ناپیوسته متشکل از ذرات با اندازه‌های مختلف است، در این مطالعه از نرم‌افزار نفاصل محدود FLAC2D جهت مدل‌سازی تونل استفاده شده است. در این راستا ابتدا تونل مترو شهر اصفهان با سه هندسه مختلف مدل شده و با توجه به پلان مسیر، فاصله تونل‌ها در چهار حالت مورد بررسی قرار گرفته است. جهت اعتبار بخشی به نتایج نشست به دست آمده در این مطالعه، در سه نقطه تونل غربی میزان نشست با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد 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 ۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها به بیش از سه برابر قطر تونل‌ها (۲۰ متر)، تغییرات میزان نشست تقریباً ثابت می‌شود.

کلیدواژه‌ها: هندسه مقطع، نشست، مترو اصفهان، تونل دوقلو.

۱- مقدمه

طراحی تونل نیازمند برآورد مناسبی از تغییر شکل‌های زمین است و بر حسب روش حفاری و نوع نگهداری می‌تواند باعث نشست‌هایی با مقادیر مختلف شود (Kasper و Meschke، ۲۰۰۶). Havaej و همکاران (۲۰۰۴)، در مطالعات خود برخی از پارامترهایی که بر میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در محیط خاکی و نرم مؤثرند را معرفی کرده‌اند. رویکردهای مختلفی از جمله روش‌های تجربی، تحلیلی، عددی و هوشمند برای تخمین جابجایی‌های زمین استفاده می‌شوند. با استفاده از این روش‌ها محققین مختلف، راه‌حلی را برای تخمین نشست ارائه کرده‌اند (Shahrou و Mroueh، ۲۰۰۸؛ Loganathan و Poulos، ۱۹۹۸؛ Fang و همکاران، ۲۰۱۶).

در محیط‌های شهری، مهم‌ترین معضلی که به هنگام حفاری سازه‌های زیرزمینی با آن برخورد می‌شود نشست‌های به وجود آمده در سطح زمین و جابه‌جایی‌های اطراف ناحیه حفاری است (Baziar و همکاران، ۲۱۰۶؛ Maleki، ۲۰۰۱). حفاری تونل در خاک به طور دستی، مکانیکی یا به طور خودکار و به کمک ماشین‌های حفاری تونل صورت می‌پذیرد. انتخاب روش‌های حفاری در درجه اول به نوع زمین و مشخصات ژئوتکنیکی آن بستگی دارد (Baziar و همکاران، ۲۱۰۶؛ Maleki، ۲۰۰۱). یکی از مهم‌ترین مسائلی که به هنگام حفر تونل وجود دارد، گونه‌ی آزادشدگی تنش^۱ در محیط پیرامونی ناحیه حفاری است (Baziar و همکاران، ۲۱۰۶).

1. Free shrinkage tension

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۷۷۲۹۲۸۹۶

و پوشش آن و نهایتاً مهارت سیستم حفاری تونل بر شدت میزان فرونشست سطح زمین مؤثر است (Ghafoori و Hesami، ۲۰۱۵). در سال‌های اخیر مدل‌سازی‌های زیادی بر اساس روش اجزاء محدود و تفاضل محدود صورت گرفته است تا بتوان میزان نشست تونل‌ها را به طور دقیق مطالعه و ارزیابی کرد، اما نگرش گسترده‌ای به موضوع اثر هندسه تونل بر میزان نشست نشده است. بر این اساس در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از صحت‌سنجی نتایج توسط ابزار دقیق (میزان نشست به صورت محلی در محل سایت با برداشت‌های برج‌اندازه‌گیری شده است)، اثر هندسه مقطع تونل و فاصله تونل‌ها بر روی میزان نشست مورد ارزیابی قرار گیرد. برای ارزیابی دقیق در این پژوهش تونل مترو اصفهان مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی تونل مترو اصفهان

بر اساس مطالعات انجام‌گرفته، سیستم قطار سبک شهری اصفهان شامل پنج خط است که در اولین مرحله خط شمالی-جنوبی، از ترمینال مسافربری کاوه شروع شده و به ترمینال مسافربری صفا ختم می‌شود. این خط ۱۲/۵ کیلومتر است که حدود ۱۲ کیلومتر آن زیرزمینی بوده و در مجموع ۱۵ ایستگاه خواهد داشت. نقشه تونل مترو اصفهان در شکل (۱) نشان داده شده است (قطار شهری اصفهان، ۲۰۱۱). تونل مترو اصفهان به صورت تونل‌های دوقلو با دو خط رفت و برگشت مجزا در نظر گرفته شده است که فاصله مرکز به مرکز دو تونل با توجه به پلان مسیر از حداکثر ۲۱ متر تا حدود ۱۰ متر متغیر است. فاز اول مترو اصفهان از خیابان کاوه آغاز و تا ترمینال صفا اصفهان ادامه دارد. در این مسیر جنس زمین متغیر است. در پژوهش حاضر نگرش ویژه بر روی تأثیر هندسه مقطع بر میزان نشست سطح زمین، در قطعه یک این مسیر از ایستگاه میدان آزادی تا ایستگاه شیخ کلینی است.



شکل ۱- نقشه تونل مترو اصفهان (قطار شهری اصفهان، ۲۰۱۱)

در اثر حفر تونل، معمولاً در سطح زمین تغییر شکل‌های افقی و قائم مشاهده می‌شود، که این تغییر شکل‌ها با پیشرفت حفاری در سطح زمین افزایش می‌یابد (Burd و Augarde، ۲۰۰۱). چندین روش توسط پژوهشگران مختلف، جهت پیش‌بینی پروفیل نشست سطحی در امتداد و عمود بر محور حفاری، ارائه شده است (Burd، ۲۰۰۰).

Potts و Franzius (۲۰۰۵) مطالعه‌ای بر روی تأثیر هندسه مش‌بندی بر تحلیل سه بعدی اجزای محدود حفاری تونل انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که فاصله ۱۳ برابری قطر تونل، برای ناچیز کردن اثر مرزها بر روی نتایج، کافی است. دیگر پژوهشگران به بررسی حرکت و باز پخش تنش زمین به دلیل تونل‌زنی با روش‌های اجزا محدود و تفاضل محدود پرداختند و نتایج حاصل را با استفاده از تحلیل بازگشتی به کمک نتایج ابزار دقیق مورد بررسی قرار دادند (Karakus و Fowell، ۲۰۰۵). همچنین برای پیش‌بینی نشست ناشی از حفاری تونل، روش تفاضل محدود نسبت به روش اجزا محدود دقیق‌تر عمل می‌کند (Ghafoori و Hesami، ۲۰۱۵).

Ocak (۲۰۰۹) نشست‌های کوتاه مدت سطح و تأثیرات آن‌ها بر روی ساختمان‌ها را برای تونل‌های دوقلوی متروی استانبول با استفاده از روش اجزا محدود بررسی کرد.

Vahdatirad و همکاران (۲۰۰۹)، با استفاده از نرم‌افزار Plaxis به بررسی نشست حاصل از حفر خط دو تونل تبریز پرداخته‌اند و اثر آن بر روی میزان نشست زمین را بررسی کردند. مطالعاتی نیز به منظور بررسی اثر فاکتورهای مختلفی بر روی نشست تونل‌های دوقلوی مترو استانبول با استفاده از روش اجزا محدود انجام شده است (Chen و همکاران، ۲۰۱۱).

Hasanpour و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از سه روش تحلیلی، عددی و برداشت‌های برج‌ها، به بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل متروی استانبول پرداختند. برای تحلیل عددی، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D و برای تحلیل تجربی، از روش Herzog (۱۹۸۵) استفاده کردند. نتایج این تحلیل نشان داد که با افزایش سربار، میزان نشست نیز افزایش می‌یابد.

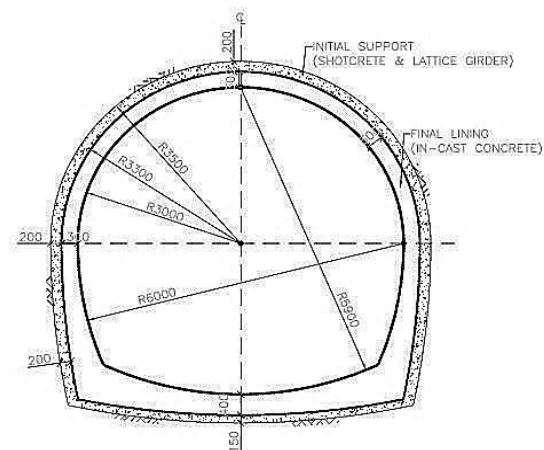
Lambrughi و همکاران (۲۰۱۲) با اطلاعات پروژه مترو شهر مادرید اسپانیا و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و مدل‌سازی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D با آنالیز حساسیت مدل‌های رفتاری مختلف خاک به بررسی تأثیر سینه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته و پروفیل‌های طولی نشست را در حالت‌های مختلف به دست آورده‌اند.

پژوهشگران در سال ۲۰۱۵ میلادی به بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست سطح زمین در اثر حفر تونل پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مشخصات ژئوتکنیکی زمین، شرایط آب زیرزمینی، موقعیت هندسی و ویژگی‌های تونل، روش ساخت تونل

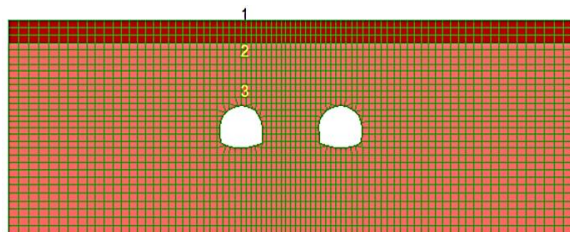
۲-۲- مدل سازی هندسی

مقطع تونل مترو اصفهان به شکل دو قوسی بوده و قطر تونل (D) 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 بر روی تونل‌ها معادل با ۲۰ کیلونیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است (Hasanpour) و همکاران (۲۰۱۲).

فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها دو برابر قطر (۱۴ متر) است. مدل - سازی حفاری به روش TBM صورت گرفته 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. خصوصیات هندسی مقطع تونل مترو اصفهان در شکل (۲) نشان داده شده است. تعداد زون‌های استفاده شده ۲۴۰۰ عدد است. در مش بندی سعی شده است که زون‌های نزدیک به تونل ریزتر باشند و هر چه فاصله از تونل بیشتر می‌شود، زون‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. مدل مش بندی شده تونل مترو اصفهان، خط صاف- آزادی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲- هندسه مقطع تونل مترو اصفهان به شکل دو قوسی (خط صاف- آزادی) (قطار شهری اصفهان، ۲۰۱۱)



شکل ۳- مدل مش بندی شده تونل مترو اصفهان و مکان ابزار دقیق‌های مورد نظر

۲-۳- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح در مسیر صاف-آزادی

بر اساس نمونه‌گیری‌های انجام شده و مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در مسیر صاف- آزادی قطعه سنگ‌هایی با جنس متفاوت وجود دارد. ولی جنس غالب سنگ‌های مسیر از نوع تناوب شیل و ماسه‌سنگ است و با نماد JS^۲ نشان داده می‌شود. همچنین لایه آبرفتی^۳ به ضخامت تقریباً ۴ متر بر روی جس قرار دارد. مدل رفتاری استفاده شده در طراحی، مدل رفتاری مور- کولمب است. دلیل استفاده از این مدل پارامترهای فیزیکی ساده و قابل تعیین بوده است، شایان ذکر است با توجه به این که مدل مور- کلمب در مسائل مهندسی ژئوتکنیک به صورت گسترده به کار رفته است از این رو دارای اعتبار مناسبی است. بر اساس مطالعات گذشته مدل مور- کلمب برای خاک‌های مشابه با منطقه مورد مطالعه جواب‌های مناسبی ارائه داده است (Kasper) و (Meschke, ۲۰۰۶). برای تعیین مشخصات مکانیکی خاک از محل تونل نمونه‌گیری انجام شده و نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شده است. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است (ASTM, ۲۰۰۴). دانسیته (γ) بر اساس استاندارد ASTM, D854 و زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (C) خاک بر اساس استاندارد ASTM, D3080 تعیین شده است (ASTM, ۲۰۰۴). برخی از مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه در جدول (۱) ارائه شده است. پارامترهای مدول الاستیسیته حجمی (K) و مدول برشی (G) با استفاده از پارامترهای مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν) و با استفاده از روابط (۱) و (۲) به دست می‌آیند.

$$G = E/2(1+\nu) \quad (1)$$

$$K = E/3(1-2\nu) \quad (2)$$

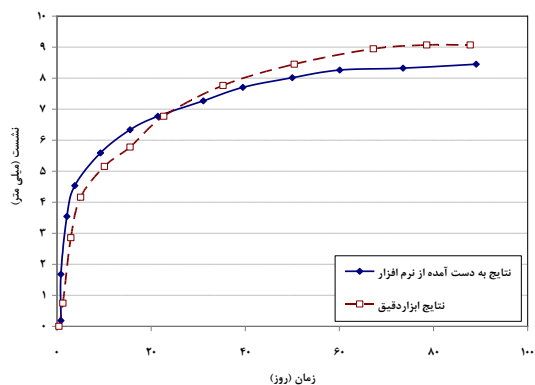
۲-۴- صحت‌سنجی میزان نشست تونل دوقلو با نتایج ابزار دقیق

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

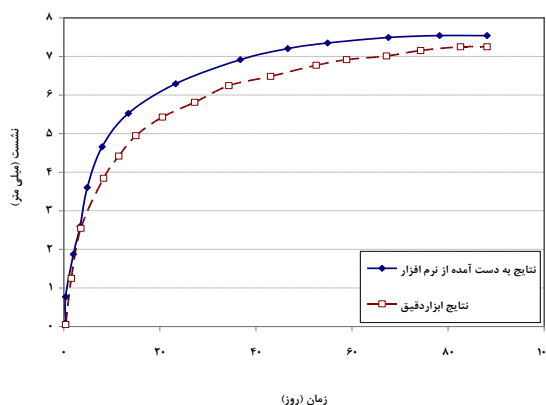
در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) به ترتیب مقایسه بین نتایج میزان نشست به دست آمده از ابزار دقیق نقاط ۱، ۲ و ۳ با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار FLAC در طی زمان ۹۹ روز نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی از مشخصات ژئوتکنیکی خاک تونل مترو اصفهان

Material	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	ν	E (kN/m ²)	C (kN/m ²)	ϕ
Alluvium	۱۷	۱۸	۰/۴	5×10^5	۶۰	۲۵
Jssh	۲۶	۲۷	۰/۳۲	$2/7 \times 10^6$	۱۷۷	۴۱



شکل ۵- مقایسه نتایج به دست آمده از ابزار دقیق قرار گرفته در موقعیت ۲ با نتایج مدل سازی (عمق ۶ متری از سطح زمین)



شکل ۶- مقایسه نتایج به دست آمده از ابزار دقیق قرار گرفته در موقعیت ۳ با نتایج مدل سازی (عمق ۱۲ متری از سطح زمین)

۳- بحث و بررسی نتایج

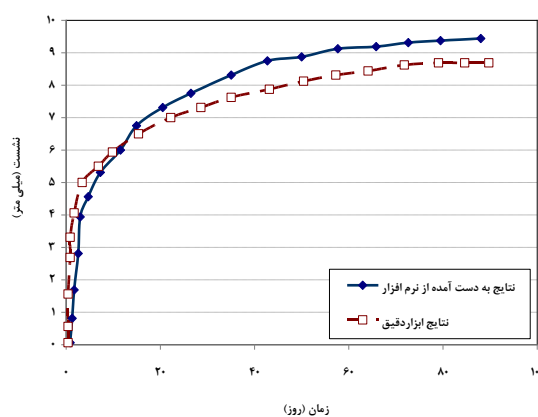
۳-۱- مقایسه نشست سطح زمین در اثر حفر تونل تک و دوقلو

جهت مدل سازی تونل تک، تمام شرایط هندسی و ژئوتکنیکی، مانند حالت تونل دوقلو در نظر گرفته شده است، با این تفاوت که به جای حفر دو تونل، یک تونل و با مشخصات هندسی شکل (۲) حفاری شده است. در شکل (۷) مدل مش بندی حفر تونل تک نشان داده شده است.

در شکل (۸) نشست سطح زمین برای دو حالت تونل تک و دوقلو (فاصله مرکز به مرکز تونلها ۱۰ متر است) ترسیم شده و نتایج با هم مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود در حفاری تونل دوقلو، نشست سطح زمین بیشتر از حفاری تونل تک است.

همان طور که در شکلها مشاهده می شود، تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده از نرم افزار و ابزار دقیق وجود دارد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) موقعیت ۱، میزان نشست پیش بینی شده ابزار دقیق تا روز پنجم بیشتر از میزان نشست پیش بینی شده توسط نرم افزار است، اما از روز پنجم به بعد میزان نشست پیش بینی شده توسط مدل بیشتر از نتایج ابزار دقیق است. شایان ذکر است بیشترین میزان اختلاف در پیش بینی میزان نشست در روز ۵۰ام به وجود آمده است. مقدار نشست به دست آمده در این نقطه به وسیله ابزار دقیق برابر ۸ میلی متر و از نرم افزار ۹ میلی متر است، بر این اساس درصد اختلاف در این نقطه برابر ۱۱/۱٪ است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل های (۵) و (۶) حداکثر اختلاف بین نتایج ابزار دقیق و مدل ارائه شده در نقاط دو و سه در روزهای سی ام و نودم مشاهده شده و به ترتیب برابر با ۵/۵٪ و ۱۱/۲٪ است.

بر اساس نتایج ارائه شده از شکل های (۴) و (۵) و (۶) بیشترین تفاوت میزان نشست به دست آمده از مدل سازی با نرم افزار FLAC2D و نتایج ابزار دقیق در نقاط ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر ۱۱/۱، ۵/۵ و ۱۴/۲ درصد است. بر اساس نتایج ارائه شده، بیشترین اختلاف نتایج در نقطه ۳ که مربوط به تاج تونل است، مشاهده می شود، بر این اساس می توان بیان نمود که مدل در نظر گرفته شده برای آنالیز نمونهها مناسب است.



شکل ۴- مقایسه نتایج به دست آمده از ابزار دقیق قرار گرفته در موقعیت ۱ با نتایج مدل سازی (سطح زمین)

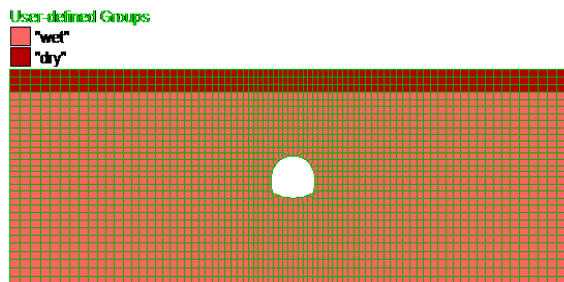
۳-۲-۱- بررسی اثر فاصله دو تونل از هم بر نشست سطح

زمین

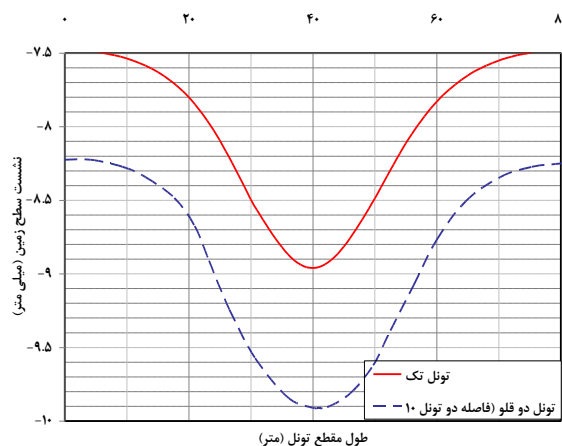
جهت بررسی تأثیر فاصله دو تونل بر میزان نشست زمین، با ثابت نگه داشتن تمام خصوصیات مدل، فاصله مرکز به مرکز دو تونل از هم تغییر داده شده است. به این منظور چهار فاصله ۱۰، ۱۴، ۲۰ و ۲۵ متر در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است فواصل انتخاب شده بر اساس فواصل تونل‌های مترو شهر اصفهان در نقاط مختلف مسیر است. در شکل (۹) مدل مش‌بندی شده تونل برای چهار فاصله مختلف دو تونل از هم نشان داده شده است. در شکل (۱۰) مدل تغییر شکل یافته مدل پس از حفاری تونل، با بزرگ‌نمایی ۱۵۰ برابر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین نشست در سطح زمین اتفاق می‌افتد و با افزایش فاصله دو تونل از هم مقدار نشست کاهش پیدا می‌کند. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که بیشینه میزان نشست سطح زمین در حالتی که فاصله دو تونل برابر ۱۰ متر (۱/۴۳ برابر قطر تونل) است حدود ۹/۸۹۳ میلی‌متر است (اعداد درون شکل بر اساس واحد سیستم SI است). با افزایش فاصله دو تونل به ۱۴ متر (۲ برابر قطر تونل) میزان نشست حدود ۴/۲٪ کاهش یافته و به ۹/۴۷۹ میلی‌متر رسیده است. شایان ذکر است در حالتی که فاصله مراکز تونل‌ها ۲۰ متر (۲/۸۵ برابر قطر تونل) و ۲۵ متر (۳/۵۷ برابر قطر تونل) است میزان نشست به حدود ۹/۲۶۸ و ۹/۲۹۰ میلی‌متر کاهش یافته است. بر اساس نتایج حاصله، با افزایش فاصله دو تونل از هم اندازه نشست به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد و با افزایش بیشتر از ۲۰ متر در فاصله دو تونل از هم میزان تغییرات نشست تقریباً ثابت است. در حقیقت با افزایش فاصله دو تونل به بیشتر از ۳ برابر قطر تونل، میزان تغییرات نشست ثابت می‌شود.

جهت بررسی دقیق‌تر نشست، مقدار نشست در ارتفاع‌های مختلف سطح زمین، ۴ متری سطح زمین، ۸ متری سطح زمین و ۱۲ متری سطح زمین (تاج تونل) در برابر طول مقطع تونل در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۱-الف) در حالتی که فاصله دو تونل از هم برابر ۱۰ متر است، محدوده نشست سه نقطه انتخاب شده در بازه ۶/۲ تا ۹/۸ میلی‌متر است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۱-الف) بیش‌ترین میزان نشست تاج تونل ۸/۶ میلی‌متر و بیش‌ترین میزان نشست در سطح زمین ۹/۹ میلی‌متر است. قابل توجه است که بیش‌ترین میزان نشست در سطح زمین در فاصله میان دو تونل است.

در حالتی که فاصله دو تونل از هم برابر ۱۴ متر است (شکل (۱۱-ب))، مقدار نشست در نقاط مختلف انتخاب شده در محدوده ۶/۵ تا ۹/۴ میلی‌متر است در حقیقت در این حالت میزان نشست بیشینه تاج تونل به ۸/۱۷ میلی‌متر رسیده است و نسبت به حالت فاصله ۱۰ متر حدود ۶٪ کاهش یافته است، این در حالی است که نشست سطح زمین ۹/۴ میلی‌متر است و نسبت به حالت قبل



شکل ۷- مدل مش‌بندی شده تونل تک، تونل مترو اصفهان



شکل ۸- مقایسه نشست سطح زمین در تونل تک و دوقلو

حداکثر نشست سطح زمین در حالت تونل تک درست در بالای تونل و در سطح زمین به میزان ۸/۹۶ میلی‌متر اتفاق افتاده و در حالت حفاری تونل دوقلو حداکثر نشست درست در محور مرکزی گذرنده از وسط دو تونل و در بالای سطح زمین به میزان ۹/۹۰ میلی‌متر اتفاق افتاده است. در حقیقت در حالت تونل دوقلو میزان نشست حدود یک میلی‌متر افزایش یافته است. در حفاری تونل دوقلو حجم بیشتری از زیر سطح زمین حفاری می‌شود و بنابر این باید در حالت حفاری تونل دوقلو نشست سطح زمین بیشتر باشد. اختلاف نشست در دو حالت حفاری تونل تک و دوقلو برابر با ۱۰٪ است. شایان ذکر است این نتیجه می‌تواند برای تونل‌های مشابه با توجه به نوع خاک منطقه متفاوت باشد.

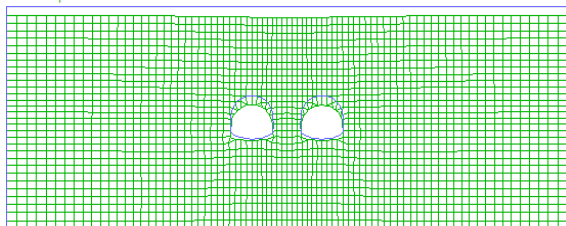
۳-۲- بررسی تأثیر فاصله و هندسه مقطع بر میزان نشست

سطح زمین

در بخش سوم پژوهش تأثیر فاصله و هندسه مقطع تونل بر نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور با ثابت نگه داشتن تمام خصوصیات تونل، پارامتر هندسی مورد نظر تغییر داده شده و تأثیر آن بررسی شده است. بدین منظور شکل‌های مقطع دایره‌ای، نعل اسبی و دو قوسی مورد بررسی قرار گرفته است.

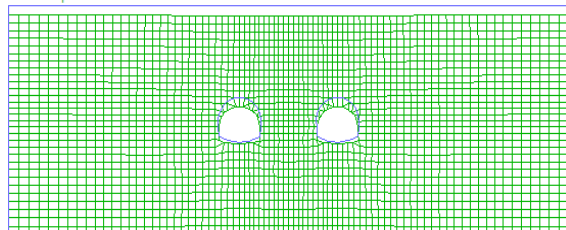
با افزایش بیشتر فاصله تونل‌ها (بیش از سه برابر قطر) میزان نشست‌ها تقریباً ثابت می‌شود، همچنین میزان نشست سطح زمین به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد به نحوی که در حالتی که فاصله تونل‌ها ۲۵ متر است میزان نشست زمین نسبت به فاصله ۱۰ متری حدود ۸/۸٪ کاهش یافته است.

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 1.500E+02
Max Disp = 9.893E-03



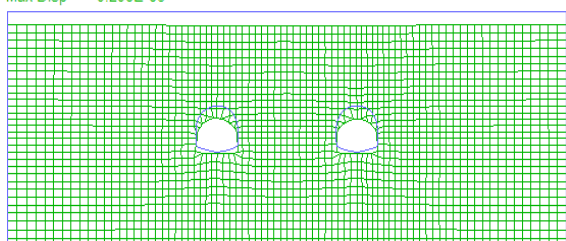
(الف)

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 1.500E+02
Max Disp = 9.479E-03



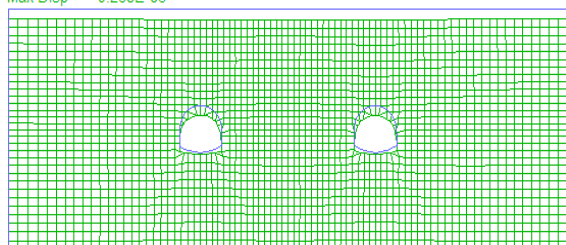
(ب)

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 2.000E+02
Max Disp = 9.290E-03



(ج)

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 1.500E+02
Max Disp = 9.268E-03



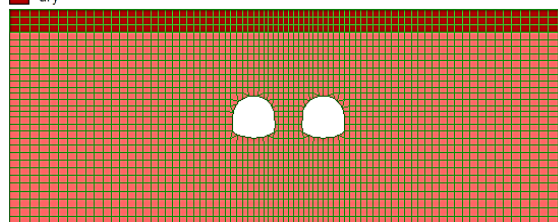
(د)

شکل ۱۰- مدل تغییر شکل یافته تونل: الف) فاصله دو تونل برابر ۱۰ متر، ب) فاصله دو تونل برابر ۱۴ متر، ج) فاصله دو تونل برابر ۲۰ متر، د) فاصله دو تونل برابر ۲۵ متر (واحدهای ذکر شده در شکل متر است)

حدود ۵٪ کاهش یافته است. در حالتی که فاصله دو تونل از هم برابر ۲۰ و ۲۵ متر است، نشست در محدوده ۶/۳ تا ۹/۳ میلی‌متر است. بنابر این مشاهده می‌شود با افزایش فاصله دو تونل به بیش از ۲۰ متر تا حدودی نشست‌ها ثابت می‌ماند. در حقیقت در حالتی که فاصله دو تونل به حدود ۳ برابر قطر تونل‌ها افزایش یافته است میزان نشست سطح زمین نسبت به حالت قبل حدود ۱٪ کاهش یافته است.

User-defined Groups

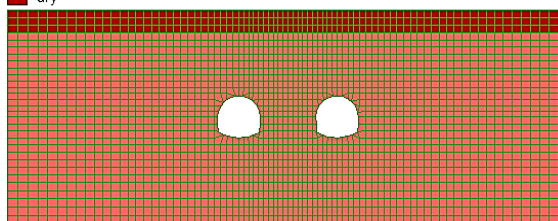
"wet"
"dry"



(الف)

User-defined Groups

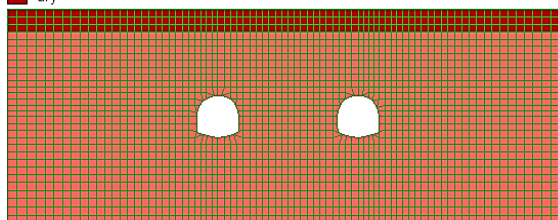
"wet"
"dry"



(ب)

User-defined Groups

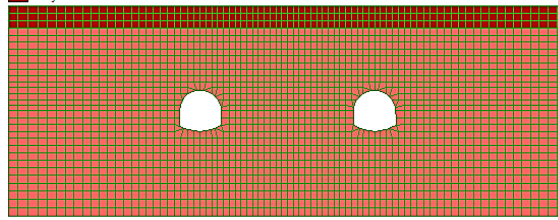
"wet"
"dry"



(ج)

User-defined Groups

"wet"
"dry"



(د)

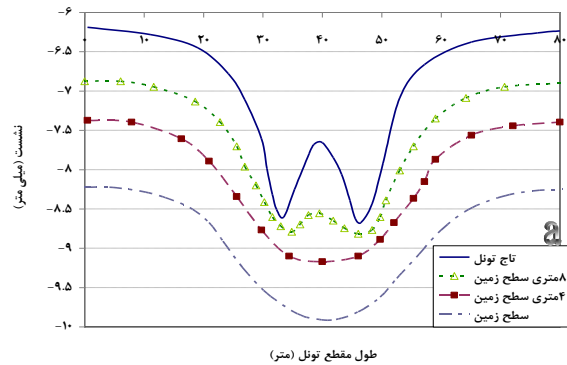
شکل ۹- مدل مش‌بندی شده تونل: الف) فاصله دو تونل برابر ۱۰ متر، ب) فاصله دو تونل برابر ۱۴ متر، ج) فاصله دو تونل برابر ۲۰ متر، د) فاصله دو تونل برابر ۲۵ متر

در حالتی که فاصله دو تونل از هم برابر ۱۴ متر است (شکل ۱۱-ب))، مقدار نشست در نقاط مختلف انتخاب شده در محدوده ۶/۵ تا ۹/۵ میلی‌متر است و در حالتی که فاصله دو تونل از هم برابر ۲۰ و ۲۵ متر است، نشست در محدوده ۶/۳ تا ۹/۳ است. بنابر این مشاهده می‌شود با افزایش فاصله دو تونل به بیش از ۲۰ متر تا حدودی تغییرات میزان نشست‌ها ثابت می‌ماند. بر این اساس می‌توان بیان نمود که با افزایش ۱۰ متری میان دو تونل، میزان بیشینه مقدار نشست حدود ۵٪ کاهش یافته است.

در شکل (۱۲) میزان نشست در مقاطع مختلف برای فواصل مختلف تونل‌های دوقلو ارائه شده است. در شکل (۱۲-الف) میزان نشست در سطح زمین ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده بیش‌ترین میزان نشست در حالتی که فواصل دو تونل ۱۰ متر است به میزان ۹/۹ میلی‌متر است که در میان دو تونل (فاصله ۴۰ متری از مرکز مختصات) حاصل می‌شود. با افزایش فاصله به دو برابر قطر تونل (۱۴ متر) میزان نشست بیشینه به حدود ۹/۴ میلی‌متر است که این میزان نشست در فاصله ۳۳/۴ و ۴۵ متری از مرکز مختصات حاصل می‌شود. با افزایش فاصله میان دو تونل به حدود ۳ برابر قطر تونل و بیشتر میزان نشست بیشینه کاهش یافته و به حدود ۹/۲ میلی‌متر کاهش یافته است. نکته حائز اهمیت این است که با افزایش فاصله تونل‌ها نقطه نشست بیشینه از میان دو تونل به سمت مرکز تونل‌ها حرکت می‌کند.

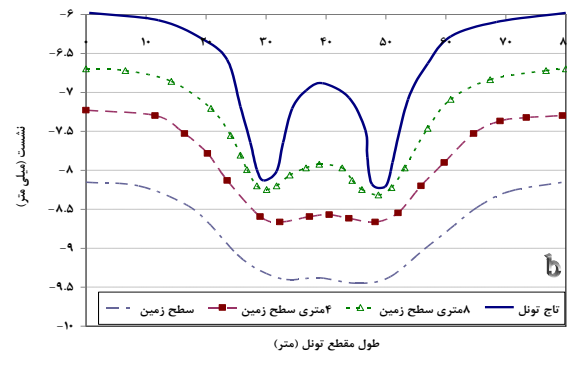
شایان ذکر است با افزایش فاصله دو تونل به بیش از سه برابر قطر، تقریباً میزان نشست بیشینه ثابت است. در حقیقت میزان نشست در میان دو تونل در حالتی که فاصله دو تونل ۲۵ متر است، نسبت به حالتی که فاصله دو تونل ۱۰ متر است حدود ۱۱٪ کاهش یافته است. بررسی میزان نشست در عمق ۴ متری در شکل (۱۲-ب) ارائه شده است. به طور کلی میزان نشست در تمام فواصل نسبت به سطح زمین کاهش یافته است و روند تغییرات نیز مانند نشست در سطح زمین است. بر اساس نتایج ارائه شده در این حالت میزان نشست بیشینه ۹/۲ میلی‌متر و در فاصله میان دو تونل است.

در حالتی که فاصله دو تونل ۲۵ متر است بیشینه میزان نشست حدود ۸/۵ میلی‌متر است. در شکل (۱۲-ج) میزان نشست در عمق ۸ متری نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت این است که با افزایش عمق در فاصله ۱۰ متری میان دو تونل با کاهش میزان نشست بیشینه محل، نشست بیشینه نیز از محور مرکزی گذرنده از وسط دو تونل به سمت مرکز دو تونل حرکت می‌کند. بررسی میزان نشست در تاج تونل در شکل (۱۲-د) نشان داده شده است. منطقی با افزایش عمق میزان نشست بیشینه کاهش می‌یابد.



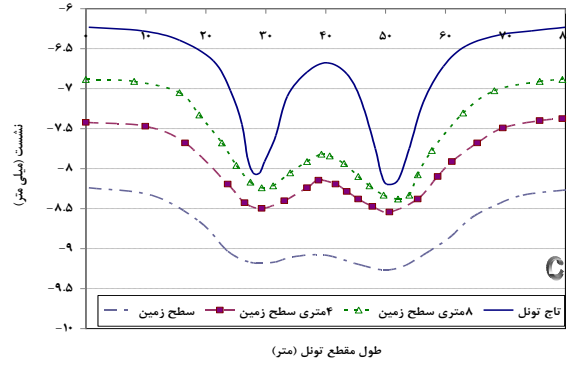
طول مقطع تونل (متر)

(الف)



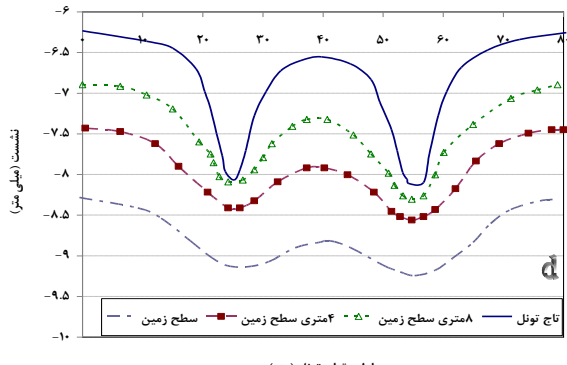
طول مقطع تونل (متر)

(ب)



طول مقطع تونل (متر)

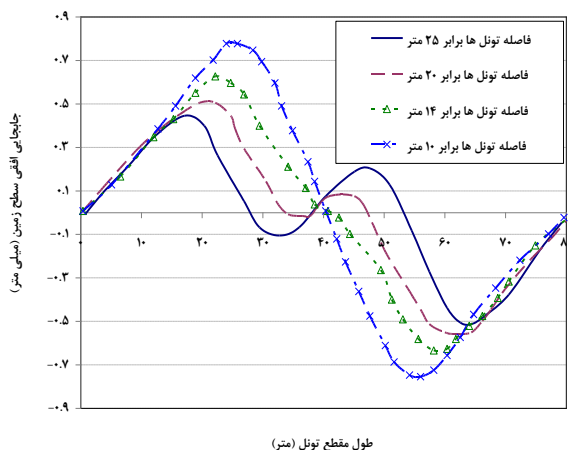
(ج)



طول مقطع تونل (متر)

(د)

شکل ۱۱- نمودار نشست در چهار سطح از حد فاصل تاج تونل تا سطح زمین (سطح زمین، ۴ متری سطح زمین، ۱۲ متری سطح زمین و تاج تونل): (الف) فاصله دو تونل برابر ۱۰ متر، (ب) فاصله دو تونل برابر ۱۴ متر، (ج) فاصله دو تونل برابر ۲۰ متر، (د) فاصله دو تونل برابر ۲۵ متر

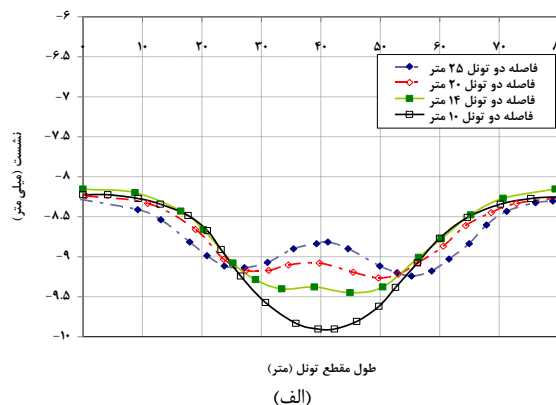


شکل ۱۳- نمودار جابجایی افقی در سطح زمین در طول مقطع تونل، در حالت‌های فواصل تونل برابر ۱۰، ۱۴، ۲۰ و ۲۵ متر

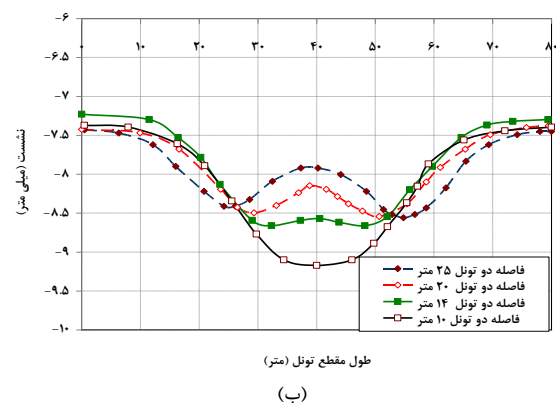
جهت بررسی دقیق‌تر، نمودار جابجایی افقی سطح زمین برای فواصل مختلف تونل‌ها از یکدیگر در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، حداکثر جابجایی افقی در سطح زمین برای فاصله ۱۰ متری تونل‌ها از یکدیگر ۰/۸ میلی‌متر است. با افزایش فاصله تونل‌ها به ۱۴ متر میزان حداکثر جابجایی افقی حدود ۰/۲۵٪ کاهش یافته و به ۰/۶ میلی‌متر رسیده است.

شایان ذکر است که بیشینه جابجایی افقی در حالتی که فاصله تونل‌ها برابر ۲۰ و ۲۵ متر است به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۰/۴۴ میلی‌متر است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله تونل‌ها از هم جابجایی افقی کاهش یافته است. با دقت در نمودارهای شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله تونل‌ها از هم جابجایی افقی در سطح زمین تقریباً ثابت است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت فاصله مناسب تونل‌ها از هم برابر ۲۰ متر (تقریباً سه برابر قطر تونل) است. در حقیقت کم‌ترین نشست و جابجایی افقی در حالتی که تونل‌ها در فاصله ۲۰ متری (تقریباً سه برابر قطر تونل) از یکدیگر قرار دارند حاصل شده است و با افزایش فاصله تونل‌ها از هم نشست و جابجایی افقی تقریباً ثابت است.

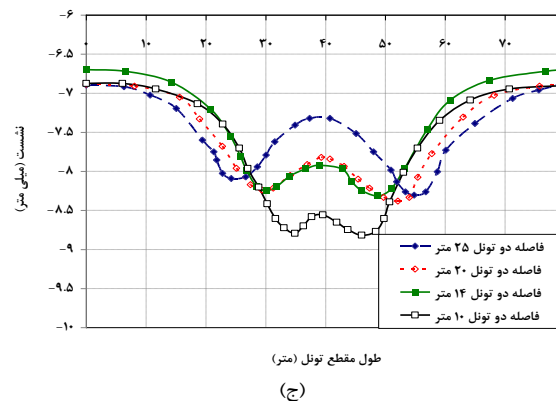
با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله دو تونل از هم میزان نشست در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین کاهش می‌یابد. ارزیابی منحنی‌های ارائه شده نشان می‌دهد که با افزایش بیش از ۲۰ متر در فاصله تونل‌ها از هم مقدار نشست در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین (از جمله سطح زمین) تغییر محسوسی ندارد. بنابر این می‌توان گفت با افزایش بیش از ۲۰ متر در فاصله تونل‌ها از یکدیگر، نشست در سطح زمین ثابت می‌ماند.



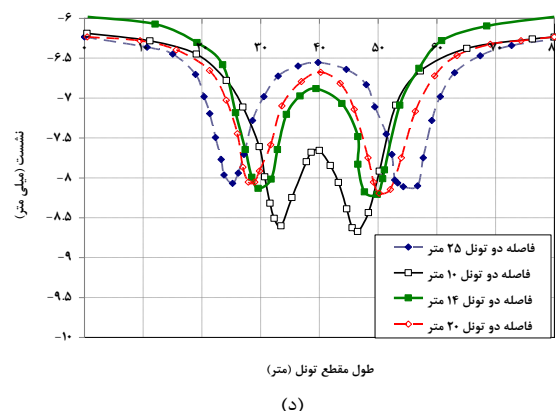
طول مقطع تونل (متر)
(الف)



طول مقطع تونل (متر)
(ب)



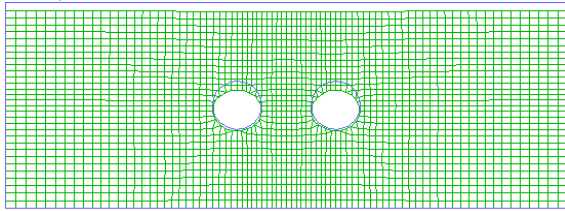
طول مقطع تونل (متر)
(ج)



طول مقطع تونل (متر)
(د)

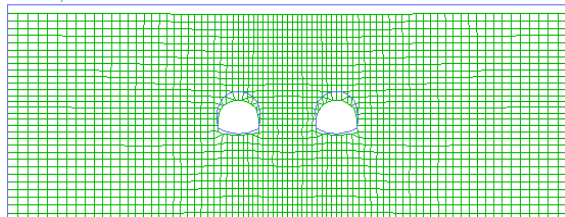
شکل ۱۲- نمودار نشست تونل‌های دوقلو در چهار مقطع مختلف: (الف) نشست در سطح زمین، (ب) نشست در فاصله ۴ متری از سطح، (ج) نشست در فاصله ۸ متری از سطح، (د) نشست در تاج تونل

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 1.500E+02
Max Disp = 9.547E-03



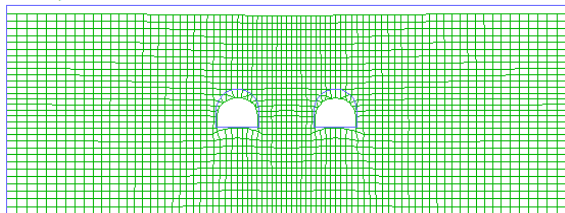
(الف)

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 1.500E+02
Max Disp = 9.479E-03



(ب)

Exaggerated Grid Distortion
Magnification = 1.500E+02
Max Disp = 9.752E-03



(ج)

شکل ۱۵- مدل تغییر شکل یافته تونل با بزرگ‌نمایی ۱۵۰ برابر برای تونل با مقطع‌های: الف) تونل با مقطع دایره‌ای شکل، ب) تونل یا مقطع دو قوسی، ج) تونل با مقطع نعل اسبی شکل

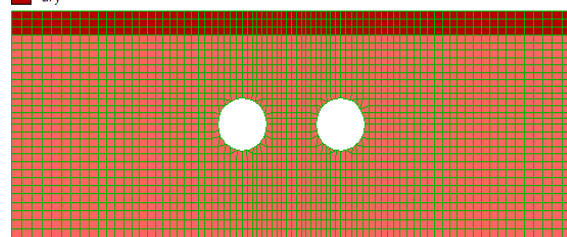
در شکل (۱۵) تغییر شکل‌های ایجاد شده در شبکه المان-بندی در انتهای حفاری برای سه حالت مقطع تونل با بزرگ‌نمایی ۱۵۰ برابر نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود حداکثر جابجایی در سطح زمین اتفاق افتاده است. با توجه به شکل (۱۵) حداکثر جابجایی به ترتیب برای تونل با مقطع دایره‌ای شکل، دو قوسی و نعلی شکل برابر با ۹/۵۴۷، ۹/۴۷۹ و ۹/۷۵۲ میلی‌متر است.

بر این اساس می‌توان بیان کرد که حداکثر نشست در حالت تونل نعلی شکل و حداقل نشست در حالت تونل دو قوسی ایجاد می‌شود. جهت بررسی دقیق‌تر، نشست سطح زمین و تاج تونل در طول مقطع تونل (سه مقطع تونل دایره‌ای، دو قوسی و نعل اسبی) در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که حداکثر نشست سطح زمین در هر سه مقطع تونل، در میانه مرکزی دو تونل اتفاق افتاده است. حداکثر نشست سطح زمین در حالت تونل نعلی شکل از همه بیشتر و برابر ۹/۷۵۲ میلی‌متر است. علت این امر می‌تواند

User-defined Groups

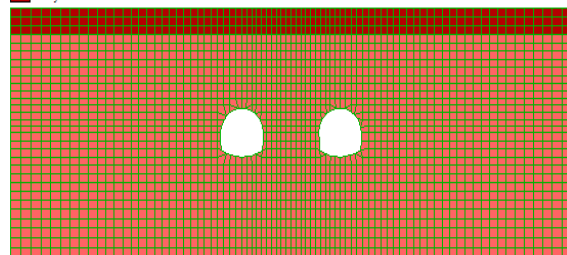
"wet"
"dry"



(الف)

User-defined Groups

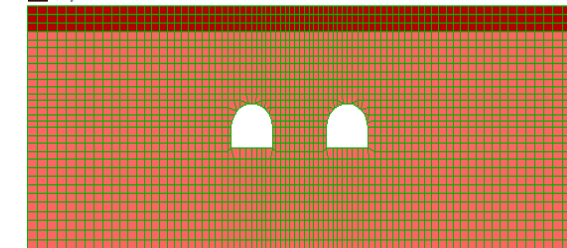
"wet"
"dry"



(ب)

User-defined Groups

"wet"
"dry"



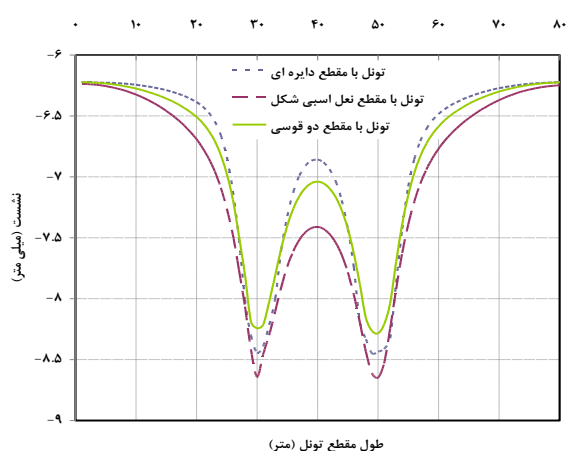
(ج)

شکل ۱۴- مدل مش‌بندی شده تونل با مقطع‌های: الف) تونل با مقطع دایره‌ای شکل، ب) تونل یا مقطع دو قوسی، ج) تونل با مقطع نعل اسبی شکل

۳-۲-۲- بررسی اثر هندسه مقطع تونل بر نشست سطح زمین

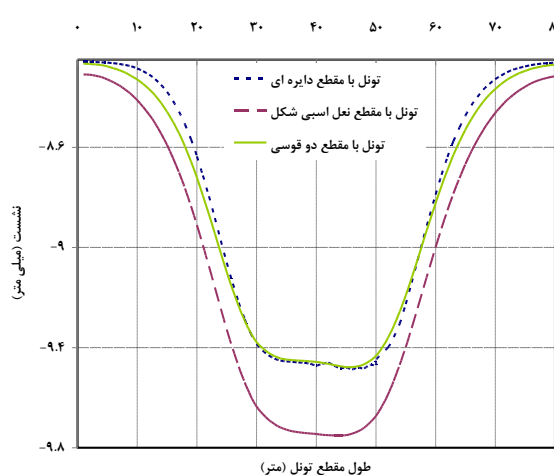
جهت بررسی تأثیر هندسه مقطع تونل، سه مقطع هندسی دایره‌ای شکل، نعلی شکل و دو قوسی در نظر گرفته شده است. خصوصیات هندسی مقطع دو قوسی در شکل (۲) بر اساس هندسه مقطع تونل مترو اصفهان نشان داده شده است. هندسه مقطع نعلی شکل طوری در نظر گرفته شده است که شعاع تاج تونل، ارتفاع تونل و عرض تونل با مقادیر مربوط به تونل دو قوسی یکسان باشد. شعاع تونل دایره‌ای شکل برابر ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۴) مدل مش‌بندی شده مقطع تونل در سه حالت، نشان داده شده است.

دوقوسی در نقاط مختلف سطح زمین، تقریباً یکسان است. بنابراین این می‌توان نتیجه گرفت، در حالت تونل با مقطع نعل اسبی شکل بیش‌ترین نشست و بیش‌ترین جابجایی افقی در سطح زمین اتفاق می‌افتد و در حالت تونل با مقطع دایره‌ای و دوقوسی، با اختلاف ناچیزی، نشست و جابجایی افقی در حالت دوقوسی مقدار کم‌تری دارد. بر این اساس از نظر میزان نشست و جابجایی افقی، تونل با مقطع دوقوسی بهترین پاسخ و تونل با مقطع نعلی شکل بدترین پاسخ را می‌دهد. بر این اساس می‌توان بیان کرد که در مترو اصفهان از لحاظ انتخاب مقطع هندسی از بین سه مقطع بحث شده بهترین مقطع انتخاب شده است.

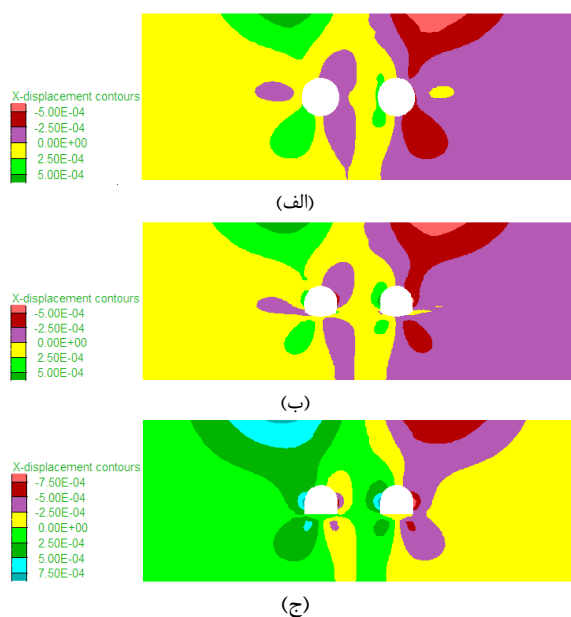


شکل ۱۷- نمودار نشست تاج تونل در سه مقطع دایره‌ای شکل، دو قوسی و نعلی شکل

نحوه توزیع یکنواخت تنش در اطراف تونل نعلی شکل باشد. در حالت تونل با مقطع دایره‌ای شکل و تونل دو قوسی میزان نشست تقریباً برابر ۹/۵ میلی متر است (Rahimpour و Ranjbarnia، ۲۰۱۸). در حقیقت نحوه توزیع تنش در اطراف این دو تونل تقریباً یکسان است هر چند که در تونل دوقوسی تمرکز تنش در دیواره‌ها مقداری بیشتر از تاج تونل است. حداکثر میزان نشست تاج تونل در سه مقطع دایره‌ای شکل، دوقوسی و نعل اسبی درست بر روی تونل غربی و تونل شرقی اتفاق افتاده است (شکل (۱۷)). همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود حداکثر نشست تاج تونل در حالت مقطع نعلی شکل برابر ۹/۷۴ میلی متر است.



شکل ۱۶- نمودار نشست سطح زمین در سه مقطع دایره‌ای شکل، دوقوسی و نعلی شکل



شکل ۱۸- جابجایی افقی ایجاد شده در انتهای حفاری:
الف) تونل با مقطع دایره‌ای شکل، ب) تونل با مقطع دوقوسی،
ج) تونل با مقطع نعلی شکل

در حالت مقطع دوقوسی میزان نشست تاج تونل کم‌ترین مقدار (۹/۴ میلی متر) را دارد. بنابراین حداکثر نشست در حالت تونل نعلی شکل و کم‌ترین نشست در حالت مقطع دوقوسی اتفاق می‌افتد. شایان ذکر است در هر سه مقطع میزان بیشینه نشست سطح زمین حدود ۱۴٪ بیش از مقدار بیشینه نشست تاج تونل است. کانتورهای جابجایی افقی تونل در سه حالت مقطع دایره‌ای شکل، دوقوسی و نعلی شکل در شکل (۱۸) نشان داده شده است. همان طور که در کانتورهای جابجایی افقی مشاهده می‌شود، بیش‌ترین جابجایی افقی در سطح زمین و در بالای خط محور مرکزی تونل‌ها ایجاد شده است. جهت بررسی دقیق‌تر جابجایی‌ها، نمودار جابجایی افقی سطح زمین برای سه مقطع دایره‌ای، دوقوسی و نعلی شکل در شکل (۱۸) نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که حداکثر جابجایی افقی در حالت تونل با مقطع نعل اسبی شکل افتاده و مقدار آن برابر ۰/۸ میلی متر است. همچنین بر اساس نتایج ارائه شده جابجایی افقی در حالت تونل با مقطع دایره‌ای شکل و

Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25, 243-269.

Baziar MH, Rabeti Moghadam M, Kim DS, Choo YW, "Effect of underground structures on the acceleration response of the structure lining flexibility on the acceleration response at the ground surface", *Sharif Civil Engineering*, 2016, 31 (2), 79-89.

Burd H J, "Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Geotechnical Engineering*, 2000, 17-29.

Chen RP, Zhu J, Liu W, Tang XW, "Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils", *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 2011, 26, 163-171.

Fang O, Tai Q, Zhang D, Ngai L, Wong Y, "Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements", *Tunneling and Underground Space Technology*, 2016, 51, 144-151.

Franzius JN, Potts DM, "Influence of Mesh Geometry on Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Tunnel Excavation", *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5, 256-267.

Hasanpour R, Chakeri H, Ozelik Y, Denek H, "Evaluation of surface Settlements in the Istanbul Metro in terms of analytical, numerical and direct measurements", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 3, 499-510.

Havaej M, Rahmangebaj R, Ebrahimi Farsangi MA, "An Equation to Predict Ground Surface Settlement, due to Metro Tunneling Using EPB TBM. (Case Study: Shiraz Metro)", *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*, 2004, 2 (2), 87-100.

Hesami AR, Ghafoori M, Lashkaripour G, "Risk management of subsidence induced by tunnel excavation (paper case study: mosque of Koohsanngi park in Mashhad)", *Indian journal fundamental and applied life sciences*, 2015, 5, 3128-3135.

Karakus M, Fowell, RJ, "Back analysis for tunneling induced ground movements and stress redistribution", *Tunneling and Underground Space Technology*, 2005, 514-524.

Kasper T, Meschke G, "A Numerical Study of the Effect of Soil and Grout Material Properties and Cover Depth in Shield Tunneling", *Institute for Structural Mechanics, Ruhr University Bochum, Universitätsstrabe 150, 44780 Bochum, Germany*, 2006.

Lambrughi A, Medina L, Castellanza R, "Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB Mechanized excavation", *Computers and Geotechnics Journal*, 2012, 40, 97-113.

Loganathan N, Poulos HG, "Analytical Prediction for Tunneling- Induced Ground Movement Geoenvironmental Engineering", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124 (9), 846-856.

Maleki M, "Choose a behavioral model in the design and calculation of tunnels", *5th Iranian Tunneling Conference, Tehran*, 2001, 147-152.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اثر هندسه مقطع و فاصله تونل‌ها بر اندازه نشست سطح زمین به صورت موردی در تونل مترو شهر اصفهان مدل سازی و اثر فاصله دو تونل و شکل تونل مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از مهم ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح ذیل است:

۱. حداکثر نشست سطح زمین در حالت تونل تک درست در بالای تونل و در سطح زمین اتفاق افتاده و در حالت حفاری تونل دوقلو حداکثر نشست در حالتی که فواصل تونل‌ها کمتر از ۲ برابر قطر تونل باشد، درست در محور مرکزی گذرنده از وسط دو تونل و در بالای سطح زمین اتفاق افتاده است.
۲. در حفاری تونل دوقلو حجم بیشتری از زیر سطح زمین حفاری می شود. بر این اساس نشست سطح زمین در حالت حفاری تونل دوقلو حدود ۱۰ درصد بیشتر از حفاری تونل تک است، توجه شود که در این مورد نوع خاک منطقه نیز قطعاً تأثیرگذار است. شایان ذکر است با افزایش فاصله تونل‌ها این مقدار کاهش می یابد.
۳. با افزایش فاصله دو تونل از هم اندازه نشست کاهش می یابد و با افزایش بیشتر از سه برابر قطر (۲۰ متر) در فاصله دو تونل از یکدیگر میزان نشست تقریباً ثابت است.
۴. بر اساس نتایج ارائه شده با افزایش فاصله تونل‌ها از هم جابجایی افقی کاهش یافته است و در حالتی که فاصله دو تونل از هم برابر ۲۰ و ۲۵ متر است میزان جابجایی افقی با هم برابر است. بنابر این می توان نتیجه گرفت فاصله مناسب تونل‌ها از هم برابر سه برابر قطر تونل (۲۰ متر) است. چون کم ترین میزان نشست و جابجایی افقی در این فاصله از تونل‌ها، حاصل شده و با افزایش فاصله تونل‌ها از هم نشست و جابجایی افقی ثابت می ماند.
۵. در حالت تونل با مقطع نعلی شکل بیش ترین نشست و بیش ترین جابجایی افقی در سطح زمین اتفاق می افتد و در حالت تونل با مقطع دایره ای و دو قوسی، با اختلاف ناچیزی، نشست و جابجایی افقی در حالت دو قوسی مقدار کم تری دارد. بنابر این از نظر میزان نشست و جابجایی افقی، تونل با مقطع دو قوسی بهترین پاسخ و تونل با مقطع نعلی شکل بدترین پاسخ را می دهد.
۶. حداکثر نشست در حالت تونل نعلی شکل (۹/۷۵۲ میلی متر) و حداقل نشست در حالت تونل دو قوسی (۹/۴۷۹ میلی متر) ایجاد می شود. از طرفی حداکثر جابجایی افقی در حالت تونل با مقطع نعلی اسبی شکل اتفاق افتاده و مقدار آن برابر ۰/۸ میلی متر است.

۵- مراجع

American Society for Testing and Materials, "ASTM, 2004 American Society for Testing and Materials, ASTM, Annual Book of ASTM Standards", P.A., Philadelphia V.4, 08, 2004.

Augarde CE, Burd HJ, "Three-dimensional finite element analysis of lined tunnels", *International Journal for*

- Mroueh H, Shahrou I, "A Simplified 3D Model for Tunnel Construction Using Tunnel Boring Machines", Laboratoire de Me'canique de Lille, Universite' des Sciences et Technologies de Lille, F- 59655 Villeneuve d'Ascq, France, 2008.
- Ocak I, "Environmental effects of tunnel excavation in soft and shallow ground with EPBM: The case of Istanbul", Environmental Earth Science, 2009, 59, 347-352.
- Ranjbarnia M, Rahimpour N, "Application of the Stress-Strain Curve of Rock Mass to Estimate the Convergence of Deep Circular Tunnels", Journal of Civil and Environmental Engineering, 2018, 47.4 (89), 1-13.
- Sharghi M, Chakeri H, Ozcelik Y, "Investigation into the effects of two component grout properties on surface settlements", Tunneling and Underground Space Technology, 2017, 63, 205-216.
- The urban and suburban trains, Isfahan, <http://new.isfahan.ir>, 2011.
- Vahdatirad MJ, Ghodrat H, Firuzian S, Barari A, Torabi M, "Analysis of underground market settlement in Tabriz urban railway", European Journal of Scientific Research, 2009, 36, 595-605.

EXTENDED ABSTRACT

Study of the Effect of Cross-sectional Geometry of Single and Twin Tunnels on the Ground Surface Settlement (Case study: Isfahan's Metro Tunnel)

Mohammad Amiri^{a,*}, Saeed Rajabi^b, Mahdieh Darabi^c

^a University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas

^b Islamic Azad University Isfahan (Khorasgan) University, Faculty of Engineering

^c Bu-Ali Sina University, Faculty of Engineering

Received: 04 November 2017; Accepted: 15 July 2018

Keywords:

Settlement, Instrumentation, Cross-sectional Geometry, Twin Tunnel.

1. Introduction

Worldwide, rapid population growth in major cities has resulted in increased pressure on existing transportation systems. With underground transportation systems already in place, newly constructed tunnels might be needed to construct in close proximity to each other to make efficient use of the underground space (Baziar et al., 2016; Maleki, 2001). With population growth and urbanization, opening metro tunnels is an effective method for reducing traffic congestion in urban areas. Metro tunnels tend to be in the form of twin tunnels and close to each other or urban infrastructures. In these conditions, the interaction between tunnels and consequently their effects on subsurface movements, ground surface settlement, distribution of induced stresses and properties of tunnel lining are the most important factors that must be considered in tunnel design. Consequently, the above listed parameters have been studied by using a variety of approaches, including in situ observation, physical model testing and numerical modeling (Peck 1969; and Ranken, 1977; Karakus et al. 2007, Talebinejad et al. 2014; Yasitli, 2014).

Tunnels are widely used in hydropower, transportation, mining and other applications, and twin tunnels are becoming common seen due to the rapid development worldwide. On this regard, tunnel safety is of utmost priority in tunnel engineering, and liners are usually used. Nevertheless, gravity and tectonic stress of strata, tunnel excavations and liner applications lead to multiple stress and fields displacement. It is significant to correctly predict such fields for safe tunnel constructions (Havaej et al., 2004; Sharghi et al., 2017).

Studies have been undertaken to consider the effects of twin tunnel construction on tunnel lining stress and ground surface settlement. Peck (1969) developed a semi-empirical model to predict the surface settlement of closely-spaced tunnels in soft clay. Physical modeling of this theory was tested by Kim, Burd, and Milligan (1998), showing that there is an effect on the ground surface settlement. In Japan, Yamaguchi, Yamazaki, and Kiritani (1998) reported a change in the lining stress of an existing tunnel, owing to the construction of a new adjacent tunnel. For closely-spaced tunnel construction, ground surface settlement and lining stress have increased influence by superimposition effects, as compared with single tunnel construction. Hefny, Chua, and Zhao (2004) identified numerous factors affecting the critical distance between twin tunnels, primarily using circular bored tunnels. Critical distance refers to the capacity of adjacent tunnels to accommodate change in structural loadings, combined with the criteria for settlement above the tunnels.

The selection of the tunnel cross-sectional shape and the evaluation of the amount of settlement caused by tunneling operations are important issues in the design and construction of single and twin metro tunnels. The tunnel cross-sectional shape must fulfill the settlement requirement, and also provide adequate strength

* Corresponding Author

E-mail addresses: amirii@hormozgan.ac.ir (Mohammad Amiri), civil.eng.sr64@gmail.com (Saeed Rajabi), darabi198@yahoo.com (Mahdieh Darabi).

against the imposed stresses, shear strains, and displacements. On the other hand, the accuracy of the results obtained by numerical models can be assessed using the accurate tools and this guarantees the success of large-scale projects. Selecting the tunnel cross-sectional shape and assessing the settlement caused by tunneling operations are important steps to design and construction of single and twin metro tunnels. Although the tunnel cross-sectional shape not only must fulfill the settlement requirement, it also must provide adequate strength against the imposed stresses, shear strains, and displacements. The process of tunnel design requires proper estimation of the ground deformations. Depending on the method of boring and support, tunneling can cause some degree of settlement at the ground level. Tunneling usually causes some horizontal and vertical deformations in the ground, which tends to propagate toward the surface as the operation progresses. According to studies, Isfahan's metro system consists of five lines. The first line that to be opened in the first phase is the North-South line starting at the Kaveh passenger terminal and ending at the Soffeh station; this line is 12.5 km long, of which about 12 km is underground and has a total of 15 stations. Isfahan's metro tunnels are designed in the form of two-arch tunnels which accommodate two separate rail tracks and have a middle diameter (D) of 7 meters and a center to center distance of at least 11 meters and at most 21 meters depending on location. Tunnels will be built at a depth of 15 meters. The underground water level is at a depth of about 3 meters from the ground surface. The main objective of this study was to evaluate the effect of tunnel geometry on the size of ground settlement in single and twin tunnels.

2. Methodology

This study aimed to evaluate the effect of cross-sectional geometry of single and twin tunnels on ground surface settlement with the case study of Isfahan metro system. Given that soil consists of particles with a wide variety of sizes, a FLAC 2D software was used for modeling the tunnels. In this regard, Isfahan metro modeling was performed using three different geometries. Moreover, four different distances of lines were evaluated.

According to studies, Isfahan's metro system consists of five lines. The first line that to be opened in the first phase is the North-South line starting at the Kaveh passenger terminal and ending at the Soffeh station; this line is 12.5 km long, of which about 12 km is underground and has a total of 15 stations. Isfahan's metro tunnels are designed in the form of two-arch tunnels which accommodate two separate rail tracks and have a middle diameter (D) of 7 meters and a center to center distance of at least 11 meters and at most 21 meters depending on location. Tunnels will be built at a depth of 15 meters. The underground water level is at a depth of about 3 meters from the ground surface. The main objective of this study was to evaluate the effect of tunnel geometry on the size of ground settlement in single and twin tunnels. The geometric characteristics of the metro tunnel section of Isfahan are shown in Fig. 1.

This objective is pursued by the use of finite difference software, FLAC 2D, for modeling the tunnels. In this investigation, the effects of center-to-center distance of adjacent tunnels and the tunnel cross-sectional shape on the ground settlement are evaluated. In this study to achieve this purpose, first, Isfahan's metro tunnel was modeled and then the validity of the model was assessed by comparing the results for three points on the Western tunnel with the results of instrumentation.

Based on sampling and laboratory studies carried out in the direction of Sofeh-Azadi, there are a number of rocks with different materials. But the dominant genus of the rocks is shale and sandstone alternation, and is represented by the Jess symbol. Also, the alluvial layer is about 4 meters thick on the body. Geotechnical specifications of materials are presented in Table 1. The behavioral model used in the design is Moore-Coulomb's behavioral model. The reason for using this model is simple and determinable physical parameters. It is worth noting that the Moore-Columbus model has been widely used in geotechnical engineering issues and therefore has a good reputation.

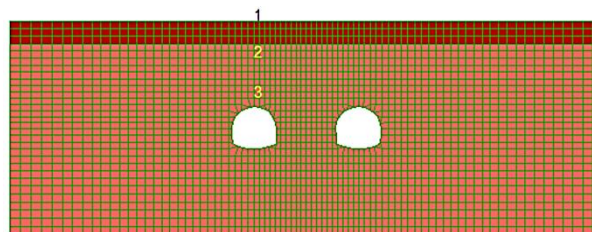


Fig. 1. The proposed model of the Isfahan metro tunnel and the location of the desired instrument

Table 1. Geotechnical properties of soil sample of Metro tunnel in Isfahan

Material	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	ν	E (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ
Alluvium	17	18	0.4	$5 \cdot 10^{45}$	60	25
Jssh	26	27	0.32	$2.7 \cdot 10^{46}$	177	41

3. Discussion and Conclusion

The settlement results obtained by the software were validated by comparing the results obtained by instrumentation in three points on the western tunnel. According to the results of this study, the highest and lowest amount of ground surface settlements results from horseshoe shaped cross-section and the circular, two-arched cross-section tunnels, respectively. On the other hand, increasing the distance of twin tunnels leads to a slight decrease in settlement (5%). Moreover, an increase in center-to-center distances over three times of the tunnels diameter (20 meters), causes no significant changes in settlement.

In Fig. 2, the surface of the ground for two single and twin tunnels (For center-to-center distances of 10 meters) is plotted and the results are compared. As can be seen, in excavating a twin tunnel, the ground level is more than single tunnel drilling. The maximum ground level settlement in single tunnel mode occurred right above the tunnel and at ground level at 8.96 mm. In the drilling mode, the twin tunnel maximum seating right in the central axis passes through the middle of the tunnel and above the ground level 9.99 mm occurred.

According to the results of this study, the peak ground surface settlements resulting from twin tunnels with center-to-center distances of 10, 14, 20 and 25 meters were 9.893, 9.479, 9.290, and 9.268 millimeters, respectively. These results showed that increasing in the center-to-center distance of twin tunnels can lead to a slight decrease in settlement. For center-to-center distances of over 20 meters, an increase in this distance showed no significant changes in the settlement.

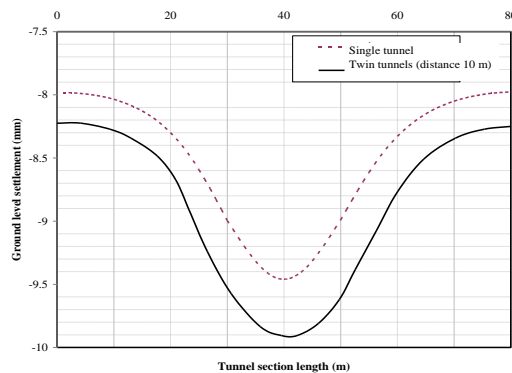


Fig. 2. Comparison of Ground Level settlement in Single and Twin Tunnels

4. Conclusion

The results also showed that the peak settlement resulted from a single tunnel takes place just above the tunnel at the ground level, and the peak settlement resulted from twin tunnels takes place at the central axis between the two tunnels at the ground level. The peak ground surface settlement resulted from a single tunnel was about 9.45 millimeters and the peak settlement resulted from twin tunnels was 10.45 millimeters. According to the results of tunnel cross-sectional shape showed that a horseshoe shape cross-section causes the most settlement and horizontal displacement at the ground level, but circular and two-arched cross-sections cause a slightly lower settlement and horizontal displacement. As a result, two-arch tunnel consists of the best response and horseshoe tunnel has the worst response in terms of settlement and horizontal displacement.

5. References

- Baziar MH, Rabeti Moghadam M, Kim DS, Choo YW, "Effect of underground structures on the acceleration response of the structure lining flexibility on the acceleration response at the ground surface", *Sharif Civil Engineering*, 2016, 31 (2), 79-89.
- Fang O, Tai Q, Zhang D, Ngai L, Wong Y, "Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements", *Tunneling and Underground Space Technology*, 2016, 51, 144-151.
- Havaej M, Rahmannedjad R, Ebrahimi Farsangi MA, "An Equation to Predict Ground Surface Settlement, due to Metro Tunneling Using EPB TBM. (Case Study: Shiraz Metro)", *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*, 2004, 2 (2), 87-100.
- Maleki M, "Choose a behavioral model in the design and calculation of tunnels", 5th Iranian Tunneling Conference, Tehran, 2001, 147-152.
- Moller S, "Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings", Doctoral Thesis, Institute for Geotechnics, Stuttgart University, 2006.
- Sharghi M, Chakeri H, Ozcelik Y, "Investigation into the effects of two component grout properties on surface settlements", *Tunneling and Underground Space Technology*, 2017, 63, 205-216.