

مطالعه پارامتریک اثر حفاری تونل‌های نعل اسبی بر نشست ماکزیمم سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل

محمدرضا علمدار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
محمد آزادی*، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

چکیده

به طور کلی محیط زمین در ابتدا تحت فشار ناشی از تنش‌های طبیعی می‌باشد که هرگونه دست خوردگی مانند حفر تونل این وضعیت تنش را مختل کرده و سبب پدید آمدن تغییر مکان‌هایی در سطح زمین می‌شود. اگر این تغییر مکان‌ها در محدوده استاندارد نباشند، موجب بروز مشکلاتی در ساختارهای سطحی و زیرسطحی می‌شوند و گاهی خسارت‌های زیادی را به دنبال دارند. حین حفر تونل، پارامترها و کمیت‌های مختلفی بر مقادیر نشست سطح زمین تاثیرگذار است که از جمله می‌توان به چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته، قطر تونل، عمق قرارگیری تونل و فاصله تونل‌ها از هم اشاره نمود. در این پژوهش میزان تاثیر هر یک از پارامترهای ذکر شده، مورد محاسبه و بررسی قرار می‌گیرد. باتوجه به نتایج بدست آمده، با افزایش چسبندگی، مدول الاستیسیته و عمق قرارگیری تونل، نشست سطح زمین کاهش یافته و با افزایش زاویه اصطکاک و قطر تونل، نشست افزایش یافته است. نتایج بدست آمده با استفاده از نمودار و جدول به تفصیل بیان شده است و نتایج حاصله حاکی از تاثیر بسیار زیاد این پارامترها بر نشست سطح زمین و نیروهای داخلی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تونل، نشست سطح زمین، نیروهای داخلی، پارامترهای مکانیکی خاک

۱- مقدمه

الاستیک، الاستوپلاستیک و الاستو ویسکو پلاستیک را نام برد. مدل‌های الاستیک می‌توانند خطی یا غیرخطی باشند. خاکها در مدل‌های الاستو پلاستیک در تنش‌های پایین بصورت الاستیک عمل می‌کنند و در تنش‌های بالاتر شروع به گسیخته شدن می‌کنند و اصطلاحا پلاستیک می‌شوند. اغلب مسائل ژئوتکنیکی در یک محیط تقریبا بی‌نهایت اتفاق می‌افتند. لذا مدلی که برای بررسی سیستم واقعی استفاده می‌شود باید به گونه‌ای ساخته شود که بتواند تا حد امکان هندسه نیمه بینهایت سیستم را شبیه سازی کند. محدوده مدل هندسی، مستطیلی شکل است و در دو ضلع کناری اجازه تغییر مکان قائم دارد در حالی که ضلع پایینی در جهت قائم و افقی بسته است. بسته بودن ضلع پایینی مدل، در حقیقت نشانگر بستر سنگی است. باتوجه به اینکه

در این پژوهش با مطالعه و بررسی‌های متعدد و با کمک نرم افزار پلکسیس دوبعدی در مورد ویژگیهای نشست سطح زمین در اثر حفر تونل نعل اسبی، کوشش شده است که ارتباطی بین تغییرشکل و جابجایی زمین و نیروهای داخلی با مشخصه‌هایی نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته، قطر و عمق تونل و فاصله تونل‌ها از هم به دست آید و باتوجه به تحلیل‌های صورت گرفته، نشان داده شده است که چه پارامترهایی و تا چه اندازه می‌توانند در موارد ذکر شده موثر باشند. حل مساله بصورت کرنش صفحه‌ای و تونل با مقطع نعل اسبی می‌باشد. معمولا محیط‌های خاکی دارای خواص بسیار متفاوت و تنوع رفتار هستند. مدل‌های رفتار بسیاری برای خاکها تعریف شده است که از جمله می‌توان مدل‌های

در خاک در اثر حفر تونل نشست‌هایی ایجاد می‌شود، در حالتی که تونل هیچ‌گونه پوششی نداشته باشد این تغییر شکل‌ها بسیار زیاد بوده و حتی ممکن است تونل ناپایدار باشد. با استفاده از پوشش تونل می‌توان تغییر شکل‌های تونل را به مقادیر مجاز کاهش داد و تونل را به حد پایداری رساند بنابراین در مدل ساخته شده پوشش بتنی به ضخامت ۳۰ سانتیمتر برای تونل در نظر گرفته شده است.

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

تحقیقات زیادی جهت تعیین میزان نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل صورت گرفته که در یکی از آنها اثر حفاری تونل دایره‌ای بر نشست سطح زمین در تونل تکی و دوقلو بررسی شده و در نهایت فرمولی جهت محاسبه نشست برای تونل‌های تکی و دوقلو ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده بیشترین مقدار نشست در بالای تاج تونل رخ می‌دهد و هرچه از تاج و محور تونل فاصله گرفته شود میزان نشست کم شده تا به صفر برسد. همچنین در این تحقیق مقدار نشست بر حسب زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است [Ling M et al ۲۰۱۴]. در تحقیق دیگری با توجه به مقادیر بدست آمده برای نشست و نیروهای داخلی و همچنین سطح آب زیرزمینی و نحوه قرارگیری موقعیت دوتونل نسبت به هم، ملاحظات اجرایی جهت لاینینگ دوتونل در کیلومترهای مختلف ارائه شده است [Qian et al ۲۰۱۵].

نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل‌های کم عمق در زمین‌های نرم، تحقیق دیگری است که انجام شده است. در این تحقیق براساس میزان نشست ماکزیمم سطح زمین، تونل‌ها در چهار کلاس طبقه شده‌اند. نتیجه این تحقیق این بوده که نشست ماکزیمم در بالای تاج تونل رخ می‌دهد [Dindarloo et al ۲۰۱۵]. تحقیق دیگری در چین با هدف کاهش اثر زیست محیطی ساخت تونل انجام شده و به بررسی میزان نشست در اثر ساخت تونل‌های با قطر بزرگ پرداخته است [Xiongyao et al ۲۰۱۶]. این در حالی

است که در تحقیق دیگری بر روی تونل‌های مترو در عمق ۹ تا ۱۲ متر در چین، میزان نشست در زمین‌های رسی نرم با سطح آب زیرزمینی بالا در طولانی مدت بررسی شده و نتیجه این بوده که نشست قابل توجهی پس از ۱۰ سال رخ می‌دهد [Shui-Long et al ۲۰۱۴]. همچنین در تحقیق دیگری اثر خواص مهم در نشست مانند عمق تونل، فشار و قطر تونل با استفاده از روش‌های تجربی، تئوری و عددی و با هدف کنترل نشست سطحی، بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این روش‌ها با اطلاعات بدست آمده از مشاهدات عینی مقایسه شده است [Chakeri et al ۲۰۱۳].

تحقیقات دیگری که در این زمینه انجام شده، بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف از جمله ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و دانسیته خاک بر نشست سطح زمین و تاج تونل بوده که با افزایش ضریب پواسون و دانسیته خاک، نشست افزایش یافته و با افزایش مدول الاستیسیته، نشست کاهش یافته است [کاتبی و همکاران ۱۳۸۹]. در تحقیق دیگری، با مدل سه بعدی سازه و تونل با نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر هندسه سازه بر نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل به روش اتریشی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج، لزوم استفاده از مدل‌های سه بعدی در اندرکنش سازه- تونل را برجسته تر ساخته است [رضایی و همکاران ۱۳۹۰].

بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل در مناطق شهری عنوان تحقیق دیگری است که مطالعه موردی تونل قطار شهری اهواز می‌باشد. یکی از عوامل اصلی برای به حداقل رساندن تاثیرات زیان آور احتمالی نشست زمین بر روی سازه‌های موجود و محیط، توانایی پیش بینی پروفیل نشست زمین می‌باشد. هدف از انجام این طرح تحقیقاتی نیز در واقع بررسی و پیش بینی وضعیت نشستهای سطحی زمین حاصل از حفر تونل خط یک قطار شهری اهواز در مقطعی واقع در ایستگاه فرودگاه است که از نرم افزار

پلکسیس به دلیل قابلیت‌های مناسب و اعتبار نتایجی که در محیط‌های خاکی دارد، استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که نرم افزار عددی المان محدود پلکسیس ابزاری مناسب برای پیش بینی نشست می‌باشد و می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد [جعفری و همکاران ۱۳۹۲].

۳- مدل سازی و مدل مینا

محدوده در نظر گرفته شده برای مدل، محدوده‌ای با ابعاد ۱۴۰x۷۰ می‌باشد که سه لایه خاک در این محدوده تعریف شده است. لایه اول شامل خاک دستی و به ضخامت ۳ متر، لایه دوم شامل خاک رس و به ضخامت ۲۲ متر و لایه سوم شامل ماسه و به ضخامت ۴۵ متر می‌باشد. در ابتدا یک مدل پایه یا مینا که مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک و هندسه تونل آن در جداول ۱ و ۲ بیان شده، برای تونل‌های تکی، دوقلو و سه قلو ساخته

می‌شود که از این مدل در تفسیر و نرمالیزه کردن نتایج استفاده می‌شود. اشکال ۱ تا ۳ لایه‌های خاک و نحوه قرارگیری تونل‌ها را نمایش می‌دهد.

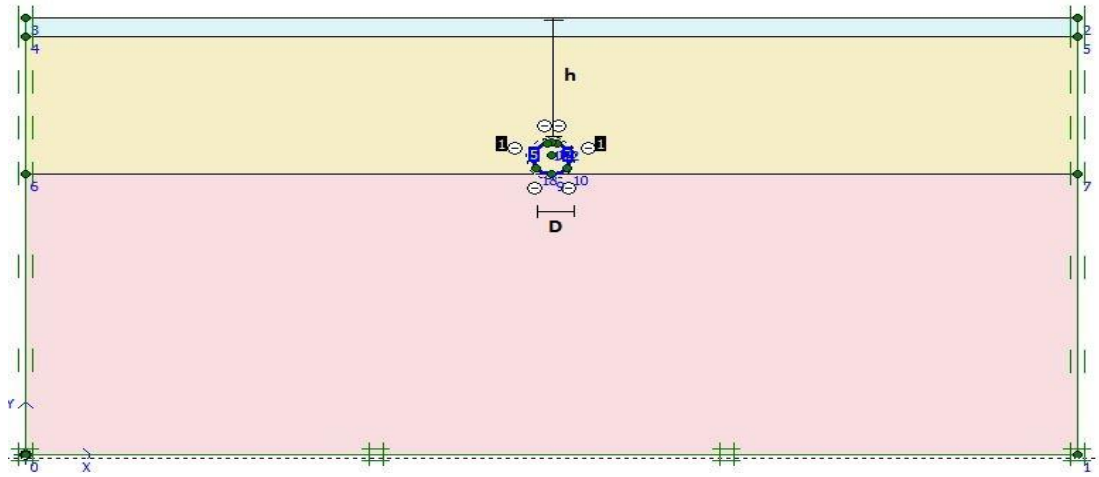
مدل ساخته شده با استفاده از المان ۱۵ گره‌ای مثلثی، المان بندی شده است که این المان بندی در اطراف تونل جهت انجام تحلیل دقیق‌تر، دارای ابعاد کوچکتری است و هرچه از تونل فاصله گرفته شود ابعاد المان درشت تر می‌شود. همچنین در این پژوهش از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. پس از اتمام مرحله مدل سازی و المان بندی، نرم افزار وارد مرحله تحلیل و محاسبه می‌شود و مدل ساخته شده را تحلیل می‌نماید و خروجی‌ها را در قالب عدد و جدول و نمودار ارائه می‌دهد. کمیت‌های خروجی اصلی محاسبه المان محدود، تغییر مکان در گره‌ها و تنش‌ها در نقاط تنش می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک در مدل مینا

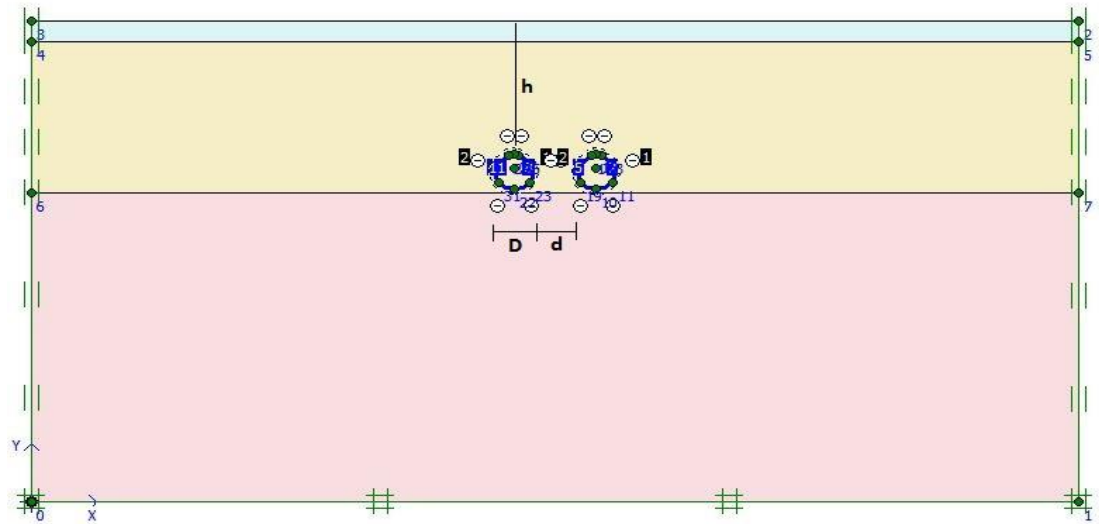
نام لایه	Y_{unsat} kN/m ^۳	Y_{sat} kN/m ^۳	E kN/m ^۲	Φ °	ν	C kN/m ^۲	k_x m/s	K_y m/s	Ψ °
خاک دستی	۱۸	۲۱	۱۵۰۰۰	۲۳	۰/۳۵	۱۵	۱e-۵	۲e-۶	۰
خاک رس	۱۹	۲۱	۲۶۰۰۰	۲۵	۰/۳۵	۳۰	۱/۲e-۸	۲/۵e-۹	۰
ماسه	۲۰	۲۱	۶۰۰۰۰	۳۵	۰/۳	۵	۲/۵e-۳	۲/۵e-۴	۵

جدول ۲. مشخصات تونل‌ها در مدل مینا

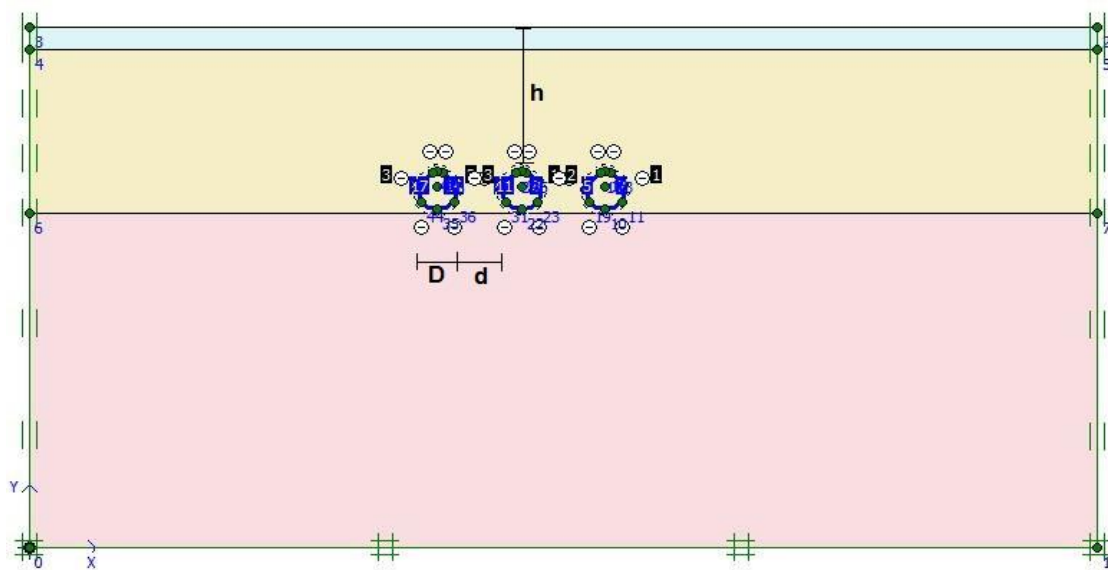
نوع تونل	عمق قرارگیری تونل (متر) h	فاصله تونل‌ها از هم (متر) d
تونل نعل اسبی تکی	۲۰	---
تونل نعل اسبی دوقلو	۲۰	۶
تونل نعل اسبی سه قلو	۲۰	۶



شکل ۱. نمایش تونل تکی در مدل مینا



شکل ۲. نمایش تونل دوقلو در مدل مینا



شکل ۳. نمایش تونل سه قلو در مدل مینا

۴- بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر نشست

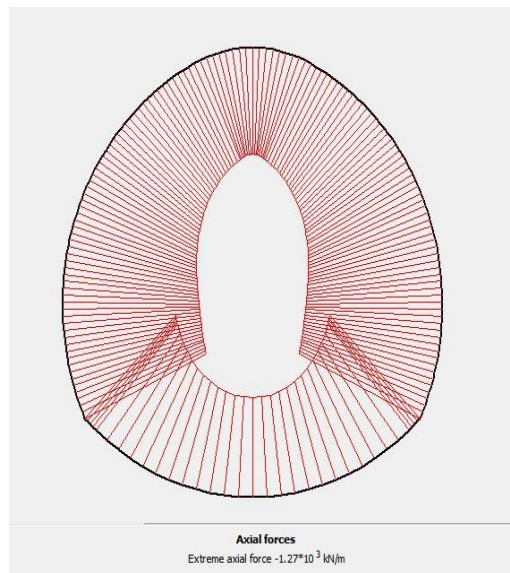
سطح زمین و نیروهای داخلی

پارامترهای تاثیرگذار بر نشست سطح زمین و نیروهای داخلی، پارامترهای مکانیکی خاک مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته و پارامترهای هندسی تونل مانند قطر تونل، عمق قرارگیری تونل و فاصله تونل‌ها از هم می‌باشد که در ادامه تحلیل‌های انجام شده

برای هریک از پارامترها و نتایج بدست آمده تشریح می‌گردد. نتایج بدست آمده برای مدل مینا در تونل‌های تکی، دوقلو و سه قلو در جدول ۳ آورده شده است. اشکال ۴ تا ۷ به ترتیب نشست سطح زمین، نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی را که از تحلیل و محاسبه نرم افزار بدست آمده‌اند، نمایش می‌دهد.

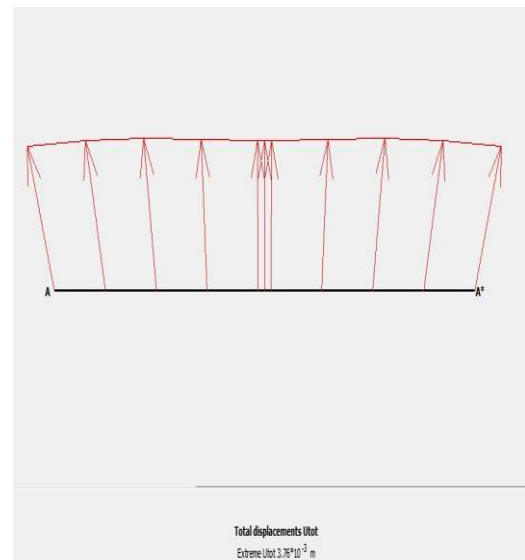
جدول ۳. نتایج به دست آمده برای مدل مینا

خروجی‌ها			ورودی‌ها							
لنگر خمشی kN.m/m	نیروی برشی kN/m	نیروی محوری kN/m	نشست میلی متر	ضریب پواسون	عمق قرارگیری m	قطر تونل m	مدول الاستیسیته kN/m ²	زاویه اصطکاک °	چسبندگی Kpa	نوع تونل
۲۴۰	۳۱۹/۶۴	۹۸۲/۶۲	۲/۳	۰/۳۵	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰	تونل تکی
۲۳۱/۷۸	۳۱۰/۲۴	۹۶۱/۳۱	۴/۸	۰/۳۵	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰	تونل دوقلو
۲۳۰/۳۱	۳۰۸/۹۲	۹۵۹/۹۶	۶/۹۷	۰/۳۵	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰	تونل سه قلو



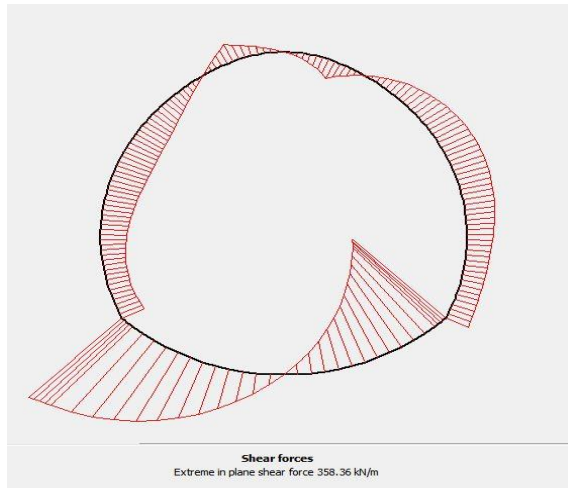
Axial forces
Extreme axial force $-1.27 \cdot 10^3$ KN/m

شکل ۵. نمایش نیروی محوری



Total displacement Utot
Extreme Utot $3.76 \cdot 10^{-3}$ m

شکل ۴. نمایش نشست سطح زمین



Bending moments
Extreme bending moment ۳۲۵.۰۰ KN.m/m

شکل ۷. نمایش لنگر خمشی

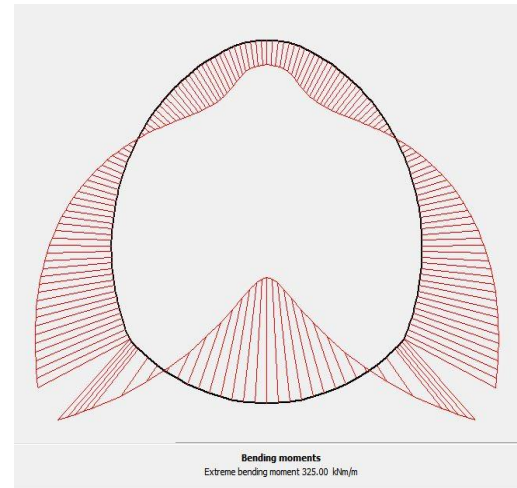
تکی، دوقلو و سه قلو، نیروی محوری ۳٪ کاهش یافته ولی نیروی برشی ۲۹٪ و لنگر خمشی ۵۰٪ افزایش یافته است. شکل ۹ نمودار نرمالیزه شده اثر تغییرات زاویه اصطکاک بر لنگرخمشی در تونل تکی، دوقلو و سه قلو را نمایش می‌دهد. در این نمودار لنگرخمشی به لنگرخمشی مبنا تقسیم شده است.

۴-۳- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته از ۱۰ تا ۳۰ مگانیوتن و در بازه پنج هزارتایی تغییر داده شده که در تونل‌های تکی، دوقلو و سه قلو، نشست ۲۸٪، نیروی برشی ۷٪ و لنگر خمشی ۱۴٪ کاهش یافته اند ولی تاثیر زیادی بر نیروی محوری نداشته است. نتایج به دست آمده برای تونل تکی در جدول ۴ آورده شده است.

۴-۴- قطر تونل

قطرتونل از ۳ تا ۱۰ متر تغییر داده شده و در هر بار تغییر میزان نشست و نیروهای داخلی محاسبه شده است. با افزایش قطر در تونل تکی، نشست از ۰/۴ به ۳/۹ میلی متر، نیروی محوری از ۴۸۰ به ۱۶۰۰ کیلونیوتن بر متر، نیروی برشی از ۱۷۶ به ۴۲۹ کیلونیوتن بر متر و



Shear forces
Extreme in plane shear force ۳۵۸,۳۶ KN/m

شکل ۶. نمایش نیروی برشی

۴-۱- چسبندگی

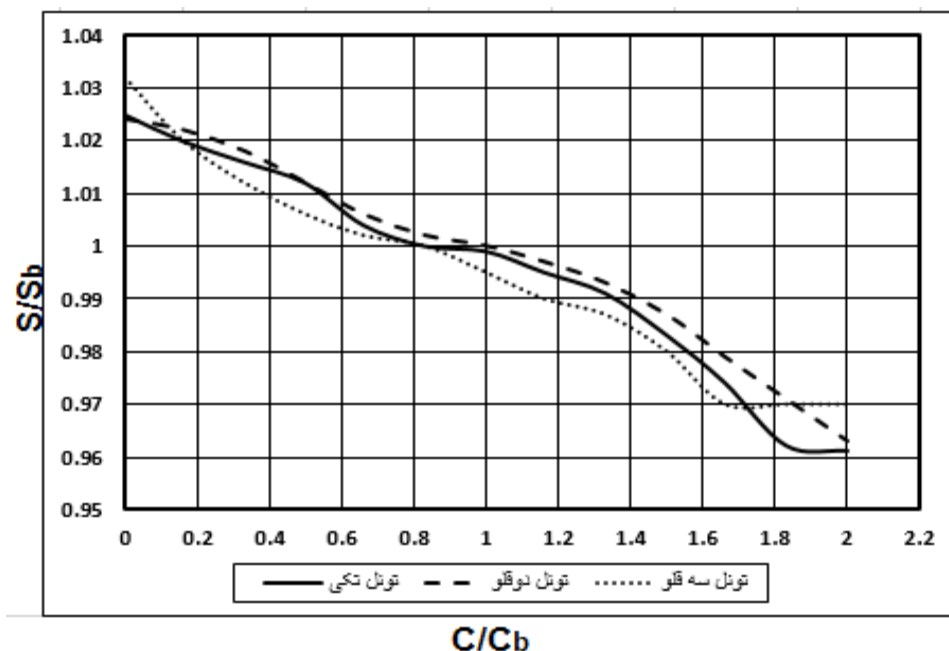
مقدار چسبندگی از صفر تا ۶۰ کیلوپاسکال و در بازه پنج تایی تغییر داده شده و در هر بار تغییر میزان نشست سطح زمین و نیروهای داخلی محاسبه شده است. با افزایش چسبندگی از صفر تا ۶۰ کیلوپاسکال، نشست سطح زمین در تونل تکی ۶/۵٪، در تونل دوقلو ۶٪ و در تونل سه قلو ۵٪ کاهش یافته است ولی تاثیر زیادی بر نیروهای داخلی نداشته است. شکل ۸ نمودار نرمالیزه شده اثر تغییرات چسبندگی بر نشست سطح زمین در تونل تکی، دوقلو و سه قلو را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار چسبندگی به چسبندگی مدل مبنا تقسیم شده و میزان نشست نیز به نشست مدل مبنا تقسیم شده است.

۴-۲- زاویه اصطکاک

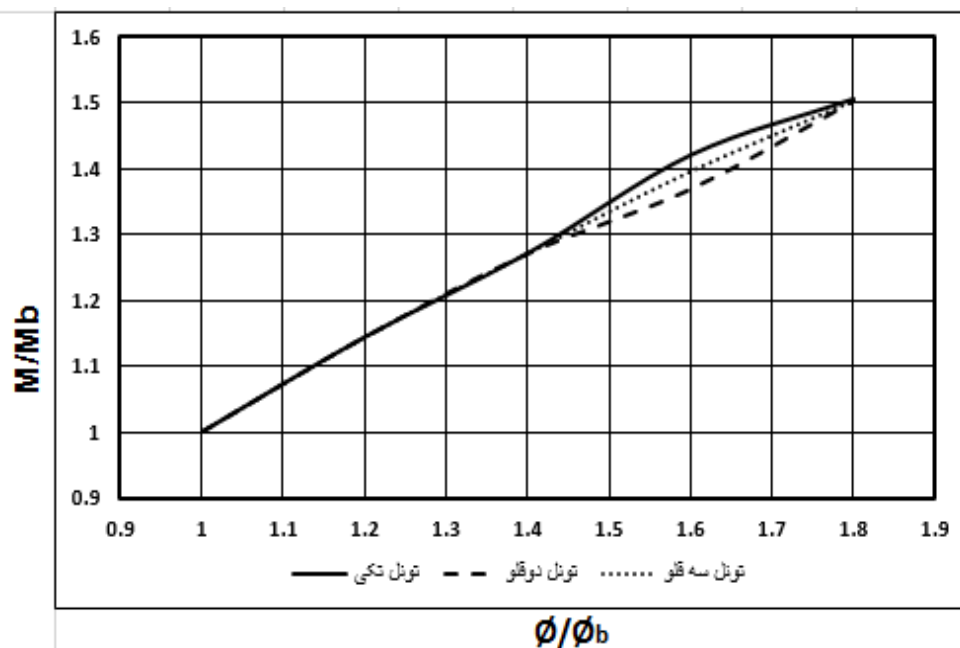
زاویه اصطکاک از ۲۵ تا ۴۵ درجه و در بازه پنج تایی تغییر داده شده است. با افزایش زاویه اصطکاک به میزان ۸۰٪، نشست در تونل تکی از ۲/۳ به ۲/۹ میلی متر، در تونل دوقلو از ۳/۵۶ به ۴/۸۸ میلی متر و در تونل سه قلو از ۶/۹ به ۷/۹ میلی متر رسیده است که این امر به دلیل کاهش ضریب تنش افقی (k_0) با افزایش زاویه اصطکاک می‌باشد و با کاهش تنش افقی و ثابت بودن تنش قائم، نشست سطح زمین افزایش می‌یابد. همچنین در تونل‌های

برمتر، نیروی برشی ۱۸۰ به ۳۵۱ کیلونیوتن برمتر و لنگرخمشی از ۷۴ به ۳۴۵ کیلونیوتن درمتر رسیده است. شکل ۱۰ نمودار نرمالیزه شده اثر تغییرات قطر تونل بر نشست سطح زمین و شکل ۱۱ نمودار نرمالیزه شده اثر تغییرات قطر تونل بر نیروی برشی در تونل تکی، دوقلو و سه قلو را نشان می‌دهد.

لنگرخمشی از ۷۲ به ۴۱۳ کیلونیوتن درمتر رسیده است. با افزایش قطر تونل از ۳ تا ۱۰ متر در تونل دوقلو، نشست از ۰/۸ به ۳/۹ میلی متر، نیروی محوری از ۵۰۴ به ۱۶۱۰ کیلونیوتن برمتر، نیروی برشی از ۱۸۴ به ۴۲۲ کیلونیوتن برمتر و لنگرخمشی از ۷۵ به ۴۱۵ کیلونیوتن در متر رسیده است. همچنین در تونل سه قلو، نشست از ۱/۶ به ۱۹/۴ میلی متر، نیروی محوری از ۴۹۳ به ۱۴۱۰ کیلونیوتن



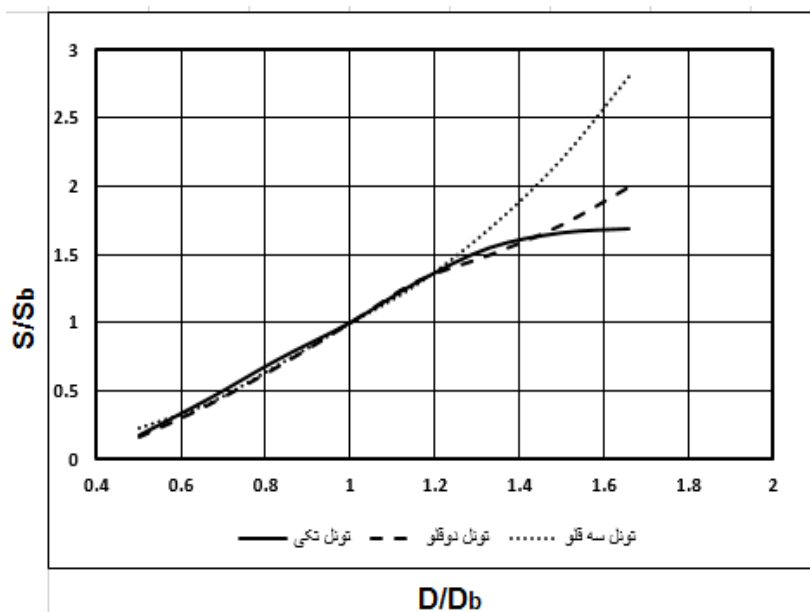
شکل ۸. نمودار اثر تغییرات چسبندگی بر نشست سطح زمین در تونل تکی، دوقلو و سه قلو



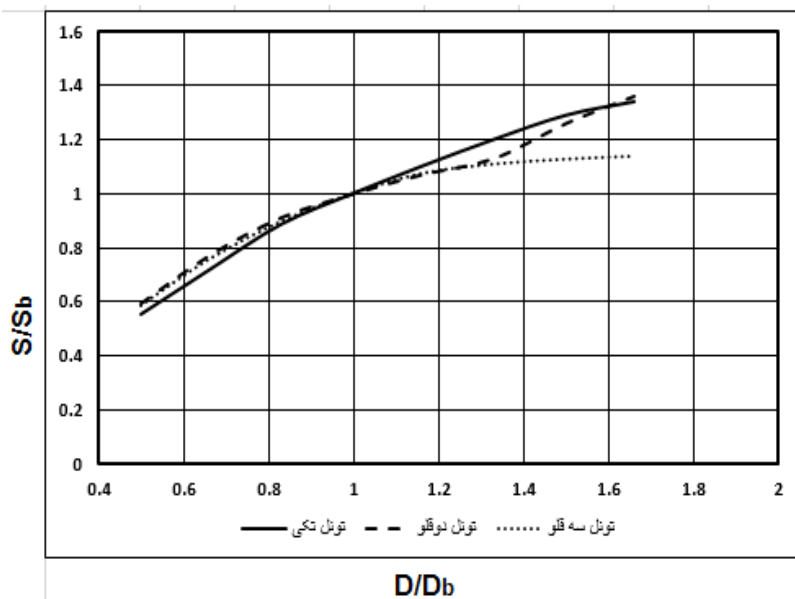
شکل ۹. اثر تغییرات زاویه اصطکاک بر لنگرخمشی در تونل تکی، دوقلو و سه قلو

جدول ۴: اثر تغییرات مدول الاستیسیته بر نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در تونل تکی

خروجی ها			ورودی ها						
لنگر خمشی kN.m/m	نیروی برشی kN/m	نیروی محوری kN/m	نشست mm	ضریب پواسون	عمق قرارگیری m	قطر تونل m	مدول الاستیسیته kN/m ²	زاویه اصطکاک °	چسبندگی KPa
۲۶۸/۲۹	۳۳۹/۷۱	۹۹۰/۱۹	۳/۲	۰/۳۵	۲۰	۶	۱۰۰۰۰	۲۵	۳۰
۲۵۷/۵۶	۳۳۲/۳	۹۸۷/۱	۲/۷	۰/۳۵	۲۰	۶	۱۵۰۰۰	۲۵	۳۰
۲۴۸/۷۵	۳۲۶/۰۵	۹۸۴/۷۶	۲/۵	۰/۳۵	۲۰	۶	۲۰۰۰۰	۲۵	۳۰
۲۴۰	۳۱۹/۶۴	۹۸۲/۶۲	۲/۳	۰/۳۵	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۲۳۴/۹۹	۳۱۵/۸۸	۹۸۱/۵	۲/۳	۰/۳۵	۲۰	۶	۳۰۰۰۰	۲۵	۳۰



شکل ۱۰. اثر تغییرات قطر تونل بر نشست سطح زمین در تونل تکی، دو قلو و سه قلو



شکل ۱۱. اثر تغییرات قطر تونل بر نیروی برشی در تونل تکی، دو قلو و سه قلو

۴-۵- عمق قرارگیری تونل

تا ۱۲ متر و در بازه دوتایی تغییر داده شده و در هر بار تغییر نشست سطح زمین محاسبه شده است. با افزایش فاصله تونل‌ها از هم، نشست سطح زمین کاهش می‌یابد یعنی در تونل دوقلو نشست سطح زمین از ۱۶/۸۶ به ۴/۶ میلی متر و در تونل سه قلو نشست از ۱۶/۸۶ به ۱۴/۷۴ رسیده است ولی تاثیر زیادی بر نیروهای داخلی ندارد. بنابراین انتخاب فاصله مناسب و بهینه برای تونلها در تونلهای دوقلو و سه قلو می‌تواند نشست سطح زمین را کاهش دهد. نتایج تحلیل‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

عمق قرارگیری تونل از ۵ تا ۴۵ متر و در بازه پنج تایی تغییر داده شده است. با افزایش عمق در تونل‌های تکی، دوقلو و سه قلو، نشست سطح زمین ۰/۹۷٪ کاهش یافته همچنین نیروی محوری ۰/۸۲٪، نیروی برشی ۰/۸۴٪ و لنگر خمشی ۰/۸۴٪ افزایش یافته اند که این به دلیل افزایش سربار می‌باشد. در جدول ۵ نتایج بدست آمده از تغییرات عمق قرارگیری تونل بر نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در تونل تکی آورده شده است.

۴-۶- فاصله تونل‌ها از هم

فاصله تونل‌ها از هم در تونل‌های دوقلو و سه قلو از ۶

جدول ۵. اثر تغییرات عمق قرارگیری تونل بر نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در تونل تکی

خروجی‌ها				ورودی‌ها					
لنگر خمشی kN.m/m	نیروی برشی kN/m	نیروی محوری kN/m	نشست mm	ضریب پواسون	عمق قرارگیری m	قطر تونل m	مدول الاستیسیته kN/m ²	زاویه اصطکاک °	چسبندگی KPa
۸۸/۲۹	۱۱۱/۳۵	۳۴۸/۳۴	۸/۲	۰/۳۵	۵	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۱۴۲/۸۱	۱۸۲/۲	۵۵۷/۶	۵/۴	۰/۳۵	۱۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۲۰۲/۷۵	۲۶۰/۷۷	۷۹۴/۹۹	۳/۴	۰/۳۵	۱۵	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۲۵۰/۴۵	۳۲۴/۶۲	۱۰۰۰	۲/۳	۰/۳۵	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۳۶۴/۷۶	۴۴۲/۳۹	۱۱۸۰	۱/۱	۰/۳۵	۲۵	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۴۲۰/۱۸	۵۱۱/۹۶	۱۳۷۰	۰/۷	۰/۳۵	۳۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۴۹۷/۹۳	۶۰۸/۱۵	۱۶۳۰	۰/۲	۰/۳۵	۳۵	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۵۵۶/۶۲	۶۸۰/۶	۱۸۳۰	۰	۰/۳۵	۴۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۶۲۷/۹۱	۷۶۸/۷۸	۲۰۶۰	۰	۰/۳۵	۴۵	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰

جدول ۶. اثر تغییرات فاصله تونل‌ها از هم بر نشست سطح زمین در تونل دوقلو و سه قلو

خروجی‌ها		ورودی‌ها						
نشست در تونل سه قلو mm	نشست در تونل دوقلو mm	ضریب پواسون	فاصله تونلها m	عمق قرارگیری m	قطر تونل m	مدول الاستیسیته kN/m ²	زاویه اصطکاک °	چسبندگی KPa
۱۶/۸۶	۴/۸۸	۰/۳۵	۶	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۱۵/۷۲	۴/۸۱	۰/۳۵	۸	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۱۵/۶۷	۴/۷	۰/۳۵	۱۰	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰
۱۴/۷۴	۴/۶	۰/۳۵	۱۲	۲۰	۶	۲۶۰۰۰	۲۵	۳۰

۵- نتیجه گیری

پس از انجام تحلیل‌های متعدد، نتایج بدست آمده که شامل اثر پارامترهای مختلف بر نشست سطح زمین و نیروهای داخلی حین حفاری تونل می‌باشد، به شرح ذیل می‌باشد:

۱- با افزایش چسبندگی، نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. بعنوان مثال در تونل تکی با افزایش چسبندگی به میزان ۱۰۰٪، نشست ۶/۵ درصد کاهش یافته که این نتیجه در مورد تونلهای دوقلو و سه قلو نیز صادق است. همچنین نیروی محوری افزایش یافته ولی تاثیر زیادی بر نیروی برشی و لنگر خمشی ندارد.

۲- در تونل تکی با افزایش زاویه اصطکاک به میزان ۸۰٪، نشست ۲۶٪ افزایش و نیروی محوری ۴٪ کاهش یافته همچنین نیروی برشی ۲۸٪ و لنگر خمشی ۵۰٪ افزایش یافته اند که این روند در تونل‌های دوقلو و سه قلو نیز به همین صورت بوده است.

۳- با افزایش مدول الاستیسیته از ۱۰ تا ۳۰ مگانیوتن برمترمربع، نشست ۲۸٪، نیروی برشی ۷٪ و لنگرخمشی ۱۲٪ کاهش یافته است ولی تاثیر زیادی بر نیروی محوری نداشته است. نتایج بدست آمده برای تونل‌های دوقلو و سه قلو نیز به همین شکل می‌باشد.

۴- با افزایش قطر تونل از ۳ تا ۱۰ متر، نشست در تونل‌های تکی ۹۰٪ افزایش یافته همچنین نیروی محوری ۶۹٪، نیروی برشی ۵۸٪ و لنگر خمشی ۸۲٪ افزایش یافته است. در تونل‌های دوقلو و سه قلو نیز این روند به همین ترتیب بوده است.

۵- با افزایش عمق قرارگیری تونل تا ۴۵ متر، در تونل‌های تکی همانند دوقلو و سه قلو نشست سطح زمین به میزان ۱۰۰٪ کاهش می‌یابد ولی نیروی محوری ۸۳٪، نیروی برشی ۸۵٪ و لنگر خمشی ۸۵٪ بدلیل افزایش سربار افزایش می‌یابند.

۶- با افزایش فاصله تونلها ازهم، در تونل دوقلو و سه قلو نشست سطح زمین کاهش می‌یابد که مقدار کاهش نشست در تونل دوقلو ۶٪ و در تونل سه قلو ۱۲٪ بوده

است ولی تاثیر زیادی بر نیروهای داخلی ندارد.

۶-مراجع

— Ling M, Lieyun D, Hanbin L. (۲۰۱۴), "Non-Linear description of ground settlement over twin tunnels in soil tunneling and Underground Space Technology", ۴۲: pp. ۱۴۴-۱۵۱.

— Qian F, Qimin T, Dingli Z, Louis N. (۲۰۱۵), "Ground surface settlement due to construction of closely-space twin Tunnels with different geometric arrangements. Tunneling and Underground Space Technology", ۵۱: pp. ۱۴۴-۱۵۱.

— Dindarloo S, Siami-Irdemoosa E. (۲۰۱۵), Maximum surface settlement based classification of shallow tunnels in soft ground tunneling and Underground Space Technology, ۴۹: pp. ۳۳۰-۳۳۷.

— [Xiongyao X, Yubing Y, Mei J. (۲۰۱۶), "Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a Large-diameter shield-driven tunnel in Shanghai, Chin Tunneling and Underground Space Technology", ۵۱: pp. ۱۲۰-۱۳۲.

— [Shui-Long S, Huai N, Yu-Jun C, Zhen-Yu Y. Long-Term (۲۰۱۴), "in soft deposits of shanghi tunneling and Underground Space Technology", ۴۰: pp. ۳۰۹-۳۲۳.

— Chakeri H, Yilmaz O, Bahtiyar U. (۲۰۱۳), "Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated. Tunneling and Underground Space Technology". ۳۶, pp. ۱۴-۲۳.

-کاتبی، ه. سعدین، م. (۱۳۸۹)، "تحلیل و پیش بینی نشست سطحی زمین ناشی از تونلسازی (مطالعه موردی: پروژه خط دو قطار شهری تبریز)". مهندسی حمل و نقل.

-رضایی، م. ناصحی، ع. (۱۳۹۰)، "اثر هندسه سازه بر روی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل به روش NATM اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه".

-جعفری، ح. پاکباز، م. (۱۳۹۲)، "بررسی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل در مناطق شهری (مطالعه موردی تونل قطار شهری اهواز)". اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک.

Parametric Study of the Effect of Excavated Horseshoe Tunnels on the Maximum Surface Settlement and Inner Forces of Tunnel Lining

M.R. Alamdar, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

M. Azadi, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

E-mail: azadimhmm@yahoo.com

Received: June ۲۰۱۶-Accepted: Sep. ۲۰۱۶

ABSTRACT

Generally, the Earth is under the force of actual stress and any disturbance such as tunnel excavation disarranges the stress condition and surface displacements. If these displacements are not in standard range, it can cause some problems in surface and lower level structures. At the time of tunnel excavation, some parameters such as cohesion, friction angle, elasticity modulus, tunnel diameter, and tunnel space affect the surface settlements and inner forces of tunnel lining. In this study, measured and examined effect of each of the above parameters. According to the analysis, increase in cohesion, elasticity modulus and tunnel depth cause the surface settlement decrease but increasing the friction angle or tunnel diameter cause surface settlement enhancement. The results are described in detail by graph and table and the results show a significant effect of these parameters on the surface settlement and inner forces.

Keywords: Tunnel, Earth Surface Settlement, Inner Forces, Soil Mechanical Parameters