

دو فصل نامه‌ی علمی - پژوهشی

تغییر

مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی

شماره‌ی ۱ - دوره‌ی ۱ / زمستان ۱۳۹۱

شاپا: ۳۱۱۱-۲۳۲۲

طراحی بهینه‌ی پوشش تونل با بتن الیافی پلیمری بر مبنای ظرفیت جذب انرژی
محمد صافی

تحلیل تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن رفتار نرم‌کنشی در ناحیه‌ی پلاستیک
احمد فهیمی‌فر؛ حامد قدمی؛ مسعود احمدوند؛ آروین عبدالملکی

بررسی تاثیر پارامترهای اجرایی ماشین TBM بر نرخ نفوذ آن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی - مطالعه‌ی
موردی تونل بلند زاگرس
سید مصلح افتخاری؛ علیرضا باغبانان؛ راحب باقرپور

طراحی پوشش سگمنتی تونل بلند انتقال آب سردشت با توجه به تاثیر مفاصل قطعات پوشش
حسن بخشنده امنیه؛ سعید طالبی سمیرمی؛ مرتضی رحیمی دیزجی

بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم - مطالعه‌ی موردی: تونل قطعه‌ی
شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران
رضا حیدری شیبانی؛ شکرالله زارع؛ حسین میرزائی نصیرآباد؛ محمد فروغی

توسعه‌ی پایدار شهری با استفاده از فضاهاى زیرسطحی - مطالعه‌ی موردی: محدوده‌ی میدان تجریش تهران
اصغر مولایی



به نام پروردگار دانش



نشریه علمی - پژوهشی

مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

سرفصل‌های پذیرش مقاله

پایش و رفتارسنجی
ملاحظات ایمنی و زیست‌محیطی
تعمیر و نگهداشت
تحلیل ریسک
قابلیت اطمینان
مدیریت ساخت

مطالعات میدانی
حفر فضاها
مدلسازی، طراحی و تحلیل پایداری
سامانه‌های نگهداری
سامانه‌های آب‌بندی
تأسیسات و خدمات فنی

اعتبار علمی - پژوهشی

نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، اعتبار علمی - پژوهشی خود را در تاریخ ۲۰ دی‌ماه ۱۳۹۱، طی نامه‌ی شماره‌ی ۳/۱۸/۲۱۲۱۳۲ از کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری دریافت نموده است.

مجوز انتشار

انتشار نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی در جلسه هیات نظارت بر مطبوعات به تاریخ ۲ بهمن‌ماه ۱۳۹۱ مورد موافقت قرار گرفته و وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی (معاونت امور مطبوعاتی و اطلاع‌رسانی)، مجوز انتشار نشریه در گستره‌ی ملی را طی نامه‌ی شماره‌ی ۹۱/۳۴۷۱۸ در تاریخ ۱۶ بهمن‌ماه ۱۳۹۱ صادر نموده است.

نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی در ویرایش فنی و ادبی مقاله‌ها آزاد است.
مسئولیت صحت علمی و اصالت مقاله‌ها به عهده‌ی نویسندگان است.

نشریه علمی- پژوهشی مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی

شماره ۱- دوره ۱- زمستان ۱۳۹۱

سردبیر: سید محمد اسماعیل جلالی
مدیر مسوول: احمد رمضانزاده
دبیر تخصصی: سیامک هاشمی
ویراستار انگلیسی: ابوالقاسم کامکار روحانی
ویراستار پارسی و کارشناس فنی: ملیحه داودآبادی
صاحبان امتیاز: دانشگاه صنعتی شاهرود و انجمن تونل ایران

گروه دبیران

محمد جواد جعفری (دانشگاه شهید بهشتی)	مصطفی شریفزاده (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
سید محمد اسماعیل جلالی (دانشگاه صنعتی شاهرود)	کوروش شهریار (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
حسین جلالی فر (دانشگاه شهید باهنر کرمان)	محمد فاتحی مرجی (دانشگاه یزد)
احمد رمضانزاده (دانشگاه صنعتی شاهرود)	احمد فهیمی فر (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
ژان ژائو (دانشگاه صنعتی فدرال لوزان - سوییس)	مرتضی قارونی نیک (دانشگاه علم و صنعت ایران)
فرهنگ سرشکی (دانشگاه صنعتی شاهرود)	سیامک هاشمی (انجمن تونل ایران)

گروه داوران این شماره

سید محمد اسماعیل جلالی (دانشگاه صنعتی شاهرود)	فرهنگ سرشکی (دانشگاه صنعتی شاهرود)
حسین جلالی فر (دانشگاه شهید باهنر کرمان)	مصطفی شریفزاده (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)
محمد فاروق حسینی (دانشگاه تهران)	حمیدرضا شعاعی (دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود)
احمد رمضانزاده (دانشگاه صنعتی شاهرود)	امید فروغ (موسسه مهندسی مشاور ساحل)
شکرالله زارع (دانشگاه صنعتی شاهرود)	ابوالقاسم کامکار روحانی (دانشگاه صنعتی شاهرود)
مسعود زارع نقدهی (دانشگاه صنعتی همدان)	سیامک هاشمی (انجمن تونل ایران)

نشانی: شاهرود، میدان ۷ تیر، بلوار دانشگاه، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، طبقه سوم،

دفتر نشریه مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی

کدپستی: ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱ - صندوق پستی: ۳۱۶

شماره همراه: ۰۹۳۳ ۷۴۴ ۲۶۷۷

تلفن و دورنگار: ۰۷ ۳۵ ۳۳۹-۰۲۷۳ - سامانه پیامک: ۳۰۰۰۵۲۷۳۳۳

وبگاه: <http://tuse.shahroodut.ac.ir>

رایانامه: tuse@shahroodut.ac.ir

فهرست

- ۱ طراحی بهینه‌ی پوشش تونل با بتن البافی پلیمری بر مبنای ظرفیت جذب انرژی
محمد صافی
- ۱۳ تحلیل تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن رفتار نرم کرنشی در ناحیه‌ی پلاستیک
احمد فهیمی‌فر، حامد قدمی، مسعود احمدوند و آروین عبدالمالکی
- ۲۹ بررسی تاثیر پارامترهای اجرایی ماشین TBM بر نرخ نفوذ آن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی ...
سید مصحح افتخاری، علیرضا باغبانان و راحب باقرپور
- ۴۳ طراحی پوشش سگمندی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به تاثیر مفاصل قطعات پوشش
حسن بخشنده امنیه، سعید طایبی سمیرمی و مرتضی رحیمی دیزجی
- ۵۷ بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم ...
رضا حیدری شیبانی، شکرالله زارع، حسین میرزائی نصیرآباد و محمد فروغی
- ۶۹ توسعه‌ی پایدار شهری با استفاده از فضاهای زیرسطحی - مطالعه‌ی موردی: محدوده‌ی میدان تجریش تهران
اصغر مولایی
- ۸۹ شیوه‌نامه‌ی نهایی نگارش دست‌نوشته برای ارسال به نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
سید محمد اسماعیل جلالی، احمد رمضان‌زاده و ملیحه داودآبادی

Instructions to Authors: Writing an English Extended Abstract for Submission ... S. E. Jalali, A. Ramezanzadeh and M. Davoodabadi	95
Extended Abstract: Energy-Based Optimized Design of Polymer Fiber-Reinforced ... M. Safi	96
Extended Abstract: Analysis of Underwater Tunnels Considering Strain-Softening ... A. Fahimifar, H. Ghadami, M. Ahmadvand and A. Abdolmaleki	97
Extended Abstract: The Effect of Operational Parameters on Penetration Rate of a TBM ... M. Eftekhari, A. Baghbanan and R. Bagherpour	98
Extended Abstract: Segment Lining Design of The Long Tunnel for Transferring Water ... H. Bakhshandeh Amnieh, S.Taei Semiromi and M.Rahimi Dizadji	99
Extended Abstract: Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement ... R. Heidari Sheibani, S. Zare, H. Mirzaei Nasir-Abad and M. Foroughi	100
Extended Abstract: Sustainable Urban Development Using Underground Space ... A. Molaei	101

طراحی بهینه‌ی پوشش تونل با بتن الیافی پلیمری بر مبنای ظرفیت جذب انرژی

محمد صافی*

استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی آب و محیط زیست؛ دانشگاه صنعت آب و برق

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۰۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

چکیده	واژگان کلیدی
<p>پتانسیل بالای جذب انرژی بتن‌های الیافی، این نوع مصالح را به عنوان گزینه‌ای مناسب برای انواع کاربری‌ها مطرح نموده است. این کاربرد به ویژه در محیط‌های تحت تغییر شکل و جابجایی‌های قابل توجه مانند انواع سازه‌های زیرزمینی اهمیت بیشتری دارد. با تامین ظرفیت جذب انرژی بالاتر، انعطاف‌پذیری سازه‌ی نگهدارنده افزایش و ضخامت و میزان مصالح مورد نیاز برای پوشش کاهش می‌یابد و سازه‌ی اقتصادی‌تری بدست می‌آید. برای افزایش ظرفیت جذب انرژی در ترکیبات مسلح به الیاف، در حالت عادی به محتوای الیاف بیشتری نیاز است. این امر، استفاده از این مصالح را با محدودیت‌های اقتصادی مواجه نموده است. این مقاله به معرفی یک پوشش بتنی مسلح به الیاف پلیمری بهینه می‌پردازد که حداقل محتوای الیاف ممکن و حداکثر ظرفیت جذب انرژی را دارد. نتایج این پژوهش حاصل مجموعه‌ای نسبتاً جامع از آزمایش‌ها با انواع مختلف افزودنی‌ها و محتوای الیاف است و پیشنهاداتی را برای دستیابی به یک طراحی بهینه بر مبنای نتایج تجربی ارائه داده است. بدین منظور از آزمایش‌های استاندارد تیر و پانل برای تعیین ظرفیت جذب انرژی و سایر خصوصیات مورد نیاز طراحی استفاده شده است. در نهایت با استفاده از نتایج طرح‌های اختلاط بهینه، نمودار پیشنهادی طراحی پوشش‌های تونل بر مبنای ظرفیت جذب انرژی ارائه شده است.</p>	<p>پوشش تونل جذب انرژی الیاف پلیمری آزمایش پانل طرح اختلاط</p>

۱- مقدمه

افزایش سختی برشی آن می‌شود. تاثیر آن بر روی رفتار در حالت حدی نهایی نیز به صورت افزایش مقاومت در برابر برش و کشش و افزایش انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری سازه است.

علاوه بر موارد فوق، بکارگیری الیاف در بتن، ظرفیت جذب انرژی آن را بالاتر می‌برد. افزودن الیاف در ترکیبات رایج بتن، مقاومت فشاری، کششی، برشی و پیچشی آن را با درجات مختلف بسته به نوع الیاف و مشخصات سازه افزایش می‌دهد. در سازه‌های دارای فیود اضافی، همچون دال‌های روی خاک و پوشش تونل‌ها، افزایش ظرفیت جذب انرژی مصالح که با مسلح‌سازی آن‌ها به الیاف فراهم می‌شود، به طور محسوس‌تری رفتار ترک‌خوردگی را ارتقا می‌بخشد و ظرفیت تحمل بار سازه را افزایش می‌دهد [1].

استفاده از ترکیبات بتنی مسلح به الیاف امروزه در انواع مختلف سازه‌ها گسترش یافته است. کارایی و دوام بسیار بالای این نوع از مصالح، آن‌ها را به یک گزینه‌ی موثر برای بسیاری از طراحی‌ها تبدیل کرده است. الیاف در دو نوع کوتاه یا میکرو و بلند یا ماکرو به ترتیب برای دو کاربرد دوام و عملکرد سازه‌ی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع دوم که در این مقاله مد نظر است، از نقطه‌نظر سازه‌ای، سبب ارتقای ویژگی‌های شکست و بهبود رفتار سازه می‌شود. این ساز و کار هم بر روی توانایی خدمت‌رسانی و هم حالات حد نهایی تاثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. تاثیرات این فناوری بر روی رفتار در مقابل بار بدین گونه است که انتشار ترک‌ها را مهار نموده و عرض آن‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین موجب

* تهران؛ بلوار وفادار؛ بلوار شهید عباسپور؛ دانشگاه صنعت آب و برق؛ دانشکده‌ی مهندسی آب و محیط زیست؛ مرکز مطالعات بحران‌های طبیعی؛ صندوق پستی: ۱۷۱۹-۱۶۷۶۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۷۷۰۰۶۶۶۲؛ دورنگار: ۰۲۱-۷۷۰۰۶۶۶۳؛ رایانامه: msafi@pwut.ac.ir

زمین توسط پوشش نگهدارنده جذب شود. این ویژگی بطور ویژه در پوشش‌های بتن پاشیده به بهترین شکل قابل ایجاد است.

در این پژوهش به منظور ارزیابی رفتار سازه‌ای بتن الیافی در پوشش تونل، یک برنامه‌ی آزمایش مشترک در دانشگاه صنعت آب و برق تهران و دانشگاه تکنیک استانبول و با همکاری دانشگاه وست‌مینستر (*Westminster*) لندن و با پشتیبانی شرکت فناوری‌های ساختمان انگلستان انجام شده است. مطابق استاندارد اروپایی *EN-14488* [5]، در آزمایش جذب انرژی پانل، میزان انرژی جذب شده بر اساس سطح زیر منحنی بار-تغییر شکل تعیین می‌شود. پانل‌های مورد نیاز آزمایش در قالب‌هایی به ابعاد $100 \times 600 \times 60$ میلی‌متر ساخته شده‌اند.

بر مبنای این آزمایش، برای تعیین میزان ظرفیت جذب انرژی مورد نیاز سامانه‌ی نگهداری تونل‌ها در زمین‌های مختلف، سه کلاس انرژی *E500*، *E700* و *E1000* به شرح زیر تعریف شده است [5]:

- کلاس جذب انرژی ۵۰۰ ژول برای زمین یا سنگ‌های سالم
- کلاس جذب انرژی ۷۰۰ ژول برای زمین یا سنگ‌های متوسط
- کلاس جذب انرژی ۱۰۰۰ ژول برای زمین یا سنگ‌های سست

هنگامی که جنبه‌های مختلف کاربرد سازه‌ای مصالح الیافی در پوشش سازه‌های زیرزمینی مطرح است، در نظر گرفتن سه مساله بسیار حایز اهمیت است. یعنی پاسخ نرم‌شوندگی کشش، اثر ناحیه‌ی سخت‌شوندگی کرنش و ترکیب سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی در رفتار تنش-کرنش این مصالح با توجه به جابجایی زمین، تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد سازه‌ای پوشش می‌گذارد. پاسخ مکانیکی عمومی شامل یک ناحیه‌ی خطی و یک ناحیه‌ی غیر خطی است. در ناحیه‌ی خطی تغییرات میکروسازه‌ای دائمی بسیار جزئی و در ناحیه‌ی غیرخطی تغییرات میکروسازه‌ای دائمی با یک روند ثابت رخ می‌دهد. در این محدوده مقدار معینی تغییر شکل دائمی اتفاق می‌افتد. اگر تغییر میکروسازه‌ای به شکل ریزترک‌های با اندرکنش بدون اصطکاک در نظر گرفته شود، پاسخ مکانیکی متناظر با آن تنها نشان‌دهنده‌ی سختی

برای بررسی ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی، شاخص‌هایی از قبیل استحکام، مقاومت خمشی معادل و انرژی شکست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در میان این موارد، انرژی شکست بیش‌ترین استفاده را برای توصیف رفتار ترک‌خوردگی کششی بتن داشته و بیش‌تر از سایر شاخص‌ها در بررسی تحلیلی و مدلسازی رفتار این سامانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [2] و [3]. در مقایسه با سایر مواد و مصالح مرکب همچون پلیمرهای مسلح به الیاف، ترکیبات با پایه‌ی سیمان مسلح به الیاف دارای رفتار متفاوتی هستند [4]. تفاوت عمده‌ی این ترکیبات در نحوه‌ی کارکرد الیاف پس از بروز ریزترک‌ها و نیز بازتوزیع تنش‌های کششی در ترک‌ها، قابل مشاهده است.

این مقاله درباره‌ی شاخص‌های مختلف تاثیرگذار بر روی انعطاف‌پذیری بتن الیافی بحث نموده و نتایج بررسی‌های تجربی انجام شده برای یافتن حساس‌ترین شاخص‌های تاثیرگذار بر جذب انرژی و طرح اختلاط بهینه را با توجه به محدودیت‌های آزمایش ارائه می‌نماید. برای دسته‌بندی رده‌های انرژی مورد نیاز، از طبقه‌بندی‌های موجود برای انرژی لازم در پوشش تونل در شرایط مختلف سنگ‌ها به عنوان معیار سنجش استفاده شده است. علاوه بر این، طرح مخلوطی ارائه شده است که با دارا بودن مشخصات لازم تا حد امکان مقرون به صرفه نیز باشد. همچنین در خصوص تاثیر افزودنی‌های بتن‌های با کارایی بالا، بر روی انعطاف‌پذیری مصالح ترکیبی نیز بحث شده است.

۲- روش ارزیابی جذب انرژی

استاندارد اروپایی *EN-14487* شامل دو روش مختلف تعیین انعطاف‌پذیری بتن مسلح به الیاف تحت عنوان روش ارزیابی مقاومت پسماند و روش ارزیابی ظرفیت جذب انرژی است [5]. بر مبنای این استاندارد، این دو روش به طور دقیق قابل مقایسه نیستند. روش مقاومت پسماند می‌تواند هنگامی که ویژگی‌های بتن در مدل طراحی سازه‌ای استفاده می‌شود، مناسب باشد. از طرف دیگر مقدار جذب انرژی اندازه‌گیری شده برای یک پانل می‌تواند زمانی که، تکیه‌گاه پیوسته مانند زمین وجود دارد، مناسب باشد. در این حالت هدف تعبیه ظرفیت جذب انرژی است که باید در طی فرآیند تغییر شکل

برای عمل‌آوری مخلوط بتن، از گروه‌های سنگ‌دانه‌ی متفاوتی استفاده شده است که عبارتند از:

- ماسه (۵-۰ میلی‌متر)
 - سنگ آهک شکسته (۱۲-۵ میلی‌متر)
 - سنگ آهک شکسته (۲۲-۱۲ میلی‌متر)
- مطابق با طرح اختلاط میزان سنگ‌دانه در هر متر مکعب بتن عبارت است از:

- ۸۳۷ کیلوگرم ماسه (۵-۰ میلی‌متر)
- ۵۰۰ کیلوگرم درشت‌دانه (۱۲-۵ میلی‌متر)
- ۳۳۵ کیلوگرم درشت‌دانه (۲۲-۱۲ میلی‌متر)

میزان آب ۱۶۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شده است. در نتیجه برای تمامی مخلوط‌ها نسبت وزنی آب به سیمان (W/C)، مقداری ثابت ۰/۳۵۶ است.

مقاومت فشاری متوسط نمونه‌ی استوانه‌ای بر اساس آزمایش‌های انجام شده ۵۰ مگاپاسکال است. افزودن الیاف تاثیر اندکی حداکثر تا ۳ درصد بر مقاومت فشاری در مقایسه با بتن غیر مسلح داشته است. میانگین مقاومت کششی در روش دو نیم کردن نیز برای نمونه‌های الیافی معادل ۴/۵ مگاپاسکال و حداقل ۳۵ درصد از مقاومت متناظر برای بتن غیر مسلح بالاتر است. اولین سری آزمایش‌ها با میزان الیاف مختلف در مقادیر ۴، ۶ و ۸ کیلوگرم در متر مکعب انجام شده است تا تاثیر میزان الیاف در ظرفیت جذب انرژی مشخص شود. نتایج بدست آمده از میزان انرژی جذب شده‌ی ویژه در جدول ۱ به نمایش در آمده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، انرژی جذب شده‌ی ویژه با افزایش محتوای الیاف افزایش می‌یابد. اما افزایش میزان جذب انرژی با افزایش محتوای الیاف رابطه‌ی خطی ندارد. کاهنده‌ی شدید آب پلی‌کربوکسیلات تاثیرگذاری الیاف را بالا برده و ظرفیت جذب انرژی را ارتقا بخشیده است. حداقل افزایش مشاهده شده در جذب انرژی به میزان ۵۰٪ است. توجه شود که این افزودنی موجب خودتراکمی بتن و افزایش اسلامپ به بیش از ۲۰۰ میلی‌متر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد ۲۰ درصد افزایش در میزان این افزودنی سبب افزایش بیش از ۵۵ درصد در جذب انرژی شده است.

۳-۲- ساز و کار شکست و جذب انرژی

شکل ۲، ساز و کار شکست نمونه‌ی پانل مستطیل‌شکل بتن

کاهش یافته است و به طور مجازی هیچ تغییر شکل دائمی را نشان نمی‌دهد [6]. در روش طراحی بر مبنای جذب انرژی با توجه به استفاده از سطح زیر نمودار رفتار نیرو-تغییر شکل، تمامی این پدیده‌ها بطور مناسبی در نظر گرفته می‌شوند.

۳- بهینه‌سازی جذب انرژی

فرآیند طی شده در این پژوهش برای بهینه‌سازی ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی شامل آزمایش‌ها، بررسی ساز و کار شکست نمونه‌ها و تحلیل حساسیت انجام شده در این ادامه‌ی مقاله تشریح شده است.

۳-۱- بررسی آزمایشگاهی

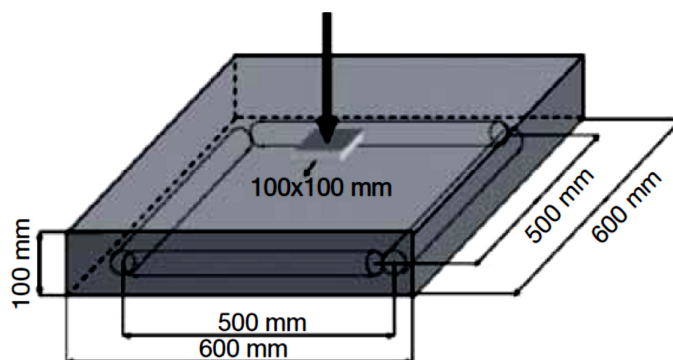
برای بدست آوردن ویژگی‌های طرح اختلاط مناسب با بالاترین میزان جذب انرژی یک مطالعه‌ی تجربی متشکل از ۳۳ تیر و پانل مستطیل‌شکل انجام شده است. تنظیمات آزمایش و اطلاعات کلی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این بخش ابتدا نسبت‌های ترکیبی کلی معرفی و سپس نتایج به طور خلاصه ارایه و تشریح شده است.

برای الیاف، از نمونه‌ی مصنوعی پلیمری نوع پلی‌اولفین (*Polyolephin*) سیاه‌رنگ با طول ۴۸ میلی‌متر استفاده شده است. برای عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشی بتن سیمان پرتلند نوع *CEM-142.5* به کار رفته است. بر اساس طرح اختلاط، محتوای سیمان با عیار ۴۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده است. برای بهبود کیفیت بتن و تولید بتن با کارایی بالا، نسل جدیدی از کاهنده‌ی شدید آب از نوع ماده‌ی پلی‌کربوکسیلات *HRWR (Polycarboxylate)*، *Adva Flow 501* استفاده شده است. میزان افزودنی *HRWR* از ۱/۶٪ تا ۲/۱٪، با توجه به وزن کلی محتوای سیمان متغیر است. همچنین از افزودنی تولیدکننده‌ی حباب هوا *ACR Sika* نیز استفاده شده است. با توجه به طرح اختلاط میزان افزودنی حباب‌زا، ۰/۱ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شده است.

مطابق با طرح اختلاط میزان الیاف برای مسلح‌سازی، ۴، ۶ و ۸ کیلوگرم در متر مکعب است. الیاف باید هم‌زمان با افزودنی *HRWR* اضافه شوند تا فرآیند ترکیب، تسهیل و الیاف به طور همگن و مناسب پخش شوند. وزن مخصوص الیاف مورد استفاده ۰/۹ کیلوگرم در متر مکعب است.

الیاف در نمونه‌های مختلف است. ساختار میکروسکوپی بتن و تغییر آن با مرور زمان و تحت بارگذاری، نقش مهمی در کنترل کارایی یک بتن مسلح به الیاف ایفا می‌کند. برای بتن غیر مسلح، ساز و کارهای پیچیده‌ای وجود دارد که در فرآیند شکست درگیر هستند. در این میان ساز و کار اصلی مقاومتی، درگیری سنگ دانه‌ها است. این مطالعه نشان داده است که وجود حباب‌های هوا نیز می‌تواند سبب افزایش ضریب سختی بتن در بارگذاری خمشی شود.

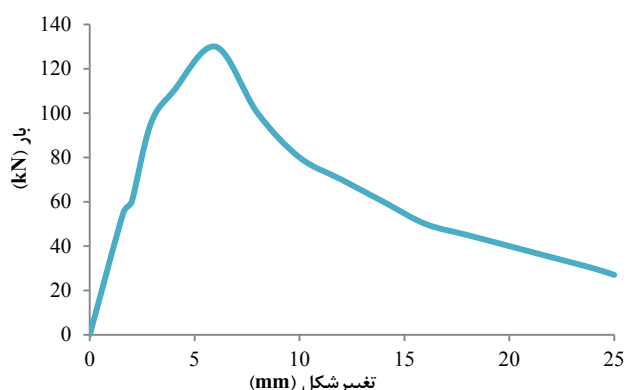
غیر مسلح، منحنی بار- تغییر شکل و تعریف انرژی جذب شده‌ی ویژه را نشان می‌دهد. این نتیجه را می‌توان با ساز و کار شکست پانل‌های مستطیل‌شکل بتن الیافی در شکل ۳ مقایسه نمود. شکل ۳، شکست انعطاف‌پذیرتری را برای این پانل‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ساز و کارهای شکست از یک الگوی واحد با حداکثر تعداد ترک‌ها تبعیت می‌کند که موجب جذب انرژی بیش‌تر می‌شود. شکل ۳ همچنین نشان‌دهنده‌ی توزیع یکنواخت



شکل ۱- مشخصات نمونه و روش بارگذاری در آزمایش پانل برای اندازه‌گیری ظرفیت جذب انرژی در تغییر شکل حداکثر ۲۵ میلی‌متر مطابق تعریف *EFNARC*

جدول ۱- تغییرات جذب انرژی براساس میزان الیاف و تغییر افزودنی‌ها در طرح اختلاط برای نمونه‌های سه‌تایی

نام نمونه	واحد	A	B	C	D	E	F	G
محتوای الیاف	Kg/m^3	۰	۴	۴	۶	۶	۸	۸
انرژی ویژه	$Joule/m^2$	۲۴۴	۶۴۰	۹۱۱	۱۴۷۸	۱۹۲۵	۲۷۹۰	۱۶۵۶
افزودنی	-	-	حباب‌زا	کاهنده‌ی آب	حباب‌زا	کاهنده‌ی آب	کاهنده‌ی آب	حباب‌زا



شکل ۲- ساز و کار شکست پانل بتن غیر مسلح و تعریف جذب انرژی بر اساس سطح زیر منحنی نیرو-تغییر شکل



شکل ۳- ساز و کار بارگذاری و شکست نمونه‌های بتن الیافی در آزمایش پانل

افزودنی‌های معرفی شده در بخش بررسی آزمایشگاهی، می‌تواند در دستیابی به این هدف موثر واقع شود. افزودنی کاهنده‌ی آب الیاف را قطبی می‌کند. در نتیجه در مخلوط بتن، الیاف به موازات یکدیگر قرار می‌گیرند. این ویژگی سبب ایجاد مخلوط یکنواخت بتن شده و می‌تواند ظرفیت تحمل بار و ظرفیت جذب انرژی را افزایش دهد.

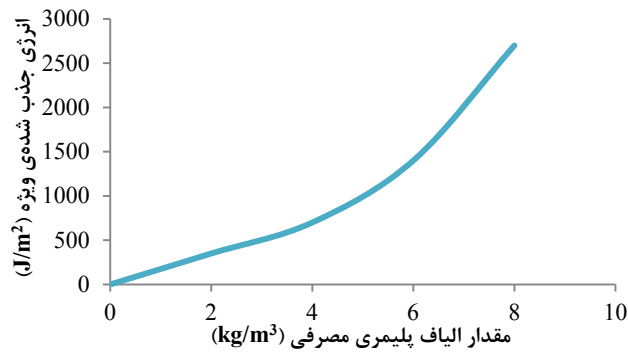
۳-۳- تحلیل حساسیت پارامتری

آزمایشات مورد نظر برای مقادیر مختلف الیاف انجام و حداکثر انرژی جذب شده‌ی ویژه نیز اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌های اولیه نشان داده است که مقدار کم انرژی جذب شده توسط پانل بتن غیر مسلح تقریباً قابل نظر است. شکل ۴، تغییر انرژی جذب شده‌ی ویژه با محتوای الیاف را نشان می‌دهد.

بررسی در نمونه‌های شکسته نشان می‌دهد که افزودنی کاهنده‌ی آب *HRWR* به دلیل خاصیت پلاریزه کردن الیاف جهت‌گیری بهتری به آن‌ها خواهد داد. پیامد جهت‌گیری مناسب این است که تاثیر الیاف را افزایش و نیاز برای محتوای الیاف بیش‌تر را کاهش می‌دهد. به طور معمول الیاف به شکل تصادفی در مخلوط قرار می‌گیرند، اما این مسئله برای اعضای سازه‌ای شرایط بهینه‌ای نیست.

در اعضای سازه‌ای نظیر دال‌ها یا پوشش‌ها، باری که از درون عضو عبور می‌کند، یک جهت‌گیری ویژه دارد. بنابراین جهت‌گیری‌های تنش و کرنش کششی حداکثر از قبل تعیین می‌شود. در این حالت بهترین جهت‌گیری برای الیاف را می‌توان تعیین نمود. اگر بتوان بیش‌ترین الیاف را در این جهت‌ها قرار داد، موثرترین سامانه بدست خواهد آمد.

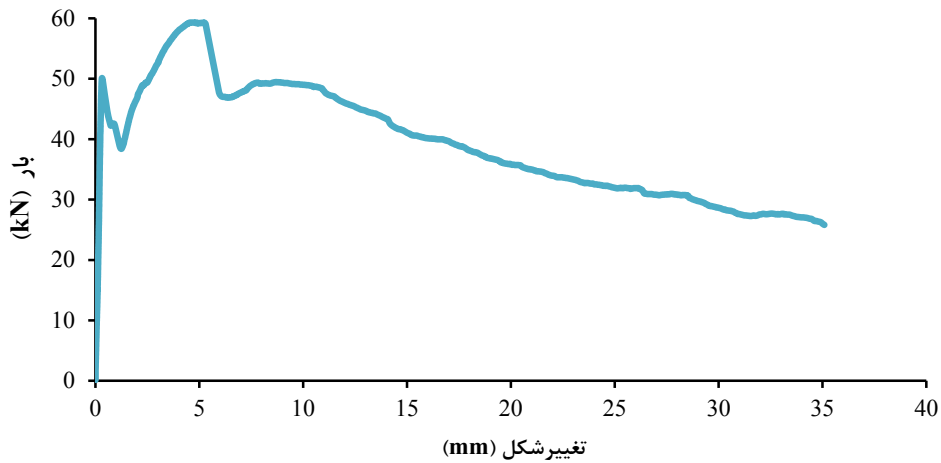
طراحی بهینه پوشش تونل با بتن الیافی پلیمری بر مبنای ظرفیت جذب انرژی: ص ۱-۱۲



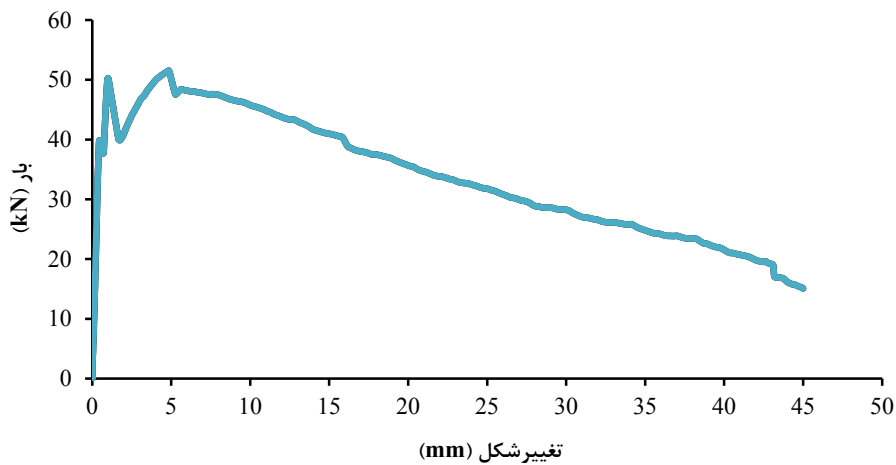
شکل ۴- تغییرات جذب انرژی بر اساس میزان الیاف مصرفی در آزمایش‌های پانل انجام شده

جذب انرژی مورد نیاز برای کاربرد در سازه‌های زیرزمینی و تونل را می‌توان با محاسبه‌ی سطح زیر نمودار در جابجایی ۲۵ میلی‌متری نقطه‌ی میانی پانل‌ها استخراج نمود.

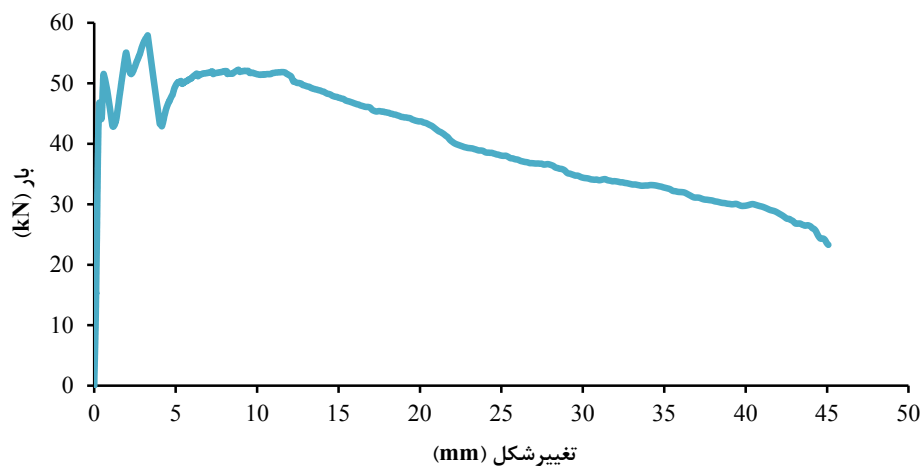
منحنی بار- تغییر شکل برای نمونه‌های بهینه شده در شکل ۵ ارایه شده است. منحنی‌های انرژی- تغییر شکل مربوطه نیز در شکل ۶ نمایش داده شده است. ظرفیت



الف- میانگین سری نمونه‌های D

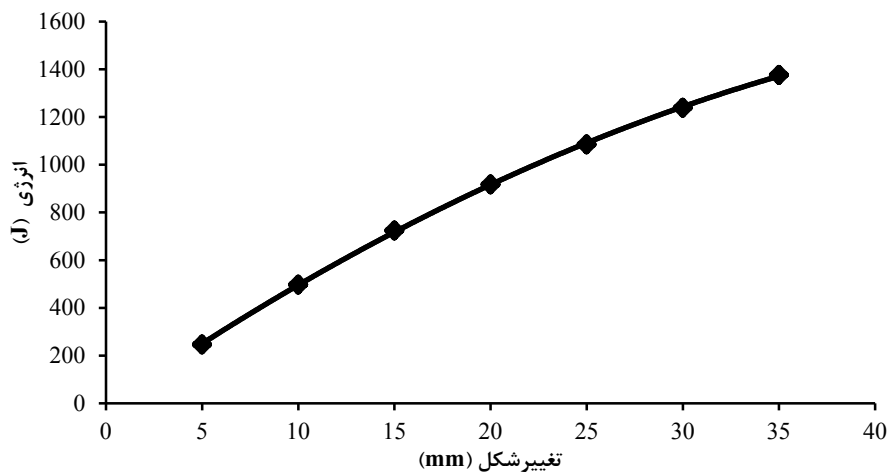


ب- میانگین سری نمونه‌های E

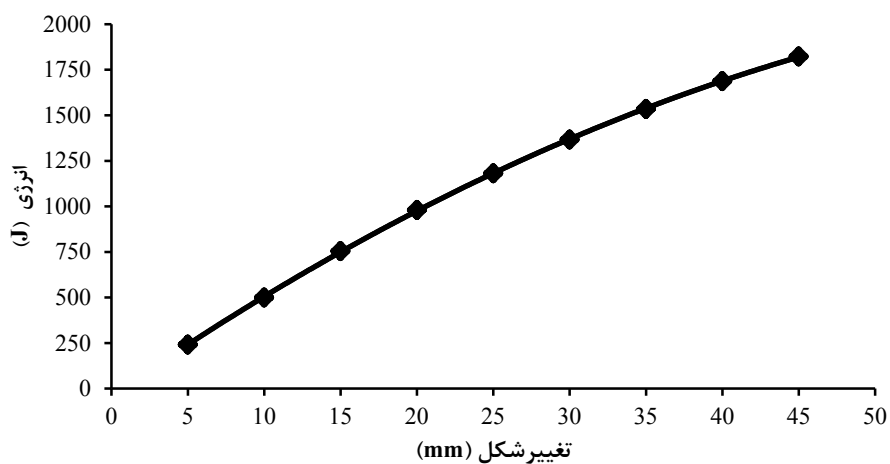


ج- میانگین سری نمونه‌های F

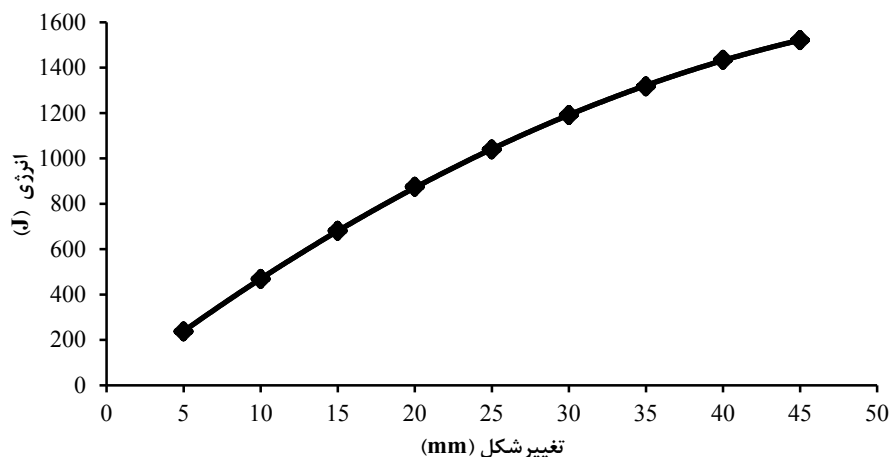
شکل ۵- منحنی بار- تغییر شکل طرح بهینه شده در آزمایش پانل بتن الیافی با میزان الیاف ۶ کیلوگرم در متر مکعب



الف- میانگین سری نمونه‌های D



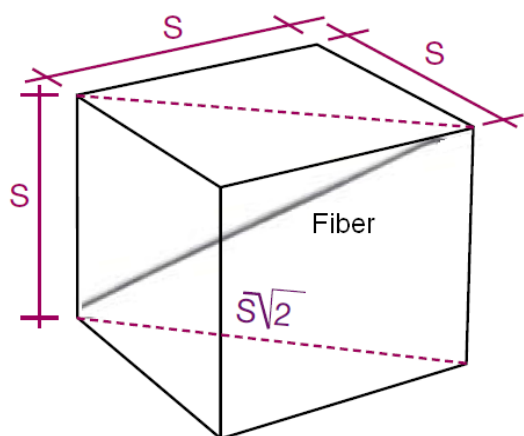
ب- میانگین سری نمونه‌های E



ج- میانگین سری نمونه‌های F

شکل ۶- منحنی تغییرات جذب انرژی طرح بهینه شده بر اساس تغییر شکل در آزمایش پانل بتن الیافی

در این گزاره، d_f قطر الیاف، l_f طول آن‌ها و s میانگین فضای لازم بین الیاف بر حسب میلی‌متر است که می‌تواند به طور محافظه‌کارانه، مطابق شکل ۷، برابر با ۴۵ درصد طول الیاف در نظر گرفته شود.



شکل ۷- تعریف فاصله‌ی معادل بین الیاف برای محاسبه‌ی درصد الیاف طرح اختلاط

برای الیاف اصلاح شده‌ی پلی‌اولفین با کارایی بالا، این مقدار کمتر از ۰٫۳ درصد است. آزمایش‌های جمع‌شدگی انجام شده برای میزان الیاف رایج (۰٫۶۷ درصد) نشان می‌دهد این مقدار الیاف به طور کامل ترک‌های جمع‌شدگی حرارتی و پلاستیک را مهار می‌کند. این مقدار مطابق ۶

شاخص دیگر تعیین ظرفیت جذب انرژی بتن مسلح به الیاف، طول مشخصه (l_{ch}) است. طول مشخصه یکی از شاخص‌های شکنندگی مصالح است که به انرژی شکست، مدول ارتجاعی و مقاومت کششی بستگی دارد و به صورت گزاره‌ی (۱) تعریف می‌شود [6]:

$$l_{ch} = \frac{E_c \cdot G_F}{f_t^2} \quad (1)$$

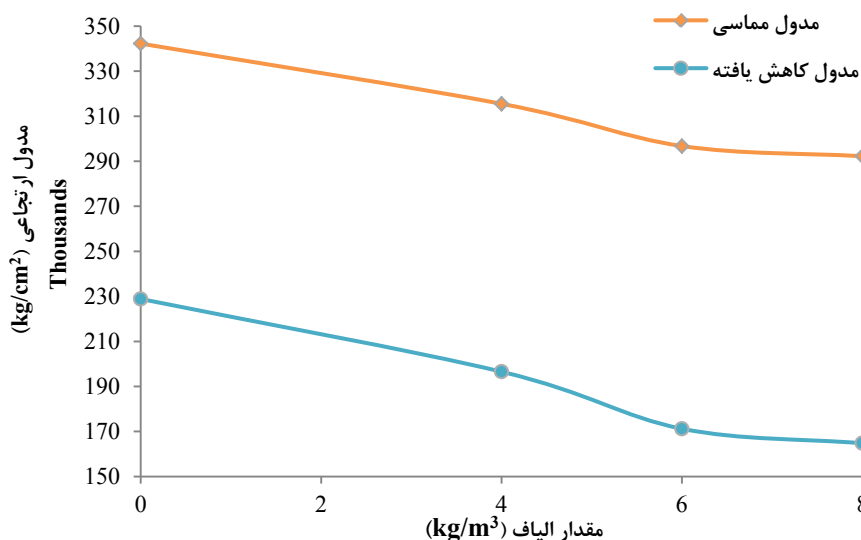
در این گزاره، f_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال، E_c مدول ارتجاعی بر حسب مگاپاسکال و G_F انرژی شکست بر حسب ژول است. در آزمایش‌های انجام شده این شاخص بین ۲۵۰۰۰ تا ۳۱۰۰۰ برای ۶ کیلوگرم محتوای الیاف در هر متر مکعب متغیر است. مقدار آن برای بتن مسلح به شبکه‌ی فولادی در حدود ۵۰۰۰ است. این مسئله نشان‌دهنده‌ی انعطاف‌پذیری بالاتر تقویت با الیاف در مقایسه با تقویت توسط شبکه‌ی سیم جوش داده - که به طور گسترده در تونل‌سازی‌های متعارف استفاده می‌شود- است. گذشته از حداقل ظرفیت جذب انرژی لازم برای سازه، یک محدودیت دیگر برای میزان الیاف، مقدار مورد نیاز برای مهار ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی است. حداقل مقدار الیاف برای استفاده در مهار جمع‌شدگی (ρ_f) را می‌توان از گزاره‌ی (۲) به دست آورد [4]:

$$\rho_f = \frac{\pi \cdot d_f^2 \cdot l_f}{4s^3} \quad (2)$$

اقتصادی در این حالت می‌تواند مقدار ۶ کیلوگرم در مترمکعب در نظر گرفته شود.

کاهش مدول ارتجاعی با مقاومت فشاری ثابت عموماً سبب انعطاف‌پذیری بیش‌تر بتن با همان مقاومت می‌شود. این انعطاف‌پذیری می‌تواند تمرکز تنش و عرض ترک‌ها را کاهش دهد و در مجموع در مقایسه با بتن مسلح به فولاد رفتار بهتری خواهد داشت. برای بتن مسلح به فولاد شبکه‌ای متعارف، مدول ارتجاعی معادل افزایش می‌یابد. در این مورد در آزمایش‌های پانل تعداد ترک‌های کمتر با عرض بیش‌تر، مشاهده شده است.

کیلوگرم از الیاف پلیمری در یک متر مکعب بتن تازه است. مدول ارتجاعی نیز همان‌گونه که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود، در این آزمایش اندازه‌گیری شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، الیاف، مدول ارتجاعی را به طور متوسط در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد برای مدول مماسی اولیه و ۱۵ تا ۲۰ درصد برای مدول کاهش یافته‌ی ثانویه کاهش می‌دهند. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که افزایش میزان الیاف موجب کاهش متناسب مدول ارتجاعی نخواهد شد. بنابراین الیاف به مقدار ۶ و ۸ کیلوگرم در متر مکعب انعطاف‌پذیری نزدیک به یکدیگر خواهند داشت. بنابراین مقدار الیاف بهینه از نظر



شکل ۸- تغییرات مدول ارتجاعی مماسی و مدول کاهش یافته بر اساس میزان الیاف مصرفی در آزمایش‌های تیر و پانل همراه با درصد کاهش مدول ارتجاعی

الیاف در مخلوط باید در حدود ۱/۵ تا ۲/۰ درصد باشد. این مطالعه یک نسبت اختلاط جدید با الیاف مصنوعی بلند معرفی می‌کند که در مقایسه با طرح‌های موجود، با استفاده از نصف میزان الیاف، ویژگی‌های همان مخلوط را فراهم می‌سازد. با استفاده از این روش بالاترین رده‌ی جذب انرژی یعنی ۱۰۰۰ ژول که توسط EFNARC تعیین شده، با یک مخلوط بتن بسیار اقتصادی‌تر قابل دستیابی است.

۴- بررسی نتایج و توصیه‌های طراحی

با توجه به نوع کاربری، ظرفیت جذب انرژی لازم برای سازه‌های مختلف متفاوت است. از این‌رو، طرح اختلاط

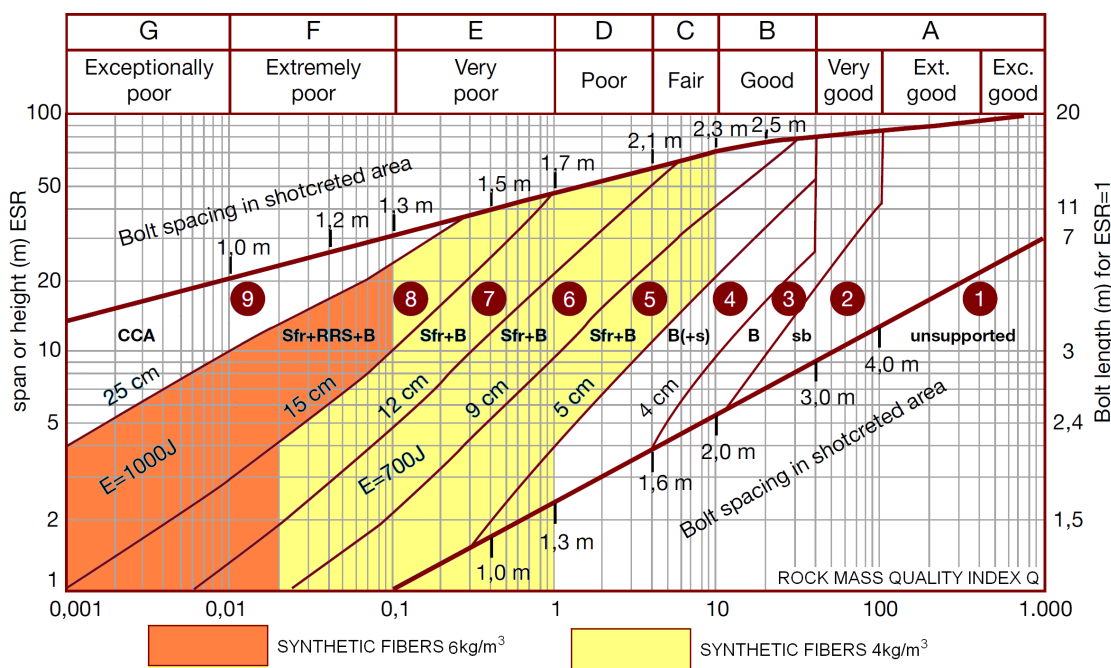
الیاف در بتن مسلح به حجم کم الیاف (کمتر از ۰/۱ درصد)، تاثیر کمی بر روی مقاومت کششی و فشاری دارند. تاثیر مقدماتی الیاف، بهبود بخشیدن رفتار ترک‌ها و سخت‌شدگی یا ظرفیت انتقال تنش‌ها پس از ترک‌خوردگی و کرنش کششی در گسیختگی است. ساز و کار بیرون آمدن الیاف به مشخصات الیاف و بتن، ویژگی‌های مکانیکی اندرکنشی بین الیاف و بتن و زاویه‌ی انحراف الیاف نسبت به جهت بارگذاری بستگی دارد.

نتایج نشان می‌دهد که به منظور دستیابی به مزایای سازه‌ای نظیر جذب انرژی بالا از الیاف متعارف، محتوای

ظرفیت جذب انرژی ۷۰۰ ژول است، نتایج آزمایش‌های انجام شده مقدار متوسط ۰/۴۵ درصد الیاف را پیشنهاد می‌دهد.

برای استفاده‌ی کاربردی از ظرفیت جذب انرژی بتن‌های الیافی در طراحی پوشش تونل‌ها می‌توان از روش‌های تجربی طراحی تونل استفاده نمود. بارتون و همکاران [7] و [8]، نمودار میزان جذب انرژی لازم برای طراحی پوشش نهایی تونل در شرایط مختلف ژئوتکنیکی را برای کلاس‌های مختلف انرژی ارائه داده‌اند (شکل ۹). این نمودار سامانه‌ی نگهداری لازم را بر اساس رابطه‌ی بین مشخصات تونل نظیر ارتفاع یا دهانه و نوع خاک و سنگ محیط دربرگیرنده پیشنهاد می‌دهد.

می‌تواند بسته به نیاز بهینه و سازگار شود. برای الیاف پلیمری بلند که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شده است، بتن با مقاومت متوسط رده‌ی ۲۸ تا ۴۰ مگاپاسکال، حداقل به ۰/۶ درصد الیاف در مخلوط نیاز دارد تا ظرفیت جذب انرژی کلاس ۱۰۰۰ ژول (مورد نیاز برای تونل‌سازی در سنگ‌های ضعیف) را فراهم سازد. روش‌های متداول طرح اختلاط بتن با الیاف سازه‌ای، میزان مصرف حداقل ۱/۰ درصدی را برای طرح اولیه می‌کند که میزان الیاف مصرفی در آن به طور میانگین ۵۰٪ بیش‌تر از طرح پیشنهادی است. توجه شود که این میانگین بر اساس نوع الیاف کمی تغییر می‌کند. در سنگ با شرایط متوسط، می‌توان از محتوای الیاف کمتر استفاده نمود. برای این تراز که معادل کلاس



REINFORCEMENT CATEGORIES

- ① Unsupported
- ② Spot bolting, sb
- ③ Systematic bolting, B
- ④ Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4-10 xm), B(+s)
- ⑤ Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5-9 cm, Sfr+B
- ⑥ Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9-12 cm, Sfr+B
- ⑦ Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12-15 cm, Sfr+B
- ⑧ Fibre reinforced shotcrete > 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting, Sfr+RRS+B
- ⑨ Cast concrete lining, CCA

شکل ۹- محدوده‌ی قابل توصیه برای استفاده از طرح اختلاط بتن الیافی پیشنهادی برای دو کلاس جذب انرژی ۷۰۰ و ۱۰۰۰ ژول به ازای ۴ و ۶ کیلوگرم از الیاف پلی‌اولفین ۴۸ میلی‌متری بر اساس نتایج آزمایشات پانل مربعی مطابق استاندارد EFNARC [5]

برای دستیابی به ظرفیت جذب انرژی بیش‌تر تنها به افزایش میزان الیاف استناد نشده و سایر خصوصیات طرح نیز مد نظر قرار گیرد تا طرح از لحاظ اقتصادی و اجرایی هم توجیه‌پذیری مناسبی داشته باشد [9].

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده به منظور یافتن طرح اختلاط بهینه‌ی بتن مسلح به الیاف با حداکثر ظرفیت جذب انرژی، نشان داده است با اعمال تغییراتی در طرح اختلاط می‌توان با ثابت بودن میزان جذب انرژی، مقدار الیاف را به میزان قابل توجهی کاهش داد. تغییرات در مخلوط باید دو تاثیر عمده داشته باشد، این تغییرات عبارتند از:

- ۱- جایگزینی الیاف متداول با الیاف بلند در مخلوط
- ۲- کاهش نسبت آب به سیمان به کمتر از ۰/۴ با افزودنی کاهنده‌ی شدید آب

این کار به طور کلی سبب خودتراکمی بالاتر بتن مسلح به الیاف با کارایی بیش‌تر و افزایش مقاومت و جذب انرژی آن می‌شود. این ترکیبات انعطاف‌پذیری و مقاومت بیش‌تری از خود نشان می‌دهند و می‌توانند برای تمامی کاربردهای سازه‌ای اعم از سازه‌های معمولی و سازه‌های خاص راهگشا باشند.

پوشش ترکیبی پیشنهاد شده در این پژوهش در مقایسه با طرح‌های متعارف بسیار اقتصادی‌تر بوده و همچنین قابل مقایسه با پوشش‌های بتنی درجای مسلح به فولاد است. مزایای دوام و عمر مفید این نوع پوشش نیز با توجه به عدم استفاده از فولاد و حذف مسایلی نظیر خوردگی، بسیار قابل توجه بوده که در مقوله‌ی جداگانه‌ای قابل بحث و ارایه است. در این تحقیق رده‌های جذب انرژی بر اساس استفاده از بتن پاشیده‌ی الیافی با الیاف فولادی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد افزایش جذب انرژی پوشش با افزایش یا بدون افزایش مقدار الیاف در طرح می‌تواند عملکرد مورد نظر سازه را تامین نماید.

در نمودار بارتون (شکل ۹)، پوشش‌های بتن پاشیده با ترکیبات الیاف‌دار هم پیشنهاد شده است. البته این نمودار ویژگی‌های الیاف را ارایه نمی‌دهد. بنابراین تنها معیار دستیابی به طرح اختلاط و نوع بتن الیافی، استناد به ظرفیت جذب انرژی خواهد بود. بنابراین با مرتبط ساختن مستقیم نتایج جذب انرژی از آزمایش پانل به سایر شاخص‌های طراحی می‌توان طرح اختلاط مناسب برای پوشش تونل را ارایه نمود. کلاس جذب انرژی برای هر مخلوط و پانل آن، برای گستره‌ی خاصی از کیفیت توده‌سنگ، مناسب خواهد بود. از این‌رو، برای هر مخلوط ترکیبی موجود، یک طیف یا محدوده‌ی کاربردی طراحی می‌تواند تعریف شود.

مجموعه نتایج بدست آمده می‌تواند برای معرفی ۳ کلاس ظرفیت جذب انرژی همان‌گونه که در *EFNARC* آمده است، همراه با طرح اختلاط‌های پیشنهاد شده در این مقاله استفاده شود. هر کلاس جذب انرژی، یک ناحیه را در نمودار طراحی مطابق شکل ۹ پوشش می‌دهد. بنابراین ۳ ناحیه همراه با ۳ کلاس جذب انرژی و اطلاعات مربوط به ۳ طرح اختلاط همراه با جزئیات تجربی پوشش‌ها را می‌توان در نمودار درج نمود. در این نمودار نتایج طرح برای دو میزان الیاف ۴ و ۶ کیلوگرم براساس محدوده‌ی پیشنهادی قابل استفاده درج شده است. از این نمودار می‌توان برای طراحی پوشش بتن یا بتن پاشیده‌ی الیافی با طرح اختلاط پیشنهادی برای سامانه‌ی نگهداری دایم و موقت تونل‌ها استفاده نمود.

با دنبال کردن روند انجام شده در این مطالعه می‌توان به ترازهای جذب انرژی بالاتر نیز دست پیدا نمود. حداکثر میزان جذب انرژی بدست آمده در این پژوهش ۱۱۵۰ ژول بوده است که ۱۵ درصد از بالاترین کلاس انرژی *EFNARC* بیش‌تر است.

باید توجه شود، اگر چه افزایش میزان الیاف موجب افزایش جذب انرژی تا یک تراز معین می‌شود، اما ساز و کار شکست و رفتار سازه‌ای تغییر نمی‌کند؛ بنابراین بهتر است

۶- منبع‌ها

- [1] ACI Committee 544. (2002). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. NewYork: American Concrete Institute (ACI). http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/5441r_96.pdf.

- [2] Antonaci, P., Bocca, P., & Grazzini, A. (2006). In Situ Determination of Toughness Indices of Fibre Reinforced Concrete. *Material and Structures*, 39(3), 283-290. <http://dx.doi.org/10.1007/s11527-005-9003-x>.
- [3] Soulioti, D. V., Barkoula, N. M., Paipetis, A., & Matikas, T. E. (2011). Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete. *Strain*, 47(s1), 535-541. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x>.
- [4] Falkner, H., & Teutsch, M. (1993). *Comparative Investigations of Plain and Steel Fiber Reinforced Industrial Ground Slabs*. Technical University of Brunswick. Germany: Institute of Building Materials. ISBN: 9783892880783.
- [5] British Standards Institute (2006). *Testing Sprayed Concrete: Determination of Energy Absorption Capacity of Fiber Reinforced Slab Specimens*. BSI Standards. SN: BS EN 14488-5:2006. ISBN: 0580482367.
- [6] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). (2006). *Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures*. Rome, Italy: National Research Council-Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. SN: CNR-DT 204/2006. http://www.cnr.it/documenti/norme/IstruzioniCNR_DT204_2006_eng.pdf.
- [7] Grimstad, E. & Barton, N. (1993). Updating the Q-system for NMT. In Kompen, Opsahl, and Berg (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support* (pp. 163-177 & 234-241). Oslo, Norway: Norwegian Concrete Association.
- [8] Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189-236. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01239496>.
- [9] Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A. W., & Kaynia, A. (2002). *Rock Mass Quality (Q) Used in Designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption*. Oslo, Norway: Norwegian Geotechnical Institute.

تحلیل تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن رفتار نرم کرنشی در ناحیه پلاستیک

احمد فهیمی^۱؛ حامد قدمی^{۲*}؛ مسعود احمدوند^۳؛ آروین عبدالمالکی^۴

۱- استاد؛ دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران؛ گرایش ژئوتکنیک؛ دانشگاه تفرش؛ کارشناس شرکت آب منطقه‌ای البرز

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران؛ گرایش ژئوتکنیک؛ دانشگاه تفرش؛ کارشناس شرکت مهندسی مشاور طاهان

۴- دانشجوی دکترای تخصصی؛ دانشکده مهندسی عمران؛ دانشگاه تبریز

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۷/۳۰؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی

چکیده

تونل
آب زیرزمینی
رفتار نرم کرنشی
فشار آب حفره‌ای
تراوش

در این مقاله تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط تقارن محوری و کرنش صفحه‌ای بررسی و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، روشی نوین برای محاسبه توزیع فشار آب حفره‌ای، تنش و کرنش در اطراف تونل دایروی حفر شده در سنگ پیشنهاد شده است. در این روش، توده سنگ اطراف تونل به صورت الاستوپلاستیک با مدل نرم کرنشی در نظر گرفته شده است. با توسعه مدل‌های پیشین در مدل جدید آرایه شده، تأثیرات نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک و زاویه اتساع توده سنگ نیز لحاظ شده است. علاوه بر این موارد، جریان تراوش و نفوذپذیری ثانویه توده سنگ به سبب وجود کوپل هیدرومکانیکی در ناحیه پلاستیک نیز در نظر گرفته شده است. این مدل، توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه الاستیک در تمام جهات اطراف تونل را به صورت دقیق‌تری نسبت سایر مدل‌ها محاسبه می‌کند. از آنجایی که معادلات حاکم، حل بسته نخواهد داشت، برنامه‌ای کامپیوتری بر مبنای این مدل، نوشته شده و دقت و کاربرد عملی آن با چندین مثال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده تأثیرات زاویه اتساع، نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک و شرایط آب زیرزمینی را به خوبی نشان می‌دهند.

۱- مقدمه

دربرگیرنده تونل‌های زیرسطح آب زیرزمینی تغییر می‌کند. این تغییرات به نوبه خود سبب تغییر در جریان تراوش نیز می‌شود.

میدان‌های تنش و تغییر شکل ایجاد شده بر اثر حفاری تونل و جریان تراوش در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی تاکنون توسط چندین پژوهشگر مورد مطالعه قرار گرفته است. اغلب حل‌های آرایه شده بر پایه روش‌های عددی هستند. با این وجود، در میان این روش‌ها، روش‌های تحلیلی محدودی نیز برای تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی یافت می‌شوند. براون و بری (Brown & Bray) [1]، فازیو و

هنگامی که تونلی زیر سطح آب زیرزمینی حفر می‌شود، آب زیرزمینی به داخل تونل جریان می‌یابد و در نتیجه درون زمین اطراف تونل، تراوش شکل می‌گیرد. این تراوش، رفتار تونل را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی، هر المان توده سنگ از تمامی جهات تحت نیروهای حجمی تراوش قرار می‌گیرد. به دلیل وجود درزه‌ها و ترک‌ها در توده سنگ تحت تأثیر نیروهای حجمی تراوش، نفوذپذیری توده سنگ عوض می‌شود. بنابراین در طول دوره‌های حفاری و نصب پوشش، نفوذپذیری توده سنگ

* البرز؛ کرج؛ مهرشهر؛ بلوار ارم؛ خیابان بوستان؛ شرکت آب منطقه‌ای استان البرز؛ طبقه دوم؛ معاونت طرح و توسعه؛ شماره تلفن: ۰۲۶-۳۳۵۵۷۰۷-۹

رایانامه: hamed.ghadami@yahoo.com

است [10]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)}{r} = 0 \quad (1)$$

در حالت تقارن محوری، رابطه‌ی تغییر شکل- کرنش به صورت گزاره‌های (۲)، (۳) و (۴) است:

$$\varepsilon_r = -\frac{du}{dr} \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{-u}{r} \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon_r}{dr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta}{r} \quad (4)$$

در گزاره‌ی (۱) σ_r و σ_θ به ترتیب تنش مماسی و شعاعی و در گزاره‌های (۲)، (۳) و (۴) ε_r و ε_θ به ترتیب کرنش شعاعی و مماسی و u تغییر شکل شعاعی است.

۳- معیار شکست توده‌سنگ و مدل رفتاری

برای بررسی رفتار توده‌سنگ می‌توان از معیار شکست تجربی غیر خطی هوک و براون مطابق با گزاره‌های (۵) و (۶) استفاده نمود [11].

الف- سنگ سالم:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \left\{ m_i \sigma'_3 \sigma'_c + s_i \sigma_c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ب- ناحیه‌ی شکسته و پلاستیک:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \left\{ m_r \sigma'_3 \sigma'_c + s_r \sigma_c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

در گزاره‌های فوق $\sigma'_3 = \sigma'_r = \sigma'_\theta$ به ترتیب تنش موثر اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر در نقطه‌ی شکست، σ'_c مقاومت فشاری محصورنشده‌ی سنگ بکر و m_i, s_i, m_r, s_r پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ شکسته و سالم هستند. لازم به ذکر است که صورت صحیح‌تر گزاره‌های (۵) و (۶)، استفاده از مقادیر a_i برای سنگ سالم و a_r برای ناحیه‌ی شکسته به جای مقدار ثابت ۰٫۵ است، اما در این پژوهش جهت دستیابی به راه حلی بسته برای مرز الاستوپلاستیک و عدم وجود داده‌های مناسب در مثال‌های مورد بررسی، مقدار ثابت ۰٫۵ به عنوان توان در گزاره‌ی سمت راست روابط (۵) و (۶) در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری توده‌سنگ نیز مدل نرم‌شوندگی کرنش است و شامل پارامترهای f, α و g است. در شکل ۱ رابطه‌ی تنش-کرنش بر اساس این پارامترها نشان داده شده است. تا هنگامی که رابطه‌ی تنش‌های اصلی، معیار شکست را برآورده نکند، توده‌سنگ

ریباجی (Fazio & Ribacchi) [2]، کاروسو و جیانی (Carosso & Giani) [3]، نام و بوبت (Nam & Bobet) [4]، لی و همکاران (Lee, et al.) [5] و شین و همکاران (Shin, et al.) [6] اثرات تراوش و فشار حفره‌ای را در حل‌های خود در نظر گرفتند. با این وجود، تاثیر کوپل هیدرومکانیکی در اغلب این روش‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. براون و بری [1] با در نظر گرفتن تغییرات نفوذپذیری توده‌سنگ در نواحی پلاستیک، کوپل هیدرومکانیکی در در نظر گرفتن مدلی دقیق برای محاسبه‌ی تراوش ارائه نکردند. فهیمی فر و زارعی فرد [7] مدل تحلیلی خود را با در نظر گرفتن کوپل هیدرومکانیکی توده‌سنگ و پوشش، استفاده از تنش موثر بجای تنش کل و توسعه‌ی مدل تراوش دقیق کولیمباس (Kolymbas) [8] ارائه نمودند.

در روش‌های ذکر شده، کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک ثابت فرض شده و اثر نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است؛ در نتیجه نمو کرنش پلاستیک برابر با نمو کرنش کل است. همچنین زاویه‌ی اتساع در ناحیه‌ی نرم کرنشی ثابت فرض شده و اثر تغییرات آن بر تغییر شکل‌های اطراف تونل در نظر گرفته نشده است.

در این پژوهش، بر پایه‌ی روش براون و بری و با استفاده از توسعه‌ی مدل تراوش دقیق مینگ و همکاران (Ming, et al.) [9]، مدلی تحلیلی برای تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی ارائه شده است. در این مدل، تغییرات زاویه‌ی اتساع، نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک و کرنش پلاستیک انحرافی به عنوان پارامتر نرم‌شوندگی در نظر گرفته شده است.

۲- روابط حاکم بر محیط

مدل محاسباتی با فرض تقارن محوری در نظر گرفته شده است. این مدل شامل نواحی مختلف توده‌سنگ و نواحی الاستیک و پلاستیک (ناحیه‌ی با نرم‌شوندگی کرنش و ناحیه‌ی با مقاومت ماندگار) است.

معادله‌ی تعادل در شرایط تقارن محوری برای هر المان توده‌سنگ در مختصات قطبی به صورت گزاره‌ی (۱)

۴-۱- نفوذپذیری توده‌سنگ

حفاری تونل، نفوذپذیری توده‌سنگ دربرگیرنده را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تغییرات نفوذپذیری ممکن است مربوط به وضعیت تنش، فشار آب حفره‌ای و تغییرشکل‌های پلاستیک باشد. در تونل زیر سطح آب زیرزمینی، نیروی حجمی تراوش اعمالی، به گرادیان هیدرولیکی و نفوذپذیری توده‌سنگ بستگی دارد. از سوی دیگر، نفوذپذیری توده‌سنگ شکسته‌ی اطراف تونل به تغییر شکل‌های ناشی از حفاری و جریان تراوش وابسته است [7].

به سبب وجود این اندرکنش هیدرومکانیکی در توده‌سنگ، نفوذپذیری با تغییر شکل‌ها رابطه دارد. بر این اساس گزاره‌ی (۷) توسط بری و براون ارائه شده است [1]:

$$K_r = K_o(1 + \eta(\epsilon_{ve} - \epsilon_v)^2) \quad (7)$$

در روش براون و بری نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین از پارامتر ϵ_{ve} در گزاره‌ی (۷) صرف نظر شده است و کرنش حجمی کل برابر با کرنش حجمی پلاستیک لحاظ شده است ($\epsilon_v = \epsilon_{vp}$). اما در مدل جدید ارائه شده با لحاظ نمودن نمو کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک و با توجه به گزاره‌ی (۷) $\epsilon_{ve} + \epsilon_{vp} = \epsilon_v$ به صورت گزاره‌ی (۸) بازنویسی شده است [۱۳]:

$$K_r = K_o(1 + \eta\epsilon_{vp}^2) \quad (8)$$

در گزاره‌ی فوق، η پارامتر مشخص‌کننده‌ی تغییرات نفوذپذیری توده‌سنگ در ناحیه‌ی پلاستیک است. K_o نفوذپذیری اولیه‌ی توده‌سنگ و $\epsilon_{vp} = \epsilon_{rp} + \epsilon_{\theta p}$ کرنش حجمی است.

۴-۲- الگوی تراوش و فشار آب حفره‌ای

الگوی ارائه شده در این پژوهش برای تراوش در تونل‌های زیرسطح آب زیرزمینی در شکل ۲ نشان داده شده است (تراوش متقارب شعاعی تا شعاع پلاستیک). گزاره‌های ارائه شده برای الگوی تراوش بر اساس فرضیات زیر است:

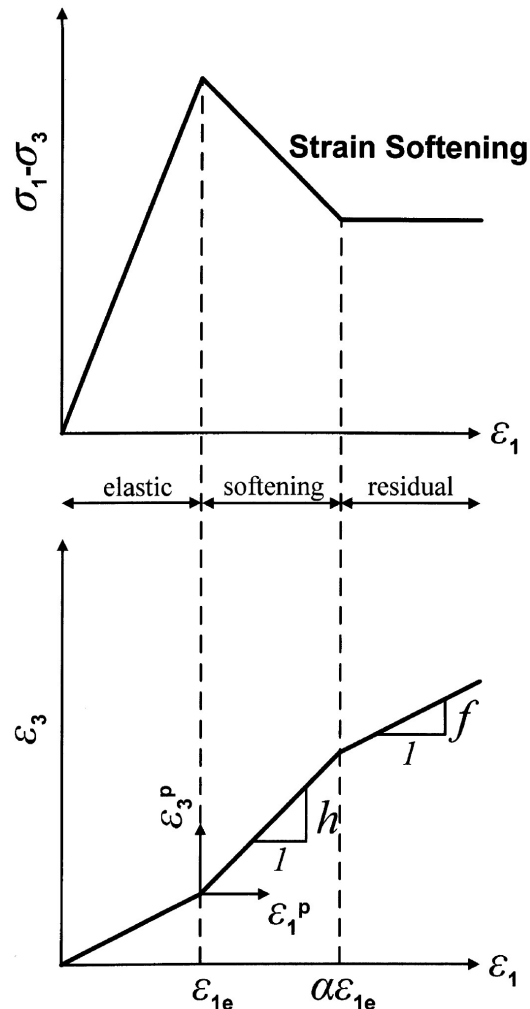
الف- نفوذپذیری توده‌سنگ همگن و همسانگرد است.

ب- جریان به حالت پایدار رسیده است.

پ- تونل دارای مقطع دایره‌ای و پتانسیل هیدرولیکی ثابت است.

ت- تراوش، شرایط سطح آب زیرزمینی را تحت تاثیر

رفتار الاستیک دارد و پس از آن مقاومت توده‌سنگ به صورت تدریجی به مقاومت پسماند می‌رسد. در نمودارهای شکل ۱، $\epsilon_1 = \epsilon_\theta$ و $\epsilon_3 = \epsilon_r$ به ترتیب کرنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر در توده‌سنگ هستند. همین‌طور ϵ_1^p و ϵ_3^p به ترتیب نمونه‌های کرنش بزرگ‌تر و کوچک‌تر هستند.



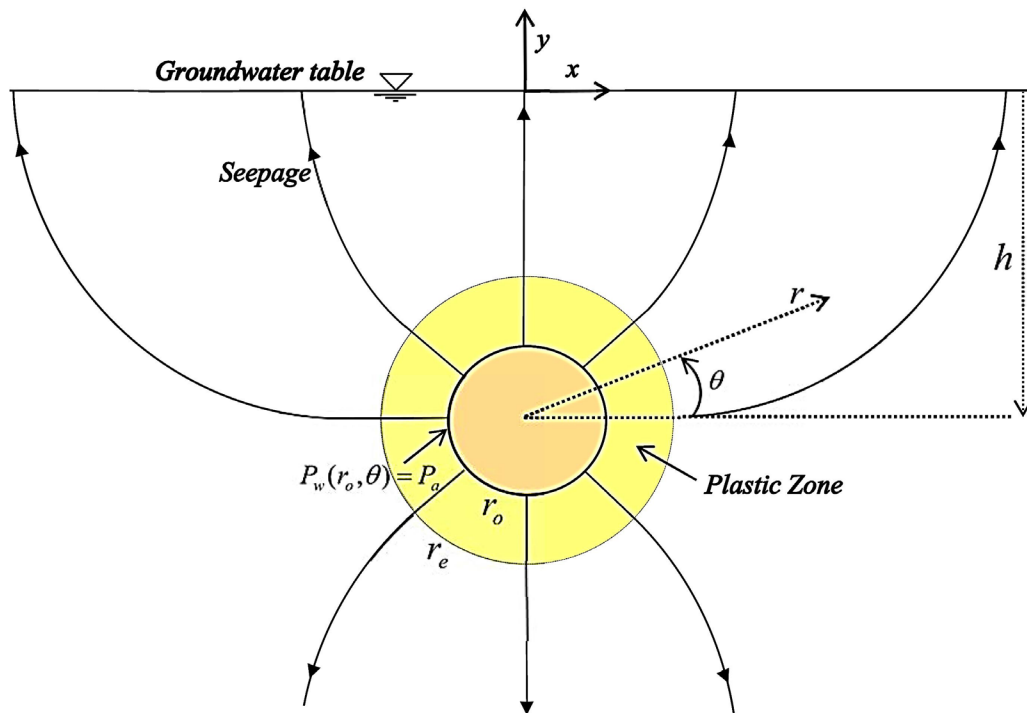
شکل ۱- مدل الاستیک-نرم‌شوندگی کرنش [12]

۴- تحلیل هیدرولیکی

در تحلیل هیدرولیکی، شرایط تقارن محوری در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین فشار آب حفره‌ای، $P_w(r, \theta)$ ، در هر نقطه‌ی اطراف تونل به صورت تابعی از فاصله‌ی شعاعی و زاویه محاسبه می‌شود.

پژوهش برای تحلیل تراوش در تونل‌های زیر سطح زیرزمینی در ناحیه‌ی الاستیک با توسعه‌ی مدل مینگ و همکاران [9]، مدل دقیق‌تری برای محاسبه‌ی فشار آب حفره‌ای در فواصل شعاعی و زوایای مختلف اطراف تونل ارائه شده است. همچنین برای تحلیل تراوش در ناحیه‌ی پلاستیک با فرض جریان شعاعی، رابطه‌ی داریسی با نفوذپذیری بسته به تغییر شکل، مورد استفاده قرار گرفته است.

قرار نمی‌دهد. به بیان دیگر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در اثر تراوش تغییر نمی‌کند. با وجود این‌که در این پژوهش تنها مطالعه‌ی ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی مد نظر است، ارائه‌ی مدلی دقیق برای تراوش و توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی الاستیک برای اندازه‌گیری فشار آب در مرز الاستوپلاستیک و نرخ تراوش امری ضروری است. در این



شکل ۲- الگوی تراوش در تونل زیر سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی (h مثبت در نظر گرفته می‌شود)، h_w ارتفاع آب بالاتر از سطح زمین، P_a فشار آب حفره‌ای در سطح خارجی تونل و $Y(x, y)$ و $X(x, y)$ توابعی هستند که با توجه به شرایط مرزی در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی تعیین می‌شوند. با توجه به این‌که در مدل مورد مطالعه در این پژوهش (شکل ۲) حداکثر ارتفاع آب، سطح زمین در نظر گرفته شده است، مقدار پارامتر h_w در گزاره‌ی (۹) صفر منظور می‌شود ($h_w = 0$). با جایگزین کردن $x = r \cos \theta$ و $y = r \sin \theta - h$ در گزاره‌ی (۹)، می‌توان فشار آب حفره‌ای را در تمام جهات اطراف تونل بر اساس

۳-۴- ناحیه‌ی الاستیک

رابطه‌ی مینگ و همکاران برای حالتی که فشار آب حفره‌ای در سطح خارجی تونل ثابت باشد، به صورت گزاره‌ی (۹) ارائه شده است [9]:

$$P_w(x, y) = X(x, y) + h_w \cdot \gamma_w + \frac{P_a - \gamma_w h_w + Y(x, y)}{\ln \left[\frac{h}{r_o^2} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_o^2}\right)^2 - 1} \right]} \left(\ln \frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - r_o^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - r_o^2})^2} \right) \quad (9)$$

در گزاره‌ی فوق، r_o شعاع خارجی تونل، h عمق تونل از

۴-۴- ناحیه‌ی پلاستیک

در ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل، با فرض جریان شعاعی، گزاره‌ی دارسی مورد استفاده قرار گرفته است [7]:

$$V = -K_r i_r \quad (17)$$

در گزاره‌ی بالا، K_r نفوذپذیری توده‌سنگ در ناحیه‌ی پلاستیک، V سرعت و i_r گرادیان هیدرولیکی است. با قراردادن $q = VA$ ، $i_r = \frac{\partial H}{\partial r}$ ، در گزاره‌ی (۱۷)، استفاده از رابطه‌ی برنولی و انتگرال‌گیری از رابطه‌ی فشار آب حفره‌ای محاسبه شده از گزاره‌ی (۱۷)، توزیع فشار آب حفره‌ای به صورت گزاره‌ی (۱۸) بدست می‌آید:

$$P_w(r, \theta) = \gamma_w q / 2\pi \int_{r_0}^r \frac{1}{r K_r(r)} dr + P_a \quad (18)$$

$$- \gamma_w (r - r_0) \sin \theta$$

۴-۵- دبی

با مساوی قرار دادن مقادیر فشار آب در مرز الاستوپلاستیک در گزاره‌ی (۱۶) مربوط به ناحیه‌ی الاستیک و مقادیر فشار آب در مرز الاستوپلاستیک در گزاره‌ی (۱۸) مربوط به ناحیه‌ی پلاستیک می‌توان مقدار دبی را محاسبه نمود.

$$P_w(r_e, \theta)_{plastic} = P_w(r_e, \theta)_{elastic} \quad (19)$$

لازم به ذکر است که برای استفاده از گزاره‌ی ناحیه‌ی الاستیک در مرز الاستوپلاستیک باید در گزاره‌ی (۱۶) به‌جای شعاع خارجی تونل (r_0) ، شعاع الاستوپلاستیک (r_e) جایگزین شود.

۵- تنش‌ها و تغییرشکل‌های توده‌سنگ

در مدل جدید ارائه شده، سه ناحیه‌ی مختلف پیرامون تونل مدنظر قرار گرفته است (شکل ۳):

- ۱- ناحیه‌ی الاستیک پیرامون تونل.
 - ۲- ناحیه‌ی پلاستیک مجاور ناحیه‌ی الاستیک که در آن رفتار نرم‌شوندگی کرنش حاکم است (از شعاع r_s تا شعاع r_e).
 - ۳- ناحیه‌ی پلاستیک داخلی که تنش به مقاومت ماندگار محدود می‌شود (از شعاع r_0 تا شعاع r_s).
- در مرز الاستوپلاستیک تنش‌ها و کرنش‌های اصلی با عبارت‌های $\sigma_{\theta e}$ ، $\sigma_{r e}$ ، $\epsilon_{\theta e}$ و $\epsilon_{r e}$ نمایش داده می‌شوند.

(r, θ) به صورت گزاره‌ی (۱۰) بدست آورد [۱۳]:

$$P_w(r, \theta) = X(r, \theta) + \frac{P_a + Y(r, \theta)}{\ln \left[\frac{h}{r_0^2} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_0^2}\right)^2 - 1} \right]} \times \left(\frac{\ln \left[\frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]}{\ln \left[\frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \right) \quad (10)$$

تابع $X(r, \theta)$ با اعمال شرایط مرزی مربوط به تونل زیر سطح آب زیرزمینی به صورت زیر محاسبه می‌شود:
الف- شرط مرزی برای دیواره و کف تونل و محدوده‌ی میان دیواره تا کف تونل ($0 < \theta < 360$) و $\theta = 180$:

$$r \rightarrow \infty \Rightarrow P(r) = (h - r \sin \theta) \gamma_w \quad (11)$$

ب- شرط مرزی برای سقف تونل و محدوده‌ی میان

دیواره و سقف تونل ($0 < \theta < 180$):

$$r \sin \theta = h \Rightarrow P(r) = (h - r \sin \theta) \gamma_w \quad (12)$$

با قرار دادن هر یک از دو شرط مرزی (۱۱) یا (۱۲) در گزاره‌ی (۱۰)، تابع $X(r, \theta)$ به صورت یکتا به صورت گزاره‌ی (۱۳) بدست می‌آید:

$$X(r, \theta) = (h - r \sin \theta) \gamma_w \quad (13)$$

تابع $Y(r, \theta)$ نیز با قرار دادن شرط مرزی:

$$r^2 = r_0^2 \Rightarrow P(r) = P_a \quad (14)$$

به صورت گزاره‌ی (۱۵) بدست می‌آید:

$$Y(r, \theta) = \frac{P_a - (h - r_0 \sin \theta) \gamma_w}{\ln \left[\frac{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \times \ln \left[\frac{h}{r_0} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_0}\right)^2 - 1} \right] \quad (15)$$

با جایگذاری توابع $Y(r, \theta)$ و $X(r, \theta)$ در گزاره‌ی (۱۰)، معادله‌ی مربوط به توزیع فشار آب حفره‌ای به صورت گزاره‌ی (۱۶) بدست می‌آید:

$$P_w(r, \theta) = (h - r \sin \theta) \gamma_w + \frac{P_a - (h - r_0 \sin \theta) \gamma_w}{\ln \left[\frac{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r_0 \cos \theta)^2 + (r_0 \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \times \left(\frac{\ln \left[\frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]}{\ln \left[\frac{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h + \sqrt{h^2 - r_0^2})^2}{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta - h - \sqrt{h^2 - r_0^2})^2} \right]} \right) \quad (16)$$

با توجه به این‌که مدل نمودن رفتار نرم کرنشی توده‌سنگ یکی از اهداف اصلی این پژوهش است، با استفاده از حل عددی گزاره‌ی (۲۶) به روش تفاضل محدود، تنش شعاعی و مماسی در هر گام به صورت زیر بدست می‌آید [1]:

$$\sigma_r(i) = b - \sqrt{b^2 - a} \quad (27)$$

$$\sigma_\theta(i) = \sigma_r(i) + \left[\overline{m(i)\sigma_c(i)\sigma_r(i)} + \overline{s(i)\sigma_c^2(i)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

که در آن:

$$a = \sigma_r^2(i-1) - \left[\frac{1}{2} \overline{m(i)\sigma_c(i)(\sigma_r(i-1))} - 4c \frac{P_w(i) - P_w(i-1)}{\overline{s(i)\sigma_c^2(i)}} \right] \quad (29)$$

$$b = \sigma_r(i-1) + \overline{cm_a(i)\sigma_c(i)}$$

$$c = \left[\frac{r_{i-1} - r_i}{r_{i-1} + r_i} \right]^2$$

$$\overline{w(i)} = \frac{1}{2}(w(i-1) + w(i))$$

در گزاره‌ی (۲۹)، w بیان‌کننده‌ی هر یک از پارامترهای مقاومتی φ, σ_c, m, s است.

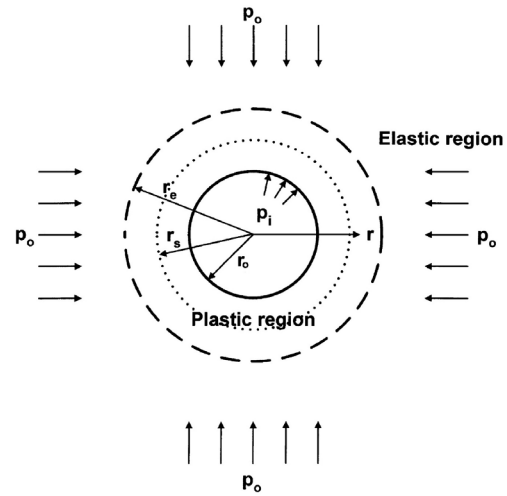
پارامترهای $\varphi(i), \sigma_c(i), m(i), s(i)$ براساس تابع γ^p (کرنش پلاستیک انحرافی) بیان می‌شوند. در ناحیه‌ی پلاستیک فرض می‌شود که پارامترهای مورد نظر را می‌توان بصورت تابعی دوخطی از کرنش پلاستیک انحرافی γ^p توصیف نمود [15]:

$$w(i) = \begin{cases} w - (w - w_r) \frac{\gamma^p(i)}{\gamma^{p*}} & 0 < \gamma^p(i) < \gamma^{p*} \\ w_r & \gamma^p(i) > \gamma^{p*} \end{cases} \quad (30)$$

لازم به ذکر است که در این مدل، γ^p پارامتر نرم‌شوندگی کرنش برای کنترل مقادیر پارامترهای مقاومتی φ, σ_c, m, s در ناحیه‌ی نرم‌شوندگی کرنش است و بر اساس گزاره‌ی (۳۱) تعریف می‌شود [14]:

$$\gamma^p = \varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p \quad (31)$$

و در حل عددی تفاضل محدود در هر مرحله به این صورت



شکل ۳- تونل دایره‌ای در صفحه‌ی نامحدود [14]

با استفاده از روابط تعادل در ناحیه‌ی الاستیک و گزاره‌ی اصلاح شده‌ی معیار شکست هوک و براون (گزاره‌ی (۵)) بر اساس تنش کل به شرح ذیل:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \left\{ m(\sigma_r - P_w)\sigma_c + s\sigma_c^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

تنش‌ها و کرنش‌های در مرز الاستوپلاستیک به صورت گزاره‌های ذیل محاسبه می‌شوند [1]:

$$\sigma_{re} = P_o - M\sigma_c \quad (21)$$

$$\sigma_{\theta e} = P_o + M\sigma_c \quad (22)$$

در گزاره‌های فوق:

$$M = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m}{4} \right)^2 + m \left(\frac{P_o - P_{we}}{\sigma_c} \right) + s \right\}^{0.5} - \frac{m}{8} \quad (23)$$

کرنش شعاعی و مماسی در مرز الاستوپلاستیک نیز از گزاره‌های زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon_{re} = - \frac{(P_o - \sigma_{re})}{2G} = - \frac{M\sigma_c}{2G} \quad (24)$$

$$\varepsilon_{\theta e} = - \frac{(P_o - \sigma_{\theta e})}{2G} = \frac{M\sigma_c}{2G} \quad (25)$$

که در آن G مدول برشی توده‌سنگ است. برای تحلیل ناحیه‌ی پلاستیک با استفاده از گزاره‌های (۱) و (۵)، معادله‌ی تعادل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = \frac{\left[m(\sigma_r - P_w)\sigma_c + s\sigma_c^2 \right]^{0.5}}{r} \quad (26)$$

محاسبه می‌شود:

$$\gamma^p(i) = \gamma^p(i-1) + (\Delta\varepsilon_\theta^p(i) - \Delta\varepsilon_r^p(i)) \quad (32)$$

برای محاسبه‌ی کرنش‌های شعاعی و مماسی از روابط تغییر شکل-کرنش مربوط به شرایط تقارن محوری (گزاره‌ی (۴))، استفاده می‌شود.

در مدل پیشنهادی، برخلاف مدل براون و بری [1] که کرنش الاستیک را در کل محیط پلاستیک ثابت در نظر گرفته است، نمو کرنش الاستیک نیز در هر مرحله‌ی محاسبه، به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین کرنش کل به دو قسمت کرنش الاستیک و پلاستیک تقسیم می‌شود.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r^e \\ \varepsilon_\theta^e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_r^p \\ \varepsilon_\theta^p \end{Bmatrix} \quad (33)$$

با جایگذاری گزاره‌ی (۳۳) در گزاره‌ی (۴)، می‌توان گزاره‌ی سازگاری کرنش‌ها را به این صورت بیان نمود:

$$\frac{d\varepsilon_\theta^p}{dr} + \frac{\varepsilon_\theta^p - \varepsilon_r^p}{r} = -\frac{d\varepsilon_\theta^e}{dr} - \frac{\varepsilon_\theta^e - \varepsilon_r^e}{r} \quad (34)$$

با حل عددی معادله‌ی بالا به روش تفاضل محدود، $\Delta\varepsilon_\theta^p(i)$ (نمو کرنش پلاستیک مماسی) به صورت گزاره‌ی (۳۵) بدست می‌آید [16]:

$$\Delta\varepsilon_\theta^p(i) = \frac{P_1}{P_2} \quad (35)$$

$$P_1 = \left(\begin{array}{c} -\frac{\Delta\varepsilon_\theta^e(i)}{r(i)-r(i-1)} - \frac{1}{G} \frac{\sigma_\theta(i) - \sigma_r(i)}{r(i)+r(i-1)} \\ -\frac{2(\varepsilon_\theta^p(i-1) - \varepsilon_r^p(i-1))}{r(i)+r(i-1)} \end{array} \right)$$

$$P_2 = \frac{1}{r(i)-r(i-1)} + \frac{2(1+K(i))}{r(i)+r(i-1)}$$

در گزاره‌ی (۳۵)، $\varepsilon_r^p(i-1)$ و $\varepsilon_\theta^p(i-1)$ کرنش‌های مماسی و شعاعی پلاستیک محاسبه شده در گام قبلی $(i-1)$ هستند.

$\Delta\varepsilon_r^e(i)$ و $\Delta\varepsilon_\theta^e(i)$ (نموکرنش الاستیک شعاعی و

مماسی) از گزاره‌ی زیر بدست می‌آید [10]:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_r^e(i) \\ \Delta\varepsilon_\theta^e(i) \end{Bmatrix} = \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu \\ -\nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\sigma_r(i) \\ \Delta\sigma_\theta(i) \end{Bmatrix} \quad (36)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_r(i) \\ \Delta\sigma_\theta(i) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_r(i) - \sigma_r(i-1) \\ \sigma_\theta(i) - \sigma_\theta(i-1) \end{Bmatrix}$$

همچنین $K(i)$ نیز از گزاره‌ی (۳۷) بدست می‌آید [16]:

$$K(i) = \frac{1 + \sin \varphi(i)}{1 - \sin \varphi(i)} \quad (37)$$

که در آن φ ، زاویه‌ی اتساع است. پس از محاسبه‌ی

$\Delta\varepsilon_\theta^p(i)$ از گزاره‌ی (۳۵)، $\Delta\varepsilon_r^p(i)$ نیز از گزاره‌ی (۳۸)

بدست می‌آید [16]:

$$\Delta\varepsilon_r^p(i) = -K(i)\Delta\varepsilon_\theta^p(i) \quad (38)$$

در این مرحله، کرنش پلاستیک نیز با استفاده از پارامترهای محاسبه شده در مراحل قبلی، با استفاده از رابطه‌ی (۳۹) قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} \varepsilon_r^p(i) = \varepsilon_r^p(i-1) + \Delta\varepsilon_r^p(i) \\ \varepsilon_\theta^p(i) = \varepsilon_\theta^p(i-1) + \Delta\varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad (39)$$

و کرنش‌های کل مماسی و شعاعی با استفاده از مجموع کرنش‌های الاستیک و پلاستیک طبق گزاره‌ی (۴۰) بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \varepsilon_r(i) \\ \varepsilon_\theta(i) \end{cases} = \begin{cases} \varepsilon_r(i-1) \\ \varepsilon_\theta(i-1) \end{cases} + \begin{cases} \Delta\varepsilon_r^e(i) \\ \Delta\varepsilon_\theta^e(i) \end{cases} + \begin{cases} \Delta\varepsilon_r^p(i) \\ \Delta\varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad (40)$$

در نهایت، با محاسبه‌ی کرنش کل مماسی، تغییرشکل نیز طبق گزاره‌ی (۴۱) قابل محاسبه است.

$$u(i) = -\varepsilon_\theta(i)r(i) \quad (41)$$

روش حل به این گونه است که با فرض یک شعاع الاستوپلاستیک r_e ، محاسبات در مرز پلاستیک با استفاده از روابط (۲۱) تا (۲۵) انجام گرفته و سپس با در نظر گرفتن مقادیر تنش و کرنش بدست آمده در مرز الاستوپلاستیک به عنوان مقادیر ابتدایی، روابط (۲۶) تا (۴۱) بصورت عددی تا برآورده شدن شرایط مرزی حل می‌شوند. محاسبات تا هنگامی که شعاع الاستوپلاستیک به مقدار ثابتی برسد، ادامه می‌یابد. روند محاسبات در پیوست آورده شده است.

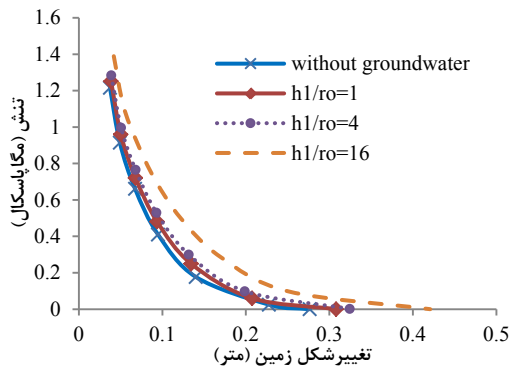
۶- صحت‌سنجی مدل جدید ارایه شده

با توجه به این‌که روش ارایه شده دارای حل بسته نیست؛ براساس روابط ارایه شده، برنامه‌ی *utunnel* (*underwater tunnel*) در محیط نرم‌افزار *MATLAB* نوشته شده است. با استفاده از برنامه‌ی *utunnel* ۲ تونل نمونه تحلیل شده‌اند. سپس نتایج بدست آمده، تفسیر و با نتایج حاصل از سایر مدل‌ها مقایسه و صحت‌سنجی شده است.

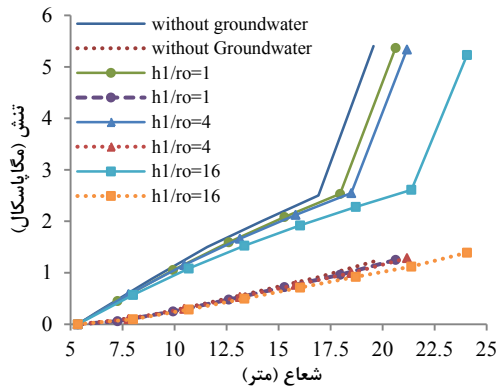
۱-۶- مثال ۱

در مثال ۱، مدل ارایه شده با مدل پارک (Park) [14] مقایسه شده است. داده‌های استفاده شده در مدل پارک در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این که در تونل مورد نظر پارک، اثر آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است، در تحلیل این تونل با استفاده از برنامه‌ی *utunnel* برای نسبت ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سقف تونل به شعاع تونل h_1/r_0 (شکل ۴)، محدوده‌ی گسترده‌ای از مقادیر (۱، ۴ و ۱۶) در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل ناحیه‌ی پلاستیک تونل مورد نظر توسط برنامه‌ی *utunnel* در شکل ۵، شکل ۶ و شکل ۷ مشاهده می‌شود. در شکل ۵ و شکل ۶ منحنی مشخصه‌ی زمین و نمودار تنش شعاعی و مماسی برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی رسم شده است. منحنی بدون آب زیرزمینی، منحنی پارک است. در مثال ارایه شده توسط پارک فشار داخلی تونل (فشار پوشش)، صفر در نظر گرفته شده است ($p_i = 0$) و تغییر شکل زمین جدار تونل تا رسیدن به تنش صفر ادامه می‌یابد.



شکل ۵- منحنی مشخصه‌ی زمین برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی

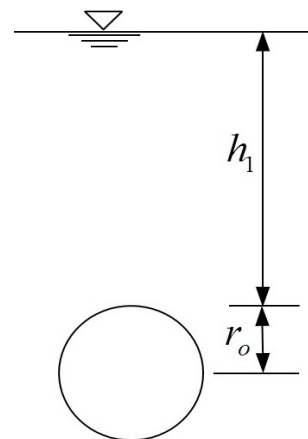


شکل ۶- نمودار تنش شعاعی و مماسی در ناحیه‌ی پلاستیک برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی (خطوط ممتد تنش مماسی و خطوط نقطه چین تنش شعاعی)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سطح آب زیرزمینی تغییر شکل زمین از ۰٫۲۷۶ متر در تونل بالاتر از سطح آب زیرزمینی به ۰٫۴۲ متر برای $h_1/r_0 = 16$ افزایش می‌یابد، همچنین شعاع الاستوپلاستیک از ۱۹٫۵۸ متر به ۲۴٫۰۵۸ متر افزایش می‌یابد.

جدول ۱- داده‌های مربوط به روش پارک [14]

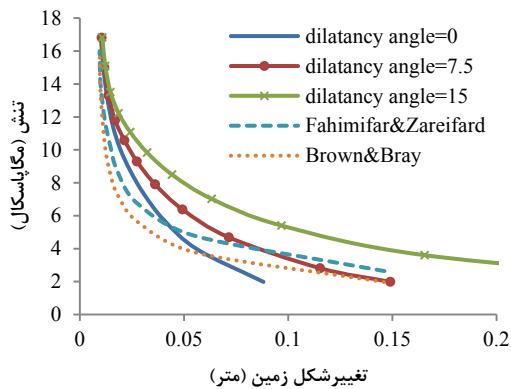
مقدار	پارامتر
۱۳۸۰	مدول یانگ (E) (مگا پاسکال)
۰٫۲۵	ضریب پواسون (ν)
۳٫۳۱	تنش اولیه (P_0) (مگا پاسکال)
۵٫۳۵	شعاع تونل (r_0) (متر)
۲۷٫۶	σ_c (مگا پاسکال)
۰٫۵	m_p
۰٫۰۰۱	s_p
۰٫۱	m_r
۰	s_r
۳۰	زاویه‌ی اصطکاک داخلی پیک (ϕ_p)
۱۹٫۴۷	زاویه‌ی اتساع سنگ سالم (ϕ_p)
۵٫۲۲	زاویه‌ی اتساع سنگ شکسته (ϕ_r)
۰٫۰۰۴۷۴۲	پارامتر نرم‌کرنشی (γ^*)



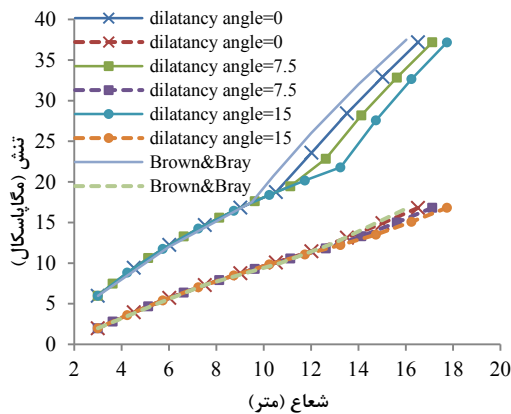
شکل ۴- شرایط سطح آب زیرزمینی

نفوذپذیری توده‌سنگ در ناحیه‌ی پلاستیک از گزاره‌ی

$k_o = K_r (1 + 10^5 \varepsilon_v^2)$ بدست می‌آید که در آن k_o نفوذپذیری اولیه‌ی توده‌سنگ و ε_v کرنش حجمی توده‌سنگ تغییر شکل یافته است. با در نظر گرفتن این مشخصات، براون و بری تونل مورد نظر را تحلیل و نتایج آن را در مقاله‌ی خود ثبت نمودند. نتایج براون و بری و برنامه‌ی *utunnel* در جدول ۳ مقایسه شده است. در شکل ۸ منحنی مشخصه‌ی بدست آمده توسط براون و بری [1]، فهمی فر و زارعی فرد [7] و *utunnel* نشان داده شده است. در شکل ۹ نیز نمودار σ_r و σ_θ برحسب شعاع r محاسبه شده با روش براون و بری و *utunnel* مشاهده می‌شود.

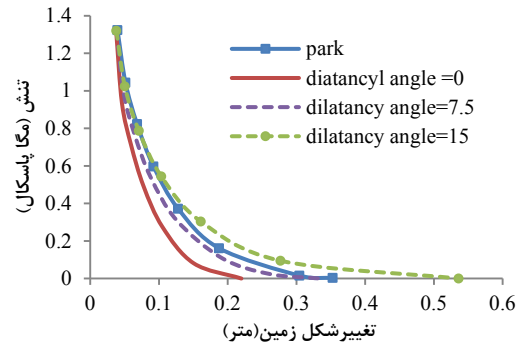


شکل ۸- منحنی مشخصه‌ی زمین در ناحیه‌ی پلاستیک با توجه به زوایای اتساع مختلف ($h = 300m$)



شکل ۹- نمودار تنش شعاعی و مماسی در ناحیه‌ی پلاستیک با توجه به زوایای اتساع مختلف (خطوط ممتد تنش مماسی و خطوط نقطه‌چین تنش شعاعی) ($h = 300m$)

در شکل ۷ اثر زاویه‌ی اتساع بر منحنی مشخصه‌ی زمین نشان داده شده است.



شکل ۷- منحنی مشخصه‌ی زمین براساس زوایای اتساع مختلف با در نظر گرفتن $h = 50$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه‌ی اتساع از ۰ تا $15 (\phi/2)$ درجه، تغییر شکل زمین از ۰٫۲۱۹ متر به ۰٫۵۳۳۶ متر افزایش می‌یابد. با توجه به گزاره‌های (۳۰)، (۳۲) و (۳۳) با افزایش زاویه‌ی اتساع، تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد.

۲-۶- مثال ۲

تونلی در توده‌ای از گل‌سنگ و لای‌سنگ با مشخصات ارایه شده در جدول ۲ حفاری شده است.

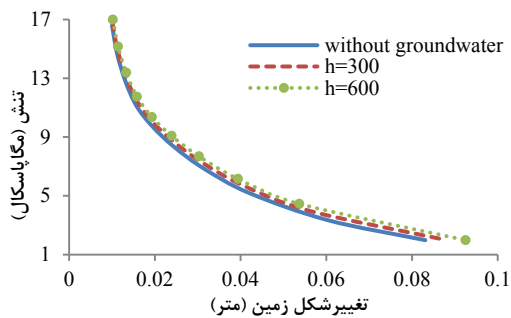
جدول ۲- داده‌های مربوط به روش براون و بری [1]

مقدار	پارامتر
۰٫۶۵	m_p
۰٫۲	s_p
۰٫۲	m_r
۰٫۰۰۰۱	s_r
۳۰	زاویه‌ی اصطکاک داخلی پیک (ϕ_p)
۳۰	زاویه‌ی اتساع سنگ سالم (ϕ_p)
۰	زاویه‌ی اتساع سنگ شکسته (ϕ_r)
۲۰	مدول یانگ (E) (گیگاپاسکال)
۰٫۲	ضریب پواسون (ν)
۲۷	تنش اولیه (P_o) (مگاپاسکال)
۳٫۰	شعاع تونل (r_o) (متر)
۴۰	σ_c (مگاپاسکال)
۳۰۰	ارتفاع سطح آب زیرزمینی (h) (متر)
10^{-6}	نفوذپذیری توده‌سنگ (K_o) (متر بر ثانیه)

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج حاصل از *utunnel* و روش براون و بری ($h = 300m$)

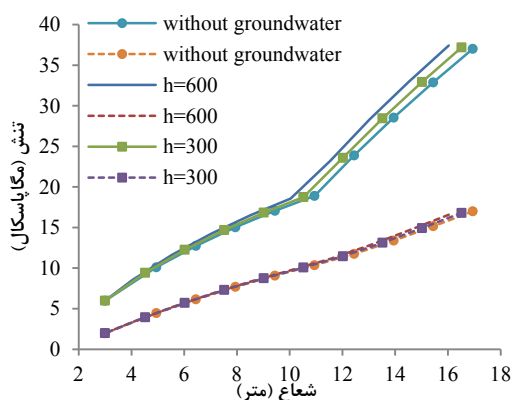
<i>utunnel</i>			پارامتر
$\varphi = 0$	$\varphi = \phi/4$	$\varphi = \phi/2$	
۱۶,۵۱۸۴	۱۷,۱۲۳۷	۱۷,۷۴۲۶	شعاع الاستوپلاستیک (r_e) (متر)
۱۶,۸۰۷۳	۱۶,۸۱۲۲	۱۶,۸۱۶۹	تنش شعاعی در مرز الاستوپلاستیک (σ_{re}) (مگاپاسکال)
۳۷,۱۹۲۷	۳۷,۱۸۷۸	۳۷,۱۸۳۱	تنش مماسی در مرز الاستوپلاستیک ($\sigma_{\theta e}$) (مگاپاسکال)
۰,۰۸۸۱	۰,۱۴۹	۰,۳۰۲	تغییر شکل زمین قبل از نصب پوشش (متر)

در شکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ تاثیر شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی بر منحنی مشخصه‌ی زمین، نمودارهای تنش شعاعی و مماسی و فشار آب حفره‌ای، با ثابت نگه داشتن زاویه‌ی اتساع با استفاده از *utunnel* نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰- منحنی مشخصه‌ی زمین در ناحیه‌ی پلاستیک

برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی ($\varphi = 0^\circ$)



شکل ۱۱- نمودار تنش شعاعی و مماسی ناحیه‌ی پلاستیک

برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی (خطوط ممتد تنش

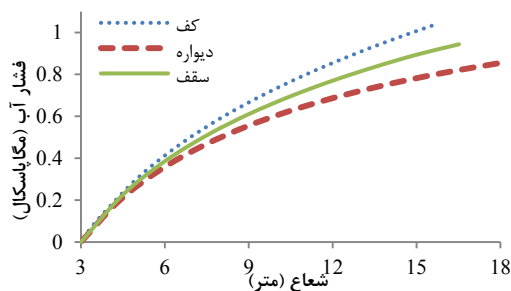
مماسی و خطوط نقطه‌چین تنش شعاعی) ($\varphi = 7.5^\circ$)

در مدل براون و بری [1] تحلیل تنش و کرنش همانند برنامه‌ی *utunnel* با استفاده از تنش کل در معادلات تعادل انجام گرفته است؛ اما اثرات تغییرات زاویه‌ی اتساع و نموکرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است. ضمن این‌که در مدل براون و بری از مدل تراوش شعاعی استفاده شده است. در مدل فهیمی فر و زارعی فرد [7] نیز با وجود تحلیل دقیق‌تر ناحیه‌ی الاستیک با استفاده از مدل تراوش غیرشعاعی کولیمباس [8]، اثرات تغییرات زاویه‌ی اتساع و نموکرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک در نظر گرفته نشده است. اما در *utunnel* علاوه بر تحلیل ناحیه‌ی الاستیک با استفاده از مدلی دقیق، کرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک نیز با توجه به زاویه‌ی اتساع محاسبه شده و اثر تغییرات زاویه‌ی اتساع بر عملکرد تونل در ناحیه‌ی پلاستیک مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به اثر زاویه‌ی اتساع و نموکرنش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک، شعاع الاستوپلاستیک با افزایش زاویه‌ی اتساع، افزایش می‌یابد. همچنین با ثابت نگه داشتن فشار پوشش در مدل ارایه شده، با افزایش زاویه‌ی اتساع تغییر شکل زمین به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

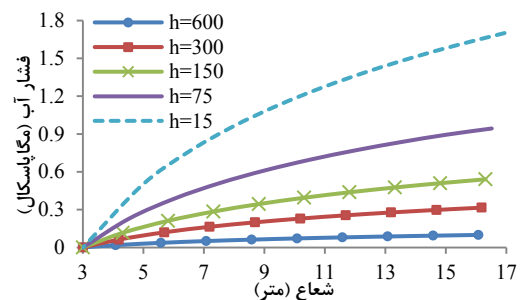
نسبت نفوذناپذیری در ناحیه‌ی پلاستیک به نفوذپذیری اولیه، از جدار حفاری تا مرز الاستوپلاستیک به شدت زیاد است و در مدل براون و بری از ۱ در مرز الاستوپلاستیک تا ۱۶ در مرز تونل تغییر می‌کند. در *utunnel* با افزایش زاویه‌ی اتساع، نسبت نفوذپذیری افزایش می‌یابد. برای زاویه‌ی اتساع صفر این نسبت در مقدار صفر ثابت می‌ماند؛ اما با افزایش زاویه‌ی اتساع به ۷,۵ درجه، این نسبت از ۱ در مرز الاستوپلاستیک تا ۲۴ در مرز خارجی تونل تغییر می‌کند.

این‌که فشار آب محاسبه شده در کف تونل نسبت به سقف تونل مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهد (شکل ۱۳)؛ به سبب اثر بار شکسته، تغییر شکل زمین قبل از نصب پوشش در سقف تونل مقدار بیش‌تری نسبت به کف تونل محاسبه می‌شود. همچنین به دلیل اثر بار شکسته، شعاع الاستوپلاستیک از کف تا سقف تونل از ۱۵/۹۵ متر به ۱۸/۴۵ متر افزایش می‌یابد.

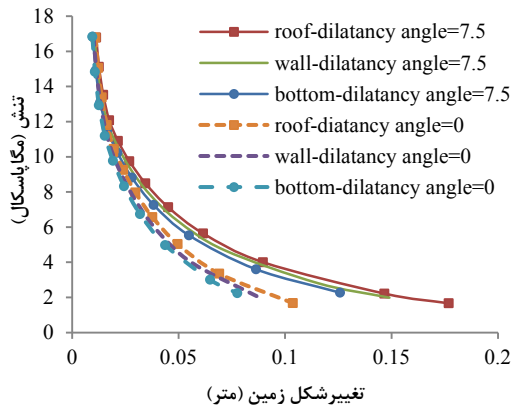


شکل ۱۳- نمودار فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی پلاستیک برای سقف، کف و دیواره تونل ($\varphi = 7.5^\circ$)

تغییر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در مقادیر کوچک تاثیر چندانی بر شعاع الاستوپلاستیک و تغییرشکل زمین قبل از نصب پوشش نخواهد داشت، به علت تنش اولیه‌ی بالای زمین در اطراف تونل و جنس نسبتاً خوب توده‌سنگ (پارامترهای مقاومتی مناسب) در اطراف محل حفاری تونل، تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده‌ی مورد مطالعه، تاثیر زیادی بر رفتار توده‌سنگ اطراف نخواهد داشت.



شکل ۱۲- نمودار فشار آب حفره‌ای برای شرایط مختلف سطح آب زیرزمینی ($\varphi = 7.5^\circ$)



شکل ۱۴- منحنی مشخصه‌ی زمین در ناحیه‌ی پلاستیک برای سقف، کف و دیواره تونل

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش گام به گام جدیدی برای تحلیل تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی بر پایه‌ی روش براون و بری ارایه شده است. در این روش با در نظر گرفتن اثر نمونش الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک و زاویه‌ی اتساع، روش براون و بری توسعه یافته است. برای تحلیل هیدرولیکی در ناحیه‌ی الاستیک از مدل توسعه‌یافته‌ی مینگ و در ناحیه‌ی پلاستیک از مدل تراوش شعاعی داری استفاده شده است.

در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ با در نظر گرفتن اثر بار شکسته بر پایداری تونل، نمودار فشار آب حفره‌ای و منحنی مشخصه‌ی زمین نشان داده شده‌اند. با استفاده از مدل ارایه شده برای تحلیل هیدرولیکی، فشار آب حفره‌ای در سقف، کف و دیواره تونل محاسبه می‌شود. سپس با توجه به در نظر گرفتن شرایط تقارن محوری، برای لحاظ نمودن دقت بیش‌تر برای محاسبات تنش و تغییر شکل، فشار آب حفره‌ای مربوط به هر قسمت (سقف، دیواره و کف) در مدل تقارن محوری جایگذاری و تنش و تغییر شکل در توده‌سنگ اطراف ناحیه‌ی مربوطه محاسبه می‌شوند.

در مدل مربوطه برای لحاظ نمودن اثر بار شکسته، $\gamma_r [r_e - r(i)] \sin \theta$ به مقادیر تنش شعاعی محاسبه شده در هر گام اضافه می‌شود. گزاره‌ی بالا قابلیت استفاده برای تمام جهات اطراف تونل را با توجه به لحاظ نمودن اثر زاویه، دارد. به این صورت که بطور مثال برای کف، دیواره و سقف تونل به ترتیب $-\gamma_r (r_e - r(i))$ ، صفر و $\gamma_r (r_e - r(i))$ به مقدار تنش شعاعی نقطه‌ی مورد نظر در همان گام اضافه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، با وجود

پلاستیک، با افزایش زاویه‌ی اتساع افزایش می‌یابد.
 ۲- با توجه به این‌که استفاده از مدل تراوش شعاعی برای تونل‌های کم عمق با توجه به خطای قابل توجه امکان‌پذیر نیست، از ترکیب مدل دقیق غیرشعاعی مینگ و مدل شعاعی دارسی برای مدلسازی توزیع فشار آب حفره‌ای اطراف تونل استفاده شده است. با استفاده از توسعه‌ی مدل تراوش مینگ، مدلی جدید برای توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی الاستیک اطراف تونل ارائه شده است. با استفاده از مدل ارائه شده، محاسبه‌ی فشار آب حفره‌ای در هر نقطه‌ای اطراف تونل امکان‌پذیر خواهد بود. همچنین با استفاده از رابطه‌ی دارسی با فرض جریان شعاعی و با در نظر گرفتن اندرکنش هیدرومکانیکی و نفوذپذیری ثانویه، مدلی برای توزیع فشار آب حفره‌ای در ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل هیدرولیکی، با افزایش سطح آب زیرزمینی، شعاع الاستوپلاستیک و تغییرشکل زمین قبل از نصب پوشش افزایش می‌یابد، همچنین فشار آب حفره‌ای از سقف تا کف تونل نیز افزایش خواهد یافت.

۳- برای رسم منحنی مشخصه‌ی زمین برای سقف و کف تونل، باید اثر وزن بار شکسته در نظر گرفته شود. به این ترتیب اثر وزن بار شکسته، شعاع الاستوپلاستیک و همگرایی تونل قبل از نصب پوشش از کف تا سقف تونل افزایش می‌یابد.

در این روش، در هرگام یک میلی‌متر به شعاع افزوده می‌شود، به نحوی که برای مثال اول حدود ۳۰۰۰ حلقه و برای مثال دوم حدود ۵۰۰۰ حلقه برای برآورده شدن شرط مرزی در هر بار محاسبه‌ی شعاع الاستوپلاستیک لازم است. با توجه به تعداد حلقه‌ها، به ازای هر شعاعی از توده‌سنگ اطراف تونل، محاسبات با دقت بسیار بالایی انجام شده است. دقت و کاربرد عملی مدل ارائه شده در مقایسه با روش ارائه شده برای تحلیل الاستوپلاستیک تونل توسط پارک و روش ارائه شده برای تحلیل تونل زیر سطح آب زیرزمینی توسط براون و بری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش به صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- در مدل ارائه شده، بر خلاف روش براون و بری نمو کرنش الاستیک و پلاستیک بصورت جداگانه در هر حلقه محاسبه شده است. با افزایش زاویه‌ی اتساع، کرنش پلاستیک در هر حلقه افزایش و با افزایش کرنش پلاستیک، تغییرشکل توده‌سنگ و شعاع الاستوپلاستیک نیز افزایش می‌یابد. با توجه به محاسبه‌ی جداگانه کرنش الاستیک و پلاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک، نفوذپذیری ثانویه با مجذور کرنش پلاستیک رابطه دارد؛ بنابراین مدل ارائه شده، معیار دقیق‌تری برای در نظرگرفتن اندرکنش هیدرومکانیکی نسبت به مدل براون و بری ارائه می‌دهد. با توجه به در نظرگرفتن کرنش پلاستیک و الاستیک در ناحیه‌ی پلاستیک، نسبت نفوذپذیری ثانویه به اولیه در ناحیه‌ی

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
σ_r	MPa	تنش شعاعی	r_o	m	شعاع تونل
σ_θ	MPa	تنش مماسی	r_e	m	شعاع الاستوپلاستیک
σ_r'	MPa	تنش موثر شعاعی	r_s	m	شعاع نرم‌کرنشی
σ_θ'	MPa	تنش موثر مماسی	i_r	-	گرادیان هیدرولیکی
σ_1'	MPa	تنش موثر اصلی بزرگ‌تر	h	m	ارتفاع سطح آب زیرزمینی از مرکز تونل
σ_3'	MPa	تنش موثر اصلی کوچک‌تر	h_1	m	ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سقف تونل
σ_c	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوره	P_w	MPa	فشار آب حفره‌ای
ε_r	-	کرنش شعاعی	P_a	MPa	فشار آب حفره‌ای در مرز تونل

دبی تراوش	m^3/s	q	کرنش مماسی	-	ε_θ
سرعت جریان تراوش	m/s	V	کرنش حجمی	-	ε_v
وزن مخصوص آب	KN/m^3	γ_w	کرنش اصلی بزرگ‌تر توده‌سنگ	-	ε_1
فشار پوشش	MPa	P_i	کرنش اصلی کوچک‌تر توده‌سنگ	-	ε_3
تنش اولیه	MPa	P_o	تغییر شکل شعاعی	m	u
ثابت اندرکنش هیدرومکانیکی	-	η	فاصله‌ی شعاعی از مرکز تونل	m	r
نفوذپذیری توده‌سنگ	m/s	K_o	زاویه بصورت پادساعتگرد از محور افقی تونل	degree	θ
نفوذپذیری ثانویه‌ی توده‌سنگ	m/s	K_r	وزن مخصوص توده‌سنگ	KN/m^3	γ_r
زاویه‌ی اتساع	degree	φ	ضریب پواسون	-	ν
مدول برشی توده‌سنگ	MPa	G	مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ	MPa	E
پارامترهای توده‌سنگ در مدل هوک و براون	-	m, s	پارامتر نرم‌کرنشی توده‌سنگ	-	γ
پارامترهای سنگ بکر در مدل هوک و براون	-	m_i, s_i	پارامتر نرم‌کرنشی به پلاستیک	-	γ^*
پارامترهای φ, σ_c, m, s در توده‌سنگ اولیه	-	w_p	گرادیان ε_3^p نسبت به ε_1^p در ناحیه‌ی نرم‌کرنشی	-	g
پارامترهای φ, σ_c, m, s در توده‌سنگ شکسته	-	w_r	گرادیان ε_3^p نسبت به ε_1^p در ناحیه‌ی پلاستیک کامل	-	f
پارامترهای φ, σ_c, m, s برای المان‌های متفاوت	-	\bar{w}	پارامتر نشان دهنده‌ی طول ناحیه‌ی نرم‌کرنشی	-	α
			زاویه‌ی اصطکاک داخلی	degree	ϕ

۹- پیوست‌ها

۹-۱- پیوست الف: روند محاسبات در *utunnel*

۱- محاسبات مقدماتی

$$\varepsilon_\theta(1) = \frac{M\sigma_c}{2G} \quad .6$$

$$\rho(1) = \frac{r_1}{r_e} = 1 \quad .7$$

$$w(1) = w_p \quad .8$$

$$\varepsilon_r^p(1) = 0; \varepsilon_\theta^p(1) = 0; \gamma^p(1) = 0 \quad .9$$

$$u(1) = \varepsilon_\theta(1)r(1) \quad .10$$

$$i = i + 1 \quad .11$$

۲- ترتیب محاسبات برای هر حلقه در ناحیه‌ی پلاستیک

$$D = 0.001m \quad .1$$

$$r(i) = r(i-1) + D \quad .2$$

$$\rho(i) = \frac{r(i)}{r(1)} \quad .3$$

$$P_w(r(1), \theta) = \gamma_w q / 2\pi \int_{r_o}^{r_e} \frac{1}{rK_r(r)} dr + \quad .1$$

$$P_a - \gamma_w(r(1) - r_o) \sin \theta$$

$$M = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{m}{4} \right)^2 + m \left(\frac{P_o - P_w(r(1), \theta)}{\sigma_c} \right) + s \right\}^{0.5} \quad .2$$

$$-\frac{m}{8}$$

$$\sigma_r(1) = P_o - M\sigma_c \quad .3$$

$$\sigma_\theta(1) = P_o + M\sigma_c \quad .4$$

$$\varepsilon_r(1) = -\frac{M\sigma_c}{2G} \quad .5$$

$$\Delta \varepsilon_r^p(i) = -K(i) \Delta \varepsilon_\theta^p(i)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_r^p(i) = \varepsilon_r^p(i-1) + \Delta \varepsilon_r^p(i) \\ \varepsilon_\theta^p(i) = \varepsilon_\theta^p(i-1) + \Delta \varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad ۱۵$$

$$\begin{cases} \varepsilon_r(i) \\ \varepsilon_\theta(i) \end{cases} = \begin{cases} \varepsilon_r(i-1) \\ \varepsilon_\theta(i-1) \end{cases} + \begin{cases} \Delta \varepsilon_r^e(i) \\ \Delta \varepsilon_\theta^e(i) \end{cases} + \begin{cases} \Delta \varepsilon_r^p(i) \\ \Delta \varepsilon_\theta^p(i) \end{cases} \quad ۱۶$$

$$u(i) = -\varepsilon_\theta(i) r(i) \quad ۱۷$$

$$\gamma^p(i) = \gamma^p(i-1) + (\Delta \varepsilon_\theta^p(i) - \Delta \varepsilon_r^p(i)) \quad ۱۸$$

$$(\sigma_r(i) + \gamma_r(r(1) - r(i)) \sin \theta) < p_i \quad \text{اگر } ۱۹$$

$$i = i + 1$$

و روند ۱۹ مرحله‌ی محاسبات برای حلقه‌ی بعدی تکرار می‌شود.

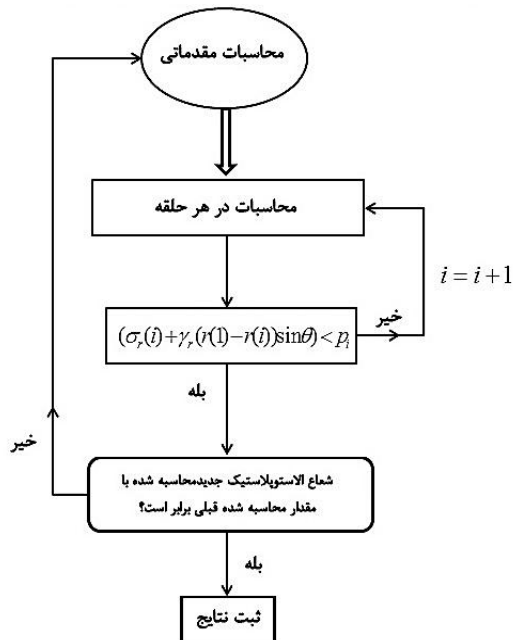
$$(\sigma_r(i) + \gamma_r(r(1) - r(i)) \sin \theta) \geq p_i \quad \text{اگر } ۲۰$$

$$r(1) = r_e = \frac{r(i)}{\rho(i)}$$

و محاسبات با در نظر گرفتن $r(1) = r_e$ جدید از مرحله‌ی مقدماتی تکرار می‌شود.

روند محاسبات بالا تا زمانی که شعاع الاستوپلاستیک به مقدار ثابتی برسد، ادامه می‌یابد.

۹-۲- پیوست ب: الگوریتم برنامه



شکل ب-۱ الگوریتم برنامه‌ی utunnel

$$w(i) = \begin{cases} w_p - (w_p - w_r) \frac{\gamma^p(i)}{\gamma^{p*}} & 0 < \gamma^p(i) < \gamma^{p*} \\ w_r & \gamma^p(i) > \gamma^{p*} \end{cases} \quad ۴$$

$$\bar{w}(i) = \frac{1}{2} (w(i-1) + w(i)) \quad ۵$$

$$P_w(r(i), \theta) = \gamma_w q / 2\pi \int_{r_o}^{r(i)} \frac{1}{r K_r(r)} dr + \quad ۶$$

$$P_a - \gamma_w (r(i) - r_o) \sin \theta$$

$$c = \left[\frac{r_{i-1} - r_i}{r_{i-1} + r_i} \right]^2$$

$$a = \sigma_r^2(i-1) - \left[\frac{1}{2} \bar{m}(i) \bar{\sigma}_c(i) (\sigma_r(i-1)) \right. \quad ۷$$

$$\left. - P_w(i) - P_w(i-1) + \bar{s}(i) \bar{\sigma}_c^2(i) \right]$$

$$b = \sigma_r(i-1) + c \bar{m}_a(i) \bar{\sigma}_c(i)$$

$$\sigma_r(i) = b - \sqrt{b^2 - a} \quad ۸$$

$$\sigma_\theta(i) = \sigma_r(i)$$

$$+ \left[\bar{m}(i) \bar{\sigma}_c(i) \sigma_r(i) + \bar{s}(i) \bar{\sigma}_c^2(i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad ۹$$

$$\begin{cases} \Delta \sigma_r(i) \\ \Delta \sigma_\theta(i) \end{cases} = \begin{cases} \sigma_r(i) - \sigma_r(i-1) \\ \sigma_\theta(i) - \sigma_\theta(i-1) \end{cases} \quad ۱۰$$

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_r^e(i) \\ \Delta \varepsilon_\theta^e(i) \end{cases} = \frac{1}{2G} \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu \\ -\nu & 1-\nu \end{bmatrix} \begin{cases} \Delta \sigma_r(i) \\ \Delta \sigma_\theta(i) \end{cases} \quad ۱۱$$

$$K(i) = \frac{1 + \sin \varphi(i)}{1 - \sin \varphi(i)} \quad ۱۲$$

$$P_1 = \left(\frac{\Delta \varepsilon_\theta^e(i)}{r(i) - r(i-1)} - \frac{1}{G} \frac{\left[\bar{m}(i) \bar{\sigma}_c(i) \sigma_r(i) + \bar{s}(i) \bar{\sigma}_c^2(i) \right]^{\frac{1}{2}}}{r(i) + r(i-1)} - \frac{2(\varepsilon_\theta^p(i-1) - \varepsilon_r^p(i-1))}{r(i) + r(i-1)} \right) \quad ۱۳$$

$$P_2 = \frac{1}{r(i) - r(i-1)} + \frac{2(1 + K(i))}{r(i) + r(i-1)}$$

$$\Delta \varepsilon_\theta^p(i) = \frac{P_1}{P_2} \quad ۱۴$$

۱۰- منابع‌ها

- [1] Brown, E., & Bray, J. (1982). Rock-Support Interaction Calculations for Pressure Shafts and Tunnels. *ISRM Symposium, Rock Mechanics Related to Caverns and Pressure Shafts* (pp. 26-28). Aachen, Germany. A.A. Balkema. ISBN 10: 9061912334.
- [2] Fazio, L., & Ribacchi, R. (1984). Influence of Seepage on Tunnel Stability. *ISRM Symposium on Design and Performance of Underground Excavations* (pp. 173-184). Cambridge: British Geotechnical Society, UK. Thomas Telford. ISBN: 9780727735652.
- [3] Carosso, G., & Giani, G. (1988). Analytical Solutions for Potentials and Stresses around a Cavity under a Water Table. In Serrano (Ed.), *International Congress on Tunnels and Water*, 3, (pp. 1209-1217). Madrid, Spain. Taylor & Francis Group. ISBN: 9061918219.
- [4] Nam, S. W., & Bobet, A. (2006). Liner Stresses in Deep Tunnels below the Water Table. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(6), 626–635. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.11.004>.
- [5] Lee, S. W., Jung, J. W., Nam, S. W., & Lee, I. M. (2007). The Influence of Seepage Forces on Ground Reaction Curve of Circular Opening. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(1), 28-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.03.004>.
- [6] Shin, Y. j., Kim, B. M., shin, J. H., & Lee, I. M. (2010). The Ground Reaction Curve of Underwater Tunnels Considering Seepage Forces. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 315-324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.005>.
- [7] Fahimifar, A., & Zareifard, M. R. (2009). A Thoretical Solution for Analysis of Tunnels below Groundwater Considering the Hydraulic-Mechanical Coupling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 634-646. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.06.002>.
- [8] Kolymbas, D., & Wagner, P. (2007). Groundwater Ingress to Tunnels-The Exact Analytical Solution. *Tunnelling And Underground Space Technology*, 22(1), 23-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2006.02.001>.
- [9] Ming, H., Meng, S. W., Tan, Z. S., & Xiu, Y. W. (2010). Analytical Solution for Steady Seepage into an Underwater Circular Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 391-396. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.002>.
- [10] Timoshenko, S., & Goodier, J. (1994). *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill. ISBN: 9780070701229.
- [11] Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of Geotechnical Engineering*, 106(9), 1013-1035.
- [12] Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B., & Hoek, E. (1983). Ground Response Curves for Rock Tunnels. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(1), 15-39. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:1\(15\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:1(15)).

[۱۳] قدمی، ح. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری تونل‌های تحت فشار با در نظر گرفتن اثر تراوش. تفرش، ایران: پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تفرش.

- [14] Park, K. H., Tontavanich, B., & Lee, J. G. (2008). A Simple Procedure for Ground Response Curve of Circular Tunnel in Elastic-Strain Softening Rock Masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 151-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.03.002>.
- [15] Alonso, E., Alejano, L. R., Varas, F., Fdez-Manin, G., & Carranza-Torres, C. (2003). Ground Response Curves for Rock Masses Exhibiting Strain-Softening Behavior. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(13), 1153-1185. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.315>.
- [16] Lee, Y. K., & Pietruszczak, S. (2008). A New Numerical Procedure For Elasto-Plastic Analysis of a Circular Opening Excavated in a Strain-Softening Rock Mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 588-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.11.002>.

بررسی تاثیر پارامترهای اجرایی ماشین TBM بر نرخ نفوذ آن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی - مطالعه‌ی موردی تونل بلند زاگرس

سید مصلح افتخاری^{۱*}؛ علیرضا باغبانان^۲؛ راحب باقرپور^۳

۱- دانشجوی دکترای تخصصی؛ رشته‌ی مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ دانشگاه صنعتی اصفهان

۲ و ۳- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۸/۰۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی

ماشین حفر تونل (TBM)
نرخ نفوذ
شبکه‌های عصبی مصنوعی
نیروی محوری پیشران
گشتاور

چکیده

نرخ نفوذ یکی از پارامترهای مهم در تعیین مدت زمان حفاری در عملیات تونلسازی است. از آنجا که عملیات حفاری اندرکنش میان زمین و ماشین است؛ بنابراین دو دسته‌ی کلی پارامتر موثر بر نرخ نفوذ وجود دارد. از طرفی در شرایط یکسان زمین، به دلیل پارامترهای اجرایی متفاوت ماشین، مقدار نرخ نفوذ متفاوت است. بنابراین در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای ماشین بر نرخ نفوذ با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته شده است. پس از انتخاب پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ و ایجاد شبکه‌ی عصبی بهینه، تحلیل حساسیت بر روی پارامتر نیروی محوری پیشران و گشتاور انجام شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نیروی محوری پیشران و گشتاور در یک محدوده‌ی بهینه، سبب افزایش نرخ نفوذ می‌شود و به منظور دستیابی به نرخ نفوذ حداکثر می‌توان از زوج نیروی محوری پیشران و گشتاور بهینه استفاده نمود.

۱- مقدمه

یکی از عوامل تعیین‌کننده‌ی انتخاب روش حفاری تونل (مکانیزه یا سنتی)، مدت زمان حفر آن است. در روش‌های سنتی، زمان حفر تونل، تابع پیشروی در یک مرحله‌ی آتشکاری است و در حفاری مکانیزه مدت زمان حفر تونل را نرخ پیشروی (*AR: Advance Rate*) ماشین تعیین می‌کند. نرخ نفوذ (*PR: Penetration Rate*)، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار بر سرعت حفاری یا نرخ پیشروی *TBM* است. نرخ نفوذ، نسبت فاصله‌ی حفاری شده به زمان انجام آن در طول حفاری پیوسته یا به عبارتی برابر با نرخ پیشروی آنی ماشین است و معمولاً بر حسب میلی‌متر بر دور تاج حفر یا متر بر ساعت بیان می‌شود. در صورت پیش‌بینی قابل قبول از نرخ نفوذ و به تبع آن از نرخ پیشروی، تخمین

قابل اطمینانی از زمان و بودجه‌ی لازم جهت انجام پروژه می‌تواند صورت پذیرد.

با توجه به اهمیت پیش‌بینی نرخ نفوذ در عملیات تونلسازی، هم زمان با ساخت *TBM* همواره محققانی به دنبال یافتن روشی برای پیش‌بینی مقدار آن بوده‌اند و تا کنون روش‌های متعدد تئوری و تجربی نیز ارائه شده است. در روش‌های تئوری محققانی از جمله رگسبروگ و فیلیپس (*Roxborough & Phillips*)، سانئو (*Sanio*) و بوید (*Boyd*) با توجه به ارتباط تئوری میان پارامترهای ماشین و نفوذ دیسک و همچنین در برخی موارد پارامترهایی از سنگ به پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداخته‌اند [1] و [2]. همچنین، انیستیتو مهندسی حفاری معدن کلرادو برای پیش‌بینی کارایی *TBM* بر مبنای ۲۰ سال مطالعات تئوریک،

* اصفهان؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱؛ شماره‌ی تلفن: ۰۳۱۱-۳۹۱۵۱۴۸؛ رایانامه: eftekhari_mosleh@yahoo.com & s.eftekhari@mi.iut.ac.ir

و عملکرد موازی آن به وجود آمده است و به مدل‌های ریاضی محض نیازی ندارد؛ بلکه همانند انسان تجربه کسب کرده و سپس نتیجه‌ی این تجربیات را تعمیم می‌دهد. در مواردی که رابطه‌ی مشخصی میان پارامترهای ورودی و خروجی وجود نداشته و ارتباط میان آن‌ها توسط روش‌های مرسوم قابل شناسایی نیست، استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی به سبب عدم نیاز به فرمول‌بندی و پویا بودن شبکه و همچنین امکان لحاظ کردن اثر پارامترهای موثرتر، ایده‌ی خوبی برای تخمین و مدل‌سازی به شمار می‌رود. در واقع شبکه‌ی عصبی با توجه به قابلیت‌هایش، می‌تواند راه‌های ساده‌تر و کم هزینه‌تر و نتایج دقیق‌تری را پیش روی مهندسين، قرار دهد.

به منظور پیش‌بینی یک پارامتر با استفاده از شبکه‌ی عصبی نیاز به سابقه‌ای از آن پارامتر و پارامترهای موثر بر آن است تا بتوان پس از ساخت شبکه‌ای مناسب، از آن به منظور پیش‌بینی کمیت مورد نظر بهره گرفت [۱۴]. گریمما و همکارانش (*Grima, et al.*) تصمیم به پیش‌بینی نرخ نفوذ با توجه به سه مجموعه‌ی کلی موثر بر نرخ نفوذ از قبیل مشخصات سنگ بکر، ناپیوستگی‌ها و مشخصات ماشین گرفتند. این محققین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری (*UCS*) به عنوان مشخصه‌ی سنگ بکر، فراوانی شکستگی مغزه (*CFF: Core Fracture Frequency*) به عنوان مشخصه‌ی ناپیوستگی، سرعت چرخش تاج حفار (*RPM*)، قطر دیسک و نیروی محوری پیشران در هر دیسک به عنوان مشخصات ماشین را در لایه‌ی ورودی و نرخ نفوذ را در لایه خروجی جای داده‌اند [۱۵].

مهدوری و یآوری پارامترهای نوع سنگ، مقاومت فشاری تک محوره، درصد کوارتز، قطر دیسک، نیروی نفوذ در هر دیسک و *RQD* را به عنوان پارامترهای ورودی و نرخ نفوذ را به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته‌اند [۱۶]. همچنین، یاگیز و همکارانش (*Yagiza, et al.*) چهار پارامتر مقاومت فشاری تک محوری، اندیس تردی، فاصله‌ی صفحات ضعف و زاویه‌ی بین این صفحات و محور تونل را به عنوان ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته‌اند و شبکه‌ای با چهار ورودی و یک خروجی ایجاد کرده‌اند. همچنین آن‌ها با استفاده از داده‌های مورد استفاده در شبکه‌ی عصبی به پیش‌بینی نرخ نفوذ به کمک رگرسیون‌گیری چند متغیره‌ی

آزمون‌های آزمایشگاهی و ارزیابی داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرائی، مدلی با عنوان *CSM (Colorado School of Mines)* ارائه کرده است [3]. فلسفه‌ی این روش تعیین نیروهای وارد بر دیسک برای یک مقدار معین نفوذ و متعاقباً تعیین نیروی پیشروی، گشتاور و توان لازم برای کله‌ی حفار بر مبنای این نیروها است.

روش تجربی بر مبنای ارتباط عملی و مشاهداتی بین پارامترهای زمین و ماشین برقرار است و به واسطه‌ی برآزش بین خصوصیات سنگ و پارامترهای ماشین با نرخ نفوذ به دست آمده است. تعدادی از محققان از جمله تارکی (*Tarkoy*)، گراهام (*Graham*)، فارمر و گلوپ (*Farmer & Glossop*) و نلسون (*Nelson*) تنها با توجه به یک پارامتر از سنگ و یا ترکیب آن با یک پارامتر ماشین به پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداخته‌اند [4]، [5]، [6] و [7]. محققانی از جمله کاسینلی (*Cassineli*)، ایناراتو (*Innaurato*)، پارک (*Park*) و حسن‌پور نخ نفوذ را تابعی از سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ از قبیل *RMR*، *RSR*، *RQD* و *Q* معرفی کرده‌اند [8]، [9]، [10] و [11]. همچنین، روش *NTH* بر مبنای روابط تجربی بین پارامترهای مکانیکی، زمین‌شناسی سنگ و بهره‌وری ماشین با میزان پیشرفت واقعی تونل پایه‌گذاری شده است [12]. روش *Q_{TBM}* را بارتن (*Barton*) با اصلاحاتی بر سیستم *Q* از جمله میزان ساینده‌ی سنگ، درصد کانی‌های ساینده، متوسط بار دیسک، مقاومت توده‌سنگ و سطح تنش سنگ ارائه کرده است [13].

دو روش *NTH* و *Q_{TBM}* پارامترهای موثرتر را نسبت به سایر روش‌های تجربی در نظر گرفته و از میان روش‌های تجربی، بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت روش‌های تجربی این است که به طور طبیعی تمام تاثیرات ناشی از زمین و ماشین را در نظر می‌گیرند؛ اما با این حال، رشد فناوری و ارائه‌ی ماشین‌هایی با قابلیت‌های متفاوت، استفاده از این روش‌ها را محدود می‌سازد. با این وجود، به دلیل اینکه مدل‌های ارائه شده در یک حالت خاص از شرایط زمین پیشنهاد شده‌اند، قابل تعمیم به تمام شرایط نیستند.

در سال‌های اخیر از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان ابزاری جدید جهت پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از ساختار مغز

نظر گرفت. در ادامه پس از توضیح مختصری در ارتباط با منطقه‌ی مورد مطالعه و مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی به ایجاد شبکه‌ی عصبی مصنوعی بهینه جهت پیش‌بینی نرخ نفوذ با در نظر گرفتن پارامترهای موثر پرداخته شده است. پس از آن به منظور بررسی اثر پارامترهای اجرایی ماشین، تحلیل حساسیت بر این پارامترها به کمک شبکه‌ی عصبی بهینه صورت گرفته است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، بخشی از قطعه‌ی دوم تونل بلند زاگرس واقع در غرب کشور است. قطعه‌ی دوم این تونل به طول ۲۶ کیلومتر و به قطر ۶٫۷۳ متر بوسیله‌ی ماشین حفاری تونل (*TBM*) با دو سپر در حال اجرا است. حداکثر عمق تونل ۱۰۰۰ متر و میانگین عمق آن ۴۰۰ متر است. مشخصات مربوط به تونل و ماشین *TBM* در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات مربوط به تونل و *TBM* دو سپره [20]

مشخصات	اندازه
طول تونل (<i>KM</i>)	۲۶
قطر حفاری (<i>m</i>)	۶٫۷۳
تعداد دیسک	۴۲
فاصله‌ی دیسک‌ها (<i>mm</i>)	۹۰
قطر دیسک (<i>mm</i>)	۴۳۲
سرعت چرخش (<i>I/min</i>)	۰-۹٫۰۵

شکل ۱، برش زمین‌شناسی مسیر تونل را نشان می‌دهد. واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در برش با علائمی متشکل از حروف آغازین لیتولوژی آن مجموعه مشخص شده است. این علائم شامل: *LI* به عنوان نشانه‌ی آهک، *SH* نشانه‌ی شیل، *MA* نشانه‌ی مارن، *ML* نشانه‌ی آهک مارنی و *LS* نشانه‌ی شیل آهکی است. مرز واحدهای زمین‌شناسی مهندسی عملاً بر مرز واحدهای زمین‌شناسی منطبق است. با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته و با در نظر گرفتن تکرار واحدها در قسمت‌های گوناگون، در مجموع در محدوده‌ی مورد مطالعه، ۲۱ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تفکیک است [۲۱]. به

غیرخطی پرداخته‌اند [17]. از مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از شبکه‌ی عصبی و رگرسیون چندمتغیره‌ی غیرخطی با مقادیر واقعی نرخ نفوذ، این نتیجه حاصل شده است که نتایج شبکه‌ی عصبی نسبت به رگرسیون غیرخطی به واقعیت نزدیک‌تر است [17]. غلام‌نژاد با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، فاصله‌ی بین صفحات ضعف در توده سنگ و *RQD* پرداخته است [18]. ترابی و همکارانش نیز به کمک شبکه‌های عصبی به بررسی اثر پارامترهای ژئوتکنیکی بر نرخ نفوذ پرداخته و عنوان کرده‌اند که شبکه‌ی عصبی نسبت به روش آماری نتایج قابل اطمینان‌تری دارد [19].

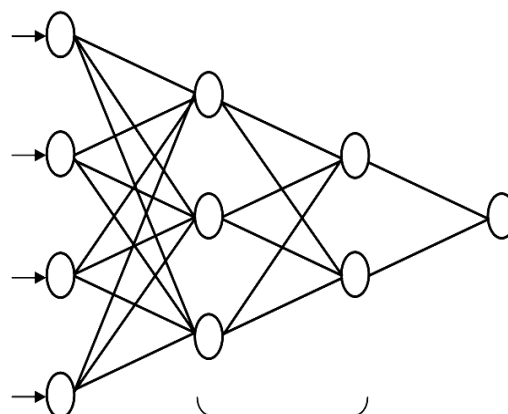
در تحقیقات گذشته برای پیش‌بینی نرخ نفوذ با شبکه‌های عصبی مصنوعی، بانک اطلاعاتی داده‌های ورودی و خروجی از چندین پروژه‌ی تونلسازی جمع‌آوری شده و برای هر مقطع سنگی تنها یک مقدار نرخ نفوذ در نظر گرفته شده‌است؛ اما از آنجا که در یک مقطع زمین‌شناسی، نرخ نفوذ در هر سیکل حفاری به دلیل پارامترهای اجرایی ماشین متفاوت، می‌تواند متغیر باشد؛ بنابراین انتخاب تنها یک مقدار مشخص برای نرخ نفوذ در یک نوع سنگ خاص چندان نزدیک به واقعیت نیست. در عین حال نتایج پیش‌بینی شبکه‌های عصبی مصنوعی محققان پیشین، بیانگر این موضوع است که روش شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند ابزاری مناسب به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ باشد. بنابراین با توجه به اهمیت تاثیر پارامترهای اجرایی ماشین بر نرخ نفوذ، در مطالعه‌ی حاضر به بررسی اثر این پارامترها بر نرخ نفوذ با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته شده‌است. دشواری یافتن رابطه‌ی میان پارامترهای اجرایی ماشین و نرخ نفوذ، قابلیت‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی در حل چنین مسائلی و امکان انجام تحلیل حساسیت پارامترهای موثر در نرخ نفوذ پس از ساخت شبکه‌ی عصبی بهینه از دیگر دلایل بکارگیری این روش برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در این پژوهش است.

در تحقیق حاضر بانک اطلاعاتی تنها از تونل بلند زاگرس جمع‌آوری شده‌است تا بتوان به ازای هر سیکل حفاری مقدار نرخ نفوذ آن را لحاظ کرده و در نتیجه اثر پارامترهای اجرایی بر نرخ نفوذ در یک مقطع سنگی را در

طراحی شده است را اجرا می‌گویند. در طی مرحله‌ی آموزش، وزن‌های داخلی شبکه‌ی عصبی که بر روی ورودی‌ها اعمال می‌شود آنقدر تغییر می‌کند تا به وضعیت مناسب برسد. پس از اتمام آموزش، داده‌های مجموعه‌ی اعتبارسنجی به شبکه داده می‌شود و پاسخ‌های شبکه با مقادیر واقعی کمیت مورد تخمین، مقایسه می‌شود. هر چه این دو سری داده (واقعی و تخمینی) بیش‌تر به هم شبیه باشند، قدرت تعمیم شبکه بیش‌تر خواهد بود [۱۴]، [۲۳]، [۲۴] و [22].

معمولاً از دو آماره، ضریب همبستگی و میانگین قدرمطلق خطا، برای ارزیابی اختلاف دو سری داده استفاده می‌شود. کاربرد دیگر مجموعه‌ی اعتبارسنجی در قطع زودهنگام آموزش است. بدین ترتیب که تا قبل از این‌که آموزش تا آخرین مرحله ادامه یابد، در مرحله‌ای که خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی به حداقل می‌رسد آموزش متوقف می‌شود [22].

یکی از پرکاربردترین شبکه‌های مورد استفاده برای تخمین و پیش‌بینی، شبکه‌های پیشرو با قانون پس انتشار خطا (*Feed Forward Back Propagation*) است. چنین شبکه‌هایی از دو مسیر اصلی تشکیل می‌شود. مسیر اول به مسیر رفت موسوم است که در این مسیر، بردار ورودی به شبکه اعمال می‌شود و تاثیراتش از راه لایه‌های میانی به لایه‌های خروجی انتشار می‌یابد. بردار خروجی تشکیل یافته در لایه‌ی خروجی، پاسخ واقعی شبکه است. در این مسیر پارامترهای شبکه، ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته می‌شوند. مسیر دوم به مسیر برگشت موسوم است. در این مسیر، برعکس مسیر رفت، پارامترهای شبکه تغییر و تنظیم می‌شوند. این تنظیم مطابق با قانون اصلاح خطا انجام می‌شود. سیگنال خطا، در لایه‌ی خروجی شبکه تشکیل می‌شود. بردار خطا برابر با اختلاف بین پاسخ مطلوب و پاسخ واقعی شبکه است. مقدار خطا پس از محاسبه در مسیر برگشت، از لایه‌ی خروجی و از طریق لایه‌های شبکه در کل شبکه توزیع می‌شود. چون توزیع اخیر، در خلاف مسیر ارتباطات وزنی صورت می‌پذیرد، واژه‌ی پس انتشار خطا برای توضیح اصلاح رفتاری شبکه انتخاب شده است. پارامترهای شبکه طوری تنظیم می‌شوند که پاسخ واقعی شبکه هر چه بیش‌تر، به پاسخ مطلوب نزدیک‌تر شود [۱۴] و [۲۳].



شکل ۲- ساختار لایه‌ای شبکه‌ی عصبی مصنوعی

پیش از پرداختن به عملیات شبیه‌سازی پیشنهاد شده است که داده‌ها در دامنه‌ی صفر و یک تغییر مقیاس داده شوند. یکی از دلایل تاکید بر قرار داشتن داده‌های ورودی در دامنه‌ی صفر تا یک، الزام توابع انتقال (مانند تابع سیگموئید) است که قادر به تمایز بین مقادیر خیلی بزرگ نیستند. هر چه مقدار ورودی این توابع بیش‌تر شود خروجی آن به سمت ۱ یا ۰ نزدیک‌تر می‌شود. مهم‌ترین دلیل تبدیل مقیاس ورودی‌ها به دامنه‌ی صفر تا یک کمک به آموزش شبکه است. از طرف دیگر این کار سبب سادگی بیش‌تر فرآیند می‌شود زیرا خروجی‌ها و ورودی‌های همه‌ی لایه‌های بعدی نیز در دامنه‌ی صفر تا یک قرار می‌گیرد [۱۴]، [۲۳]، [۲۴] و [22]. برای شبیه‌سازی و تخمین مسئله، شبکه‌ی عصبی سه مرحله را طی می‌کند:

۱- آموزش (*Training*)

۲- تعمیم (*Generalization*)

۳- اجرا (*Operation*)

آموزش فرایندی است که طی آن شبکه می‌آموزد تا الگوی موجود در ورودی‌ها را که به صورت مجموعه‌ی داده‌های آموزشی است، بشناسد. برای این منظور هر شبکه‌ی عصبی از مجموعه‌ای از قوانین یادگیری استفاده می‌کند. این قوانین نحوه‌ی یادگیری را تعریف می‌کنند. تعمیم، توانایی شبکه برای ارایه‌ی جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه‌ی آموزشی نبوده‌اند، است. استفاده از شبکه برای انجام عملکردی که به آن منظور

۴- پیش‌بینی نرخ نفوذ با شبکه‌های عصبی مصنوعی

به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، ابتدا پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ به منظور ایجاد ساختار شبکه انتخاب و سپس به شبیه‌سازی برای دستیابی به شبکه‌ی بهینه پرداخته می‌شود.

۴-۱- ایجاد ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی

عوامل موثر بر نرخ نفوذ TBM را می‌توان در سه دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی نمود که عبارتند از:

- ۱- پارامترهای مربوط به سنگ بکر
- ۲- پارامترهای مربوط به توده‌سنگ
- ۳- پارامترهای اجرایی ماشین

به منظور انتخاب پارامترهای ورودی شبکه تلاش شده است تا اثر این سه دسته عوامل، در پیش‌بینی در نظر گرفته شود. در مجموع برای پیش‌بینی نرخ نفوذ، ۹ پارامتر به عنوان پارامترهای ورودی و موثر بر نرخ نفوذ انتخاب شده است:

- ۱- مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)
- ۲- مقاومت کششی برزلی (مگاپاسکال)
- ۳- درصد کوارتز (بیانگر قابلیت سایش سنگ)
- ۴- RQD (برای توصیف تعداد درزه‌ها در سنگ)
- ۵- RMR (بیانگر شرایط توده‌سنگ)
- ۶- نوع سنگ با کدگذاری مطابق جدول ۳
- ۷- نیروی محوری پیشران یا تراست (کیلونیوتن)
- ۸- گشتاور (کیلونیوتن متر)
- ۹- سرعت چرخش تاج حفار (دور بر دقیقه)

پارامتر خروجی شبکه‌ی عصبی نیز، نرخ نفوذ (میلی‌متر بر دور تاج حفار) است. این پارامترها به سادگی در مراحل انجام پروژه و بدون نیاز به انجام آزمایش و تکنیک‌های ویژه، قابل جمع‌آوری هستند.

جدول ۳- کدگذاری مربوط به نوع سنگ

نوع سنگ	کد
توده‌ای	۱
متوسط تا ضخیم لایه	۲
نازک تا متوسط لایه	۳
خرد شده	۴

انتخاب پارامترهای ورودی با توجه به سوابق تحقیقات انجام شده که اثر پارامترهای مختلف بر نرخ نفوذ را به طور جداگانه مورد بررسی قرار داده‌اند، صورت گرفته است. به عنوان مثال در تعدادی از تحقیقات تاثیرگذاری مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر بر نرخ نفوذ بررسی و به اثبات رسیده است. در نتیجه این پارامتر به عنوان ورودی شبکه‌ی عصبی انتخاب شده است. همچنین به این سبب که با پارامترهای ماشین متفاوت در شرایط یکسان توده‌سنگ، مقدار نرخ نفوذ می‌تواند متفاوت باشد؛ بنابراین پارامترهای ماشین نیز به عنوان ورودی شبکه در نظر گرفته شده است.

در نگاه اول به نظر می‌رسد که بین برخی از پارامترهای ورودی یک همبستگی درونی وجود دارد (RQD و RMR) که ممکن است سبب خطا در نتایج شود. با این حال، هر پارامتر موضوع مشخصی را شرح می‌دهد و اطلاعات تهیه شده می‌تواند به فهم بیشتر مسئله کمک نماید. به عنوان مثال، در یک مقدار RMR ، انتظار رفتار یکسانی در موارد مختلف وجود دارد در صورتی که تفاوت در مقدار RQD ، ممکن است منجر به تفاوت در شرایط پایداری شود.

برای ساخت شبکه‌ی مناسب نیاز به زوج‌های ورودی و خروجی از داده‌ها است که از ۱۰ کیلومتر ابتدایی از حفر تونل انتخاب و در یک بانک اطلاعاتی ذخیره شده است [۲۵] و [۲۶]. همان‌طور که در بخش مبانی شبکه‌های عصبی مصنوعی بیان شده است، یک شبکه باید با مجموعه‌ای از زوج‌ها به عنوان زوج آموزش مورد آموزش قرار گرفته و با زوج‌های مجموعه‌ی ارزیابی و آزمون مورد آزمایش قرار گیرد. بنابراین، قبل از عملیات آموزش، مجموعه‌ی بانک اطلاعاتی به طور تصادفی به سه دسته‌ی مجموعه‌ی آموزش، ارزیابی و آزمون افزای می‌شود [۲۲].

تعیین ساختار شبکه‌ی عصبی یکی از مهم‌ترین و مشکل‌ترین مراحل و نیازمند انتخاب تعداد بهینه‌ی لایه‌ها و همچنین تعداد بهینه‌ی نرون‌ها در هر لایه است. روش مشخصی جهت تعیین شبکه‌ی بهینه وجود ندارد. به طور کلی پیشنهاد شده است که با ثابت نگه‌داشتن تعداد لایه، تعداد نرون در هر لایه تعیین شود [۱۴]. شبکه‌ی پیشرو همواره دارای یک لایه‌ی ورودی و یک لایه‌ی خروجی است. تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی به ترتیب با توجه به پارامترهای ورودی و خروجی مدل محدود می‌شوند.

نرون‌های لایه‌های ورودی و خروجی باشد [31]. هیچت-نیلسن (Hecht-Nielsen) و کادیل (Caudill) نیز پیشنهاد کرده‌اند که حد بالایی تعداد نرون در لایه‌ی میانی در یک شبکه با یک لایه‌ی میانی $2I+1$ است که I تعداد ورودی شبکه است [32] و [33].

۴-۲- شبیه‌سازی با شبکه‌های عصبی مصنوعی

با توجه به مطالب مذکور، برای تعیین تعداد نرون‌ها در لایه‌ی میانی، شبکه‌های متعددی با تعداد نرون‌های متفاوت در لایه‌ی میانی مورد آموزش و ارزیابی قرار گرفته و بهترین شبکه انتخاب شده است. در این پژوهش بهترین نتایج با تعداد نرون ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ عدد در لایه‌ی میانی بدست آمده است. مقادیر تخمین زده شده برای نرخ نفوذ توسط شبکه در مقابل مقادیر واقعی نرخ نفوذ برای داده‌های آزمون در یک دستگاه مختصات رسم شده و بهترین خط منطبق بر داده‌ها برازش شده است. مقادیر واقعی در محور افقی و مقادیر تخمین زده شده در محور قائم دستگاه مختصات قرار دارند. در صورتی که خروجی شبکه با مقادیر واقعی نرخ نفوذ برابر باشد، تمامی نقاط بر روی خط $y=x$ قرار می‌گیرند. میزان انحراف نقاط نسبت به این خط، بیانگر میزان تفاوت میان خروجی شبکه و مقادیر واقعی است.

برای ارزیابی شبکه‌ها سه باند (جدول ۴) تعریف شده است. ملاک ارزیابی فراوانی، نقاط در هر یک از این سه باند است. فراوانی داده‌ها در هر باند نشان می‌دهد که شبکه با چه دقت و احتمالی قادر به پیش‌بینی نرخ نفوذ است. فراوانی داده‌ها در هر یک از باندهای ذکر شده برای مجموعه‌ی آزمون شبکه‌های ساخته شده با تعداد نرون‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ در لایه‌ی میانی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۴- تعریف باندهای خط

باند	۱	۲	۳
معادله‌ی خط	$y=x \pm 1$	$y=x \pm 1.5$	$y=x \pm 2$
خطا (mm/rev)	۱	۱,۵	۲

مطابق جدول ۵، تعداد نرون بهینه در لایه‌ی میانی ۸ عدد است. با توجه به جدول ۵ احتمال این‌که خروجی مجموعه‌ی آزمون شبکه‌ی $1 \times 8 \times 9$ با مقدار واقعی نرخ نفوذ کمتر از ۱، ۱,۵ و ۲ میلی‌متر بر دور تاج حفار تفاوت داشته

با وجود این‌که روش معینی برای تعیین تعداد لایه‌ی میانی وجود ندارد؛ اما با این حال تعدادی از محققان عقیده دارند که بسیاری از مسائل با استفاده از یک لایه‌ی میانی قابل حل است [27]، [28]، [29] و [30] و در بسیاری از مطالعات ژئوتکنیکی نیز از یک لایه‌ی میانی استفاده شده است. با این حال به منظور دستیابی به نتایج مناسب، در این مطالعه شبکه‌های زیادی با یک و دو لایه‌ی میانی ساخته شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن‌ها نشان می‌دهد که شبکه‌ی با ساختار یک لایه‌ی میانی در این تحقیق مناسب‌تر است؛ بنابراین در ادامه، شبیه‌سازی و نتایج مربوط به شبکه با یک لایه‌ی میانی ارایه شده است.

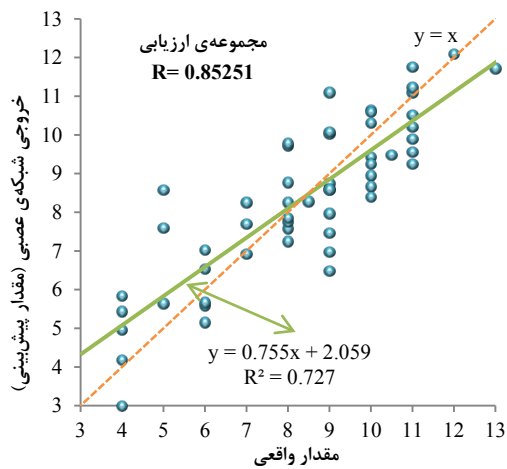
یکی دیگر از پارامترهای مهم در ساخت شبکه‌ای مناسب برای پیش‌بینی، تعداد نرون‌ها در لایه‌ی میانی است. اگر تعداد نرون‌های لایه‌ی میانی کم باشد، شبکه نمی‌تواند نگاشت غیرخطی بین ورودی و خروجی را با دقت لازم منعکس کند. تعداد زیاد نرون‌های لایه‌ی میانی نیز اثر منفی دارد؛ چرا که تعداد عناصر تنظیم شونده‌ی شبکه زیاد شده و شبکه برای یادگیری نیاز به تعداد زیادی مثال در مجموعه‌ی آموزشی دارد تا بتواند اوزان خود را تنظیم کند. همچنین احتمال بیش‌برازشی در شبکه نیز افزایش می‌یابد [۱۴] و [۲۴].

به منظور ایجاد شبکه‌ی بهینه، مقیاس داده‌های ورودی و خروجی شبکه به -1 و $+1$ تغییر داده شده است. برای پیش‌بینی نرخ نفوذ، شبکه‌ای با تغذیه‌ی پیشرو با یک لایه‌ی ورودی، یک لایه‌ی میانی و یک لایه‌ی خروجی ساخته شده است. تابع انتقال در لایه‌ی میانی تابع تانژانت سیگموئید (*Tansig*) و تابع انتقال در لایه‌ی خروجی تابع خطی (*Purelin*) در نظر گرفته شده است. با توجه به سرعت همگرایی الگوریتم لونیگ-مارکوآرت (*Levenberg-Marquardt*) در شبکه‌های پیشرو از این الگوریتم برای آموزش شبکه‌ی مورد نظر استفاده شده است. تعداد نرون در لایه‌ی میانی با روش سعی و خطا به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بهترین جواب ممکن بدست آید. با این وجود، تعدادی از محققان با توجه به تجربیات خود روش‌ها و محدودیت‌هایی را برای تعداد نرون‌ها در لایه‌ی میانی تعیین کرده‌اند. به عنوان نمونه برکه (*Berke*) پیشنهاد کرده است که تعداد نرون‌ها در لایه‌ی میانی عددی بین میانگین و مجموع

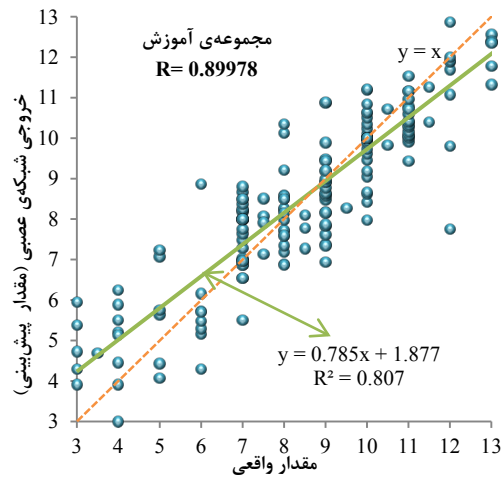
جدول ۵- ارزیابی کارایی شبکه با تغییر تعداد نرون‌های

لایه‌ی میانی				
تعداد نرون	۸	۹	۱۰	۱۱
باند ۱	۱۴	۱۶	۱۹	۱۳
باند ۲	۱۹	۲۱	۲۲	۱۸
باند ۳	۲۶	۲۴	۲۳	۲۰
خطای متوسط	۱,۰۷	۱,۲	۱,۱۷	۱,۳۶
ضریب همبستگی	۰,۸۳	۰,۷۷	۰,۷۴	۰,۷۱

باشد به ترتیب برابر با ۵۰، ۶۸ و ۹۳ درصد است. ضریب تطبیق بین مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی برای مجموعه‌ی آموزش، ارزیابی و آزمون این شبکه به ترتیب ۹۰، ۸۵ و ۸۳ درصد بدست آمده و به ترتیب در شکل ۳-الف، شکل ۳-ب و شکل ۴-الف آورده شده است. فراوانی داده‌ها در هر یک از سه باند برای مجموعه‌ی آزمون شبکه در شکل ۴-ب نشان داده شده‌است. خطای متوسط بین این مقادیر ۱,۰۷ میلی‌متر بر دور تاج حفر برآورد شده است.

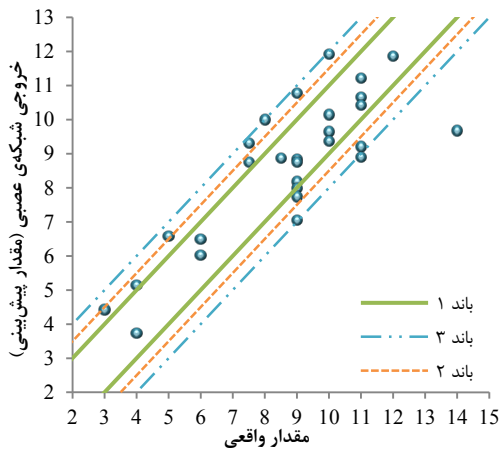


(ب)

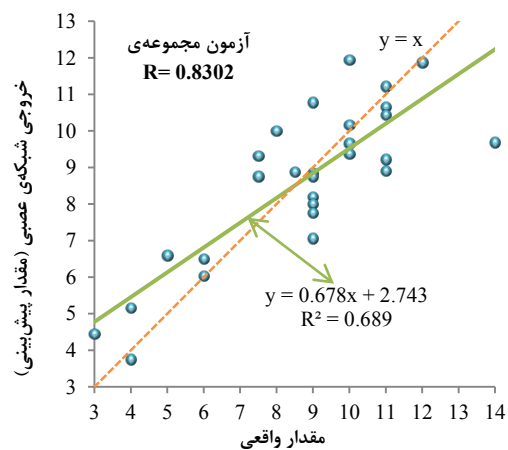


(الف)

شکل ۳- نمایش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده‌ی نرخ نفوذ: الف- برای مجموعه‌ی داده‌های آموزش؛ ب- برای مجموعه‌ی داده‌های ارزیابی



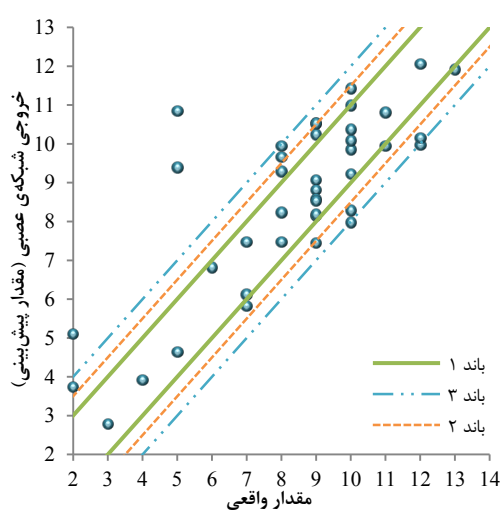
(ب)



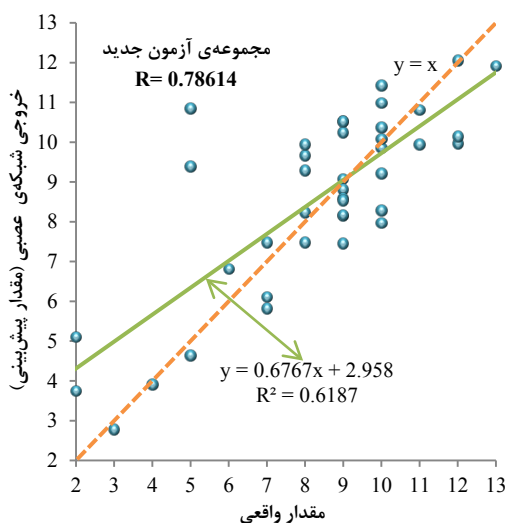
(الف)

شکل ۴- نمایش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده‌ی نرخ نفوذ برای مجموعه‌ی داده‌های آزمون الف- بهترین خط برازش شده؛ ب- فراوانی در هر باند

تطبیق بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی برای مجموعه‌ی آزمون جدید این شبکه ۷۹ درصد (شکل ۵-الف) و خطای متوسط بین این مقادیر ۱٫۱۷ میلی‌متر بر دور تاج حفار است. احتمال این‌که خروجی شبکه برای این مجموعه با مقدار واقعی نرخ نفوذ کمتر از ۱، ۱٫۵ و ۲ میلی‌متر بر دور تاج حفار تفاوت داشته باشد، به ترتیب ۵۰، ۷۰ و ۸۸ درصد است. فراوانی داده‌ها در هر یک از سه باند ذکر شده برای این مقادیر در شکل ۵-ب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

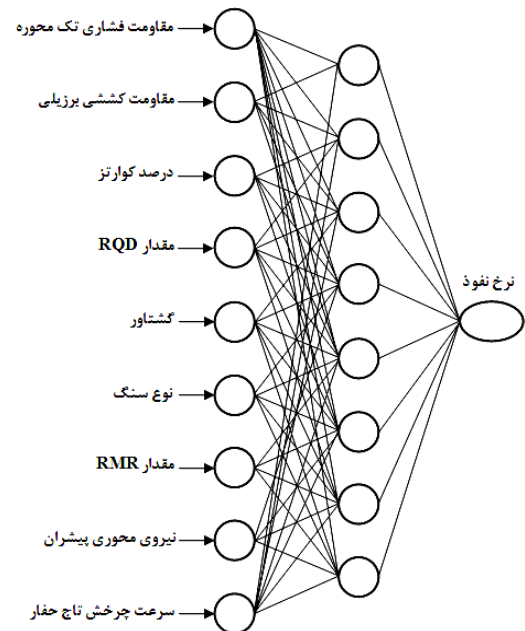
شکل ۵- نمایش مقادیر واقعی در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده نرخ نفوذ برای مجموعه‌ی داده‌های آزمون جدید الف- بهترین خط برازش شده ب- فراوانی در هر باند

اجرای ماشین، شامل نیروی محوری پیشران، گشتاور و سرعت چرخش تاج حفار (RPM) هستند. مقدار سرعت چرخش به سبب محدودیت‌های اجرایی پروژه در محدوده‌ی کوچکی تغییر می‌کند؛ به همین دلیل تحلیل حساسیت بر روی نیروی محوری پیشران و گشتاور با مقدار سرعت ثابت صورت گرفته است. تحلیل حساسیت در مقطع سنگی با مشخصات مندرج در جدول ۶ انجام شده است. برای تحلیل حساسیت بر روی پارامتر نیروی محوری پیشران، تمام پارامترها به جز نیروی پیشران ثابت فرض شده و مجموعه‌ای جدید به عنوان ورودی شبکه‌ی بهینه ایجاد و پس از شبیه‌سازی، مقادیر خروجی حاصل به عنوان نرخ نفوذ ثبت شده است.

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، می‌توان بیان نمود که شبکه‌ای با ساختار ۹ نرون در لایه‌ی ورودی، ۸ نرون در لایه‌ی میانی و ۱ نرون در لایه‌ی خروجی ($9 \times 8 \times 1$) شبکه‌ای مناسب و بهینه برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در این تونل است (شکل ۶).

پس از اطمینان از شبیه‌سازی، می‌توان با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی بهینه، بر روی پارامترهای ورودی تحلیل حساسیت انجام داد. شرایط زمین در هر مقطع سنگی تقریباً ثابت می‌ماند؛ اما به دلیل تغییر پارامترهای اجرایی ماشین در هر مقطع، نرخ نفوذ می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد؛ به همین دلیل تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای اجرایی ماشین انجام شده است. پارامترهای

نفوذ کاهش می‌یابد. در نیروی پیشران بیش از مقدار بهینه، احتمال گیرکردن دیسک‌ها و در نتیجه کاهش نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مشاهده می‌شود که روند تغییرات در منحنی‌ها یکسان است و با افزایش مقدار گشتاور، مقدار بهینه‌ی نیروی پیشران افزایش می‌یابد. بنابراین برای رسیدن به نرخ نفوذ بیشینه، مقدار گشتاور و نیروی پیشران باید بطور متناسبی انتخاب شود. همچنین در یک نیروی پیشران یکسان در محدوده‌ی کمتر از شرایط بهینه‌ی نرخ نفوذ، گشتاور کمتر سبب نرخ نفوذ بیش‌تری می‌شود. در ناحیه‌ی پس از محدوده‌ی بهینه، گشتاور بیش‌تر، نرخ نفوذ بالاتری را نتیجه می‌دهد.

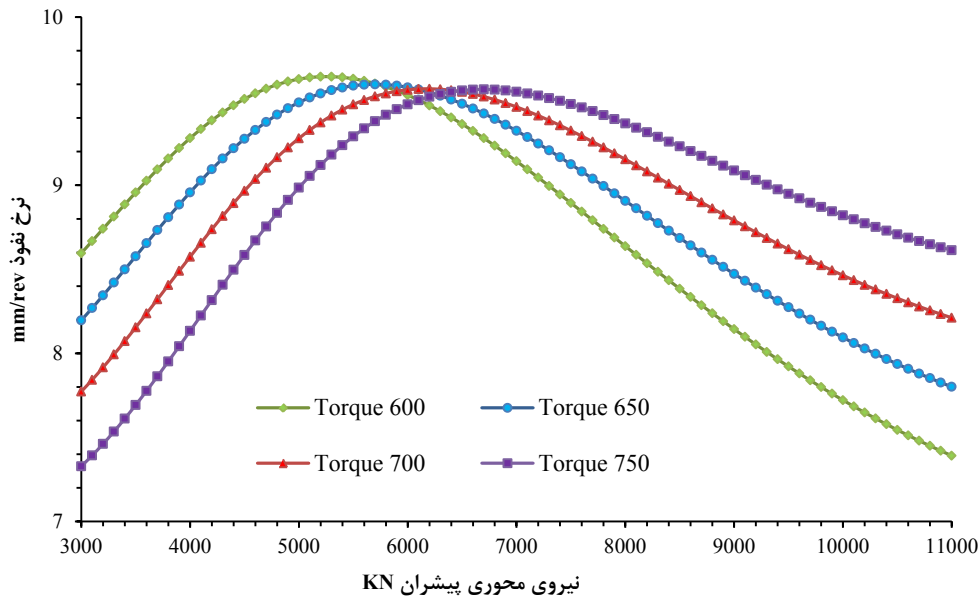


شکل ۶- ساختار شبکه بهینه ساخته شده

جدول ۶- مشخصات مقطع سنگی در تحلیل حساسیت

مقدار	مشخصات
متوسط تا ضخیم لایه	نوع سنگ
۱۲۵	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
۰٫۵	درصد کوارتز
۴٫۲۵	مقاومت کششی برزیلی (MPa)
۸۵	RQD (%)
۵۷	RMR

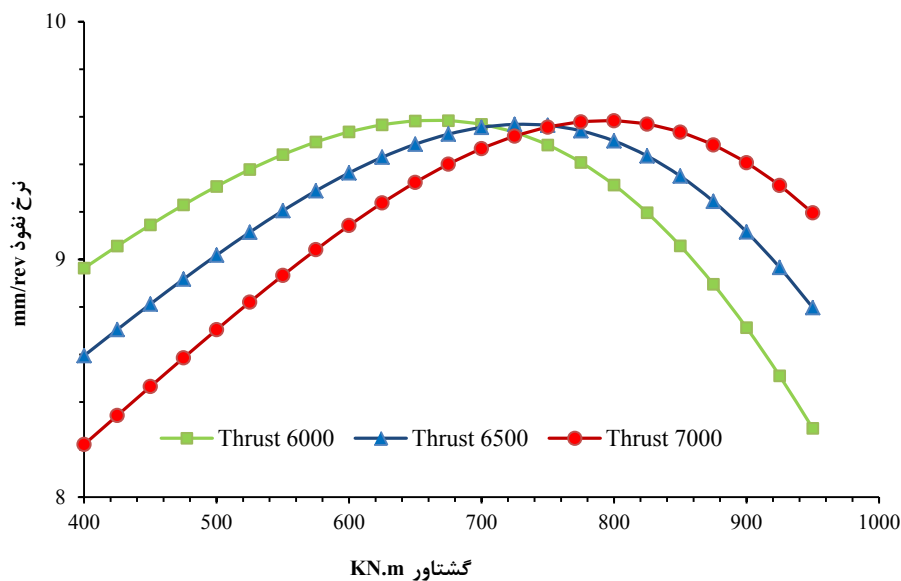
مقادیر نرخ نفوذ بدست آمده از شبکه در مقابل تغییرات نیروی پیشران در شکل ۷ رسم شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که افزایش نیروی محوری پیشران تا یک حد بهینه، موجب افزایش نرخ نفوذ می‌شود و پس از آن با افزایش نیروی پیشران نرخ



شکل ۷- نرخ نفوذ در مقابل نیروی پیشران حاصل از تحلیل حساسیت

گشتاور یکسان در محدوده‌ی کمتر از شرایط بهینه‌ی نرخ نفوذ، نیروی پیشران کمتر سبب نرخ نفوذ بیش‌تر می‌شود و در ناحیه‌ی پس از محدوده‌ی بهینه، نیروی پیشران بیش‌تر نرخ نفوذ بالاتری را نتیجه می‌دهد. با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که به منظور دستیابی به نرخ نفوذ قابل قبول در این مقطع سنگی، بهتر است از زوج نیروی پیشران و گشتاور بهینه استفاده شود. به عبارت دیگر به منظور دستیابی به نرخ نفوذ مطلوب‌تر باید این دو پارامتر به صورت هماهنگ با یکدیگر تغییر نمایند.

روند یاد شده به منظور تحلیل حساسیت نیروی پیشران، برای پارامتر گشتاور نیز در همان مقطع سنگی تکرار و مقادیر نرخ نفوذ پیش‌بینی شده با شبکه‌ی عصبی در مقابل تغییرات گشتاور در شکل ۸ رسم شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که مقدار گشتاور نیز همانند نیروی پیشران در یک حد بهینه موجب افزایش نرخ نفوذ می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که روند تغییرات در منحنی‌ها یکسان است و با افزایش مقدار نیروی پیشران، مقدار بهینه‌ی گشتاور افزایش می‌یابد. همچنین در یک



شکل ۸ - تحلیل حساسیت نرخ نفوذ در مقابل نیروی پیشران

نظر گرفته شده است؛ در صورتی‌که در هر سیکل حفاری به دلیل پارامترهای متفاوت ماشین، نرخ نفوذ متفاوتی بدست می‌آید.

با توجه توضیحات فوق، در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای ماشین بر نرخ نفوذ با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداخته شده است. به منظور تحلیل با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه‌های زیادی با ساختارهای متفاوت با در نظر گرفتن یک و دو لایه‌ی میانی و همچنین تعداد نرون‌های متفاوت در لایه‌ها ساخته شده است. در نهایت شبکه‌ای با یک لایه‌ی میانی، ۹ پارامتر ورودی متشکل از پارامترهای مربوط به سنگ بکر،

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت نرخ نفوذ در عملیات حفاری، محققان مختلفی با روش‌های متعدد تجربی و تئوری به پیش‌بینی این پارامتر پرداخته‌اند. با توجه به پیچیدگی ارتباط بین نرخ نفوذ و پارامترهای موثر آن و همچنین توانایی روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در چنین مسائلی، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی به منظور پیش‌بینی این پارامتر با استفاده از این روش انجام شده است. مطالعاتی که پیش از این با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت گرفته است، نشان‌دهنده‌ی قابلیت این روش در پیش‌بینی نرخ نفوذ است. در این مطالعات، در هر مقطع سنگی تنها یک نرخ نفوذ در

کاهش می‌یابد. در مقادیر نیروی پیشران بیش از حد بهینه، برای دستیابی به نرخ نفوذ بیشتر، گشتاور نیز باید افزایش یابد. تحلیل حساسیت بر روی گشتاور نیز روندی مشابه با نیروی پیشران را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار نیروی پیشران، مقدار بهینه‌ی گشتاور افزایش می‌یابد. بنابراین تنها یک زوج نیروی پیشران و گشتاور خاص منجر به نرخ نفوذ حداکثر نمی‌شود؛ بلکه این دو عامل در یک محدوده‌ی بهینه، نرخ نفوذ را افزایش می‌دهند. به منظور دستیابی به نرخ نفوذ حداکثر می‌توان از زوج نیروی محوری پیشران و گشتاور بهینه استفاده نمود.

در این پژوهش برآورد مقدار بهینه‌ی نیروی محوری پیشران و گشتاور TBM با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شده است؛ ولی امکان انجام مطالعه‌ی مشابه با استفاده از روش‌های دیگر بهینه‌سازی مانند روش‌های ابتکاری (Heuristic) وجود دارد. انجام این پژوهش، برنامه‌ی آتی مطالعات نویسندگان این مقاله است.

توده‌سنگ و پارامترهای اجرایی ماشین و ۸ نرون در لایه‌ی میانی و پارامتر نرخ نفوذ در لایه‌ی خروجی به عنوان شبکه‌ی بهینه برای پیش‌بینی نرخ نفوذ انتخاب شده است. به منظور اطمینان از انتخاب شبکه‌ی بهینه، بار دیگر این شبکه با استفاده از مجموعه‌ی آزمون جدیدی که در بانک اطلاعاتی مربوط به ساخت شبکه وجود نداشته، مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب تطبیق ۷۹ درصد بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی در این مجموعه نشان‌دهنده‌ی صحت انتخاب شبکه‌ی بهینه است.

پس از ایجاد شبکه‌ی بهینه برای پیش‌بینی، می‌توان به تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی پرداخت. در این مطالعه به کمک شبکه‌ی بهینه به تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای نیروی محوری پیشران و گشتاور پرداخته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که افزایش نیروی محوری پیشران تا یک حد بهینه، سبب افزایش نرخ نفوذ می‌شود. پس از آن با افزایش نیروی پیشران، مقدار نرخ نفوذ

۶- منابع

- [1] Roxborough, F. F., & Phillips, H. R. (1975). Rock Excavation by Disc Cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(12), 361-366. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90547-1](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(75)90547-1).
- [2] Sanio, H. (1985). Prediction of the Performance of Disc Cutters in Anisotropic Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 22(3), 153-161. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93229-2](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(85)93229-2).
- [3] Nilson, B., & Ozdemir, L. (1993). Hard Rock Tunnel Boring Prediction and Field Performance. In L. D. Bowerman & J. E. Monsees (Ed.), *Proceeding of Rapid Excavation and Tunneling Conference* (pp. 833-852). Boston: Society for Mining Metallurgy. ISBN: 9780873351270.
- [4] Tarkoy, P. J. (1974). Prediction TBM Penetration Rate in Selected Rock Types. *Proceeding of the Ninth Canadian Rock Mechanics symposium* (pp. 257-269). Montreal: Mines Branch, Department of Energy, Mines and Resources.
- [5] Graham, P. C. (1976). Rock Exploration for Machine Manufacturers. In Z. T. Bieniawski (Ed.), *Exploration for Rock Engineering: Proceedings of The Symposium on Exploration for Rock Engineering* (pp.173-180). Johannesburg: A A Balkema. ISBN: 9780869610893.
- [6] Farmer, I. W., & Glossop, N. H. (1980). Mechanics of Disc Cutter Penetration. *Tunnels and Tunneling International*, 12, 622-625.
- [7] Nelson, P., O'Rourke, T. D., & Kulhawy, F. H. (1983). Factors Affecting TBM Penetration Rates in Sedimentary Rocks. In C. Christopher (Ed.), *24th U.S. Symposium on Rock Mechanics* (pp. 227-237). Texas: American Rock Mechanics Association.

- [8] Cassinelli, F., Cina, S., Innaurato, N., Mancini, R., & Sampaolo, A. (1982). Power Consumption and Metal Wear in Tunnel-Boring Machines: Analysis of Tunnel-Boring Operation in Hard Rock. In M. J. Jones (Ed.), *Tunnelling 82* (pp. 73-81). London: Institution of Mining and Metallurgy. ISBN:090048862X.
- [9] Innaurato, N., Mancini, A., Rondena, E., & Zaninetti, A. (1991). Forecasting and Effective TBM Performances in a Rapid Excavation of a Tunnel In Italy. *7th ISRM Congress* (pp. 1009-1014). Aachen: International Society for Rock Mechanics.
- [10] Park, C. W., Park, C., Synn, J. H., Sunwoo, C., & Chung, S. K. (2001). TBM Penetration Rate with Rock Mass Properties in Hard Rock. *AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress* (pp. 413-419). Milano. ISBN: 9788855525947.
- [11] Hassanpour, J., Rostami, J., & Zhao, J. (2011). A New Hard Rock TBM Performance Prediction Model for Project Planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5), 595-603. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.04.004>.
- [12] Bruland, A. (2000). *Hard Rock Tunnel Boring*. Trondheim: Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology, Engineering Science and Technology. ISBN:8247102811.
- [13] Barton, N. R. (2000). *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. Rotterdam: A A Balkema. ISBN:9058093417.
- [۱۴] منهاج، م. ب. (۱۳۹۱). مبانی شبکه‌های عصبی. تهران، ایران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. شابک: ۹۷۸۹۶۴۴۶۳۰۸۷۳
- [15] Grima, M. A., Bruines, P. A., & Verhoef, P. W. (2000). Modelling Tunnel Boring Machine Performance by Neuro-Fuzzy Methods. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15 (3), 259-269. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00055-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00055-9).
- [۱۶] یآوری، ش. م. و مهدوری، س. (۱۳۸۵). پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین‌های تونل‌بری با استفاده از شبکه‌ی عصبی. نشریه‌ی دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران، ۴۰(۱)، ۱۱۵-۱۲۱.
- [17] Yagiza, S., Gokceoglu, C., Sezer, E., & Iplikci, S. (2009). Application of Two Non-Linear Prediction Tools to The Estimation of Tunnel Boring Machine Performance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22 (4-5), 808-814. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2009.03.007>.
- [18] Gholamnejad, J., & Tayaran, N. (2010). Application of Artificial Neural Networks to The Prediction of Tunnel Boring Machine Penetration Rate. *Mining Science and Technology(China)*, 20 (5), 727-733. [http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60271-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60271-4).
- [19] Torabi, S. R., Shirazi, H., Hajali, H., & Monjezi, M. (2011). Study of The Influence of Geotechnical Parameters on The TBM Performance in Tehran-Shomal Highway Project Using ANN and SPSS. *Arabian Journal of Geosciences*. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-011-0415-3>.
- [20] Khademi Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). Performance Prediction of Hard Rock TBM Using Rock Mass Rating (RMR) System. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25 (4), 333-345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.008>.
- [۲۱] مهندسین مشاور ساحل. (۱۳۸۶). مطالعات زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل. گزارش شماره‌ی ۲۰۲۶.

بررسی تاثیر پارامترهای اجرایی ماشین TBM بر نرخ نفوذ آن با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی - تونل بلند زاگرس: ص ۲۹-۴۲

- [22] Demuth, H., Beale, M., & Hagan, M. (2006). *Neural Network Toolbox for Use with Matlab: User's Guide, 5th*. Natick, Massachusetts, United States of America: The Mathworks, Inc.
- [۲۳] مهدوری، س. (۱۳۸۲). پیش‌بینی ضریب بهره‌وری TBM‌های باز. تهران، ایران: پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- [۲۴] کیا، م. (۱۳۸۹). شبکه‌های عصبی در MATLAB. تهران، ایران: خدمات نشر کیان رایانه سبز. شابک: ۹۷۸۶۰۰۵۲۳۷۰۰۹.
- [۲۵] افتخاری، س. م. (۱۳۸۹). تحلیل عددی تاثیر پارامترهای هندسی شکستگی‌های منفصل بر نرخ نفوذ دستگاه TBM در توده سنگ شکسته-مطالعه‌ی موردی تونل بلند زاگرس. اصفهان، ایران: پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [26] Eftekhari, M., Baghbanan, A., & Bayati, M. (2010). Predicting Penetration Rate of A Tunnel Boring Machine Using Artificial Neural Network. In K. G. Sharma (Ed.), *ISRM International Symposium-6th Asian Rock Mechanics Symposium-Advances in Rock Engineering*. New Delhi, India: International Society for Rock Mechanics.
- [27] Hornik, K. (1989). Multilayer Feed Forward Networks Are Universal Approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359-366. [http://dx.doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](http://dx.doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8).
- [28] Hecht-Nielsen, R. (1989). Theory of The Back-Propagation Neural Network. *International Joint Conference on Neural Networks* (pp. 593-605). Washington, DC, USA: IEEE TAB Neural Network Conference. <http://dx.doi.org/10.1109/IJCNN.1989.118638>.
- [29] Cybenko, G. (1989). Approximation by Superpositions of A Sigmoidal Function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2 (4), 303-314. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02551274>.
- [30] Basheer, I. A. (2000). Selection of Methodology for Neural Network Modeling of Constitutive Hysteresis Behavior of Soils. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(6), 445-463. <http://dx.doi.org/10.1111/0885-9507.00206>.
- [31] Berke, L., & Hajela, P. (1991). Application of Neural Networks in Structural Optimization. *NATO-DFG Advanced Study Institute on optimization of large structural systems* (pp. 731-745). Berchtesgaden: Springer. ISBN:0792321294.
- [32] Hecht-Nielsen, R. (1987). Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem. In M. Caudill (Ed.), *1st IEEE International Conference on Neural Networks* (pp. 11-14). San Diego. California.
- [33] Caudill, M. (1988). Neural Networks Primer, Part III. *AI Expert*, 3 (6), 53-59. ISSN:0888-3785.

طراحی پوشش سگمنتی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به تاثیر مفاصل قطعات پوشش

حسن بخشنده امنیه^{۱*}؛ سعید طایبی سمیرمی^۲؛ مرتضی رحیمی دیزجی^۳

۱- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ رشته مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشکده مهندسی؛ دانشگاه کاشان

۳- دانشجوی دکترای تخصصی؛ رشته مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ کارشناس شرکت مهندسی سپاسد

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی	چکیده
تونل بلند انتقال آب پوشش سگمنتی مفاصل پوشش نیروهای داخلی	مفاصل بین قطعات پوشش می‌توانند مقدار مشخصی از گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی را تحمل کنند. گزاره‌ی نیرو-جابجایی نیز در محدوده مشخصی از بار اعمالی می‌تواند تقریباً خطی در نظر گرفته شود. در تحلیل سازه‌ای پوشش سگمنتی، مفاصل می‌توانند به صورت لولاهای الاستیک مدل شوند و مشخصات سختی آن‌ها توسط صلبیت مفاصل بیان شود. این امر باعث می‌شود که گشتاور خمشی وارده بر پوشش کاهش یابد و با کاهش نیروهای داخلی وارده بر پوشش می‌توان از پوششی با ضخامت کمتر استفاده نمود. در این مقاله نیروهای وارده بر پوشش‌های سگمنتی باتوجه به اثر مفاصل در حالت‌های نسبت تنش افقی به قائم کوچک‌تر و بزرگ‌تر از یک در نظر گرفته شده است. روش تحلیلی برای ساختار مفاصل با تحلیل بر روی نسبت تنش افقی به قائم زمین، ضریب مقاوم توده‌سنگ، تاثیر سختی مفاصل، نحوه توزیع مفاصل و تعداد مفاصل انجام و گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش تونل به علت نیروهای داخلی وارد بر پوشش محاسبه شده است. با توجه به نمودار اثر متقابل نیروی محوری و گشتاور خمشی پوشش، پوشش سگمنتی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به روش‌های تحلیلی و عددی برآورد شده است.

۱- مقدمه

و انیشتین (*Peck and Einstein*) به ترتیب در سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۹ ارایه و تکمیل شده است، طراحی می‌شود. نسبت انعطاف‌پذیری ارتباط توده‌سنگ اطراف تونل و ساختار پوشش را بیان می‌کند. افزایش نسبت انعطاف‌پذیری نشان می‌دهد که گشتاور خمشی وارده بر پوشش کاهش یافته است. این نسبت به صورت گزاره‌ی (۱) است [1] و [2].

یکی از مهم‌ترین عامل‌های طراحی پوشش تونل با قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت)، تاثیر مفاصل سگمنت روی گشتاور خمشی است. این امر ناشی از تفاوت سختی مفاصل با سختی سگمنت اصلی است. تحقیقات نشان می‌دهد که مفاصل سگمنت علاوه بر سختی کمتر، بیش‌ترین تغییر شکل را نسبت به بخش اصلی متحمل می‌شوند؛ به همین دلیل مفاصل سگمنت بحرانی‌ترین قسمت پوشش را تشکیل می‌دهند. معمولاً پوشش تونل با استفاده از پارامتری که نسبت انعطاف‌پذیری (خمش) نامیده می‌شود و توسط پیک

$$F = \frac{\frac{E_s}{(1+\nu_s)}}{6EI} \frac{1}{(1-\nu^2)R^3} \quad (1)$$

* اصفهان؛ کاشان؛ کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی؛ دانشگاه کاشان؛ گروه مهندسی معدن؛ کدپستی: ۵۱۱۶۷-۸۷۳۱۷؛ شماره تلفن: ۰۳۶۱-۵۹۱۲۱۳۱-۰۳۶۱ داخلی: ۲۱۳۱؛ دورنگار: ۰۳۶۱-۵۵۱۳۱۱۰؛ رایانامه: bakhshandeh@kashanu.ac.ir

الف- سختی پیچشی پوشش حلقوی یکپارچه در سراسر پوشش، یکنواخت فرض شده و کاهش سختی به سبب حضور مفاصل نادیده گرفته می‌شود.

ب- کاهش سختی به سبب وجود مفاصل با اعمال ضریب کاهش η به صورت سختی پوشش یکپارچه محاسبه می‌شود.

پ- پوشش حلقوی یکپارچه به صورت پوشش مفصل شده ساده‌سازی می‌شود. صلبیت اتصال‌ها نادیده انگاشته و مفاصل به صورت لولاهای کامل در نظر گرفته می‌شوند.

ت- پوشش حلقوی یکپارچه به صورت پوشش مفصل شده ساده‌سازی می‌شود؛ اما صلبیت اتصالات در نظر گرفته و مفاصل به صورت لولاهای الاستیک با صلبیت ثابت مدل می‌شوند.

در این مقاله، ابتدا نیروهای وارده بر پوشش‌های سگمنتی با در نظر گرفتن اثر مفاصل محاسبه شده است. سپس روش تحلیلی پیشنهادی برای ساختار مفاصل با تحلیل بر روی نسبت تنش افقی به قائم زمین، ضریب واکنش توده‌سنگ، تأثیر سختی مفاصل، نحوه توزیع مفاصل و تعداد مفاصل بررسی شده است. در این بررسی گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش تونل به علت نیروهای داخلی وارد بر پوشش محاسبه شده و در ادامه نیز با توجه به نمودار اثر متقابل نیروی محوری و گشتاور خمشی پوشش، ضخامت پوشش سگمنتی بهینه برای تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به روش‌های تحلیلی و عددی تعیین شده است.

۲- نیروهای وارده بر پوشش‌های سگمنتی با

در نظر گرفتن اثر سختی مفاصل

مفاصل بین قطعات پوشش می‌توانند مقدار مشخصی از گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی را تحمل کنند و گزاره‌ی نیرو-جابجایی در محدوده‌ی مشخصی از بار اعمالی می‌تواند تقریباً خطی در نظر گرفته شود. در تحلیل سازه‌ای این مفاصل می‌تواند به صورت لولاهای الاستیک مدل شوند و مشخصات سختی آن‌ها با صلبیت محوری (K_n) ، برشی (K_s) و پیچشی (K_θ) بیان شود [۱۰]. توزیع فشار وارده بر پوشش سگمنتی را می‌توان مطابق شکل ۱ در

وود (*Wood*) در سال ۱۹۷۵ پیشنهاد کرد که لختی دورانی موثر پوشش، باید برای ساختار مفاصل به صورت گزاره‌ی (۲) اصلاح شود [3].

$$I = \left[\frac{4}{N'} \right]^2 I_o + I_j \quad (2)$$

در سال ۲۰۰۱، لی و جی (*Lee & Ge*) ارتباط تحلیلی ضریب کاهش لختی دورانی و بیش‌ترین جابجایی افقی برای پوشش حلقوی یکپارچه را به صورت گزاره‌ی (۳) پیشنهاد دادند [4]:

$$\eta = \frac{1}{1 + \Delta_h} \quad \Delta_h = \frac{3EI}{RK_\theta} \sum_{i=1}^{N'} \cos \varphi_i \cos 2\varphi_i \quad (3)$$

لی و همکاران (*Lee, et al.*) در سال ۲۰۰۱ پوشش حلقوی سگمنتی را به صورت پوشش حلقوی مفصل شده ساده‌سازی و با در نظر گرفتن صلبیت اتصالات، مفاصل را به صورت لولاهای الاستیک با صلبیت ثابت مدل کردند [5]. کویاما (*Koyama*) در سال ۲۰۰۳، نتایج طراحی مهندسان عمران ژاپن را این‌گونه توصیف کرد که در طراحی پوشش با توجه به مفاصل پوشش، بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش، ۶۰ تا ۸۰ درصد بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش سگمنتی بدون مفاصل است؛ بنابراین با اعمال ضریب کاهش، کاهش سختی به دلیل حضور مفاصل به صورت سختی پوشش یکپارچه در نظر گرفته می‌شود [6]. در سال ۲۰۰۶، لو و همکارانش (*Lu, et al.*) رفتار پوشش سگمنتی یکپارچه را مورد ارزیابی قرار دادند که در این آزمایش مفاصل پوشش در نظر گرفته نشدند. به همین منظور زی‌چون و همکارانش (*Xiaochun, et al.*) در همان سال مطالعات عددی خود را در زمینه‌ی تأثیر بار وارده بر مفاصل پوشش سگمنتی با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار *PLAXIS* انجام دادند [7] و [8]. تیچاوراسینسکن و چب (*Teachavorasinskun & Chub*) در سال ۲۰۱۰ با آزمایش بر روی ۴ مدل سگمنت (بدون مفصل و با مفاصل به ضخامت‌های متفاوت) به این نتیجه رسیدند که ضریب کاهش گشتاور خمشی به شدت به مقاومت مفاصل سگمنت بستگی دارد. ضریب کاهش گشتاور خمشی با کاهش مقاومت مفاصل سگمنت، کاهش می‌یابد [9].

در طراحی سازه‌ای پوشش سگمنتی، روش‌های تعیین نیروهای وارده بر پوشش به صورت زیر است [5] و [۱۰]:

فشارهای زمین دربرگیرنده برای موارد شش‌گانه بارگذاری
 $(j=1,2,\dots,6)$ از جمع آثار بارگذاری تشریح شده در شکل ۱
 و گزاره‌ی (۸) بدست می‌آید [5]:

$$M_p = \sum_{j=1}^6 M_{pj} \quad N_p = \sum_{j=1}^6 N_{pj} \quad (8)$$

نیروهای داخلی کلی پوشش از گزاره‌ی (۹) بدست می‌آید
 [5]:

$$M = \bar{M}_1 x_1 + \bar{M}_2 x_2 + M_p \quad (9)$$

$$N = \bar{N}_1 x_1 + \bar{N}_2 x_2 + N_p$$

جابجایی قائم در سقف تونل و جابجایی افقی که در دیواره
 تونل ایجاد می‌شود به صورت گزاره‌های (۱۰) و (۱۱) تعیین
 می‌شود [5]:

$$\Delta_v = \int \frac{\bar{M}_{T1} M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \bar{M}_{T1}^{(i)} \bar{M}^{(i)} \quad (10)$$

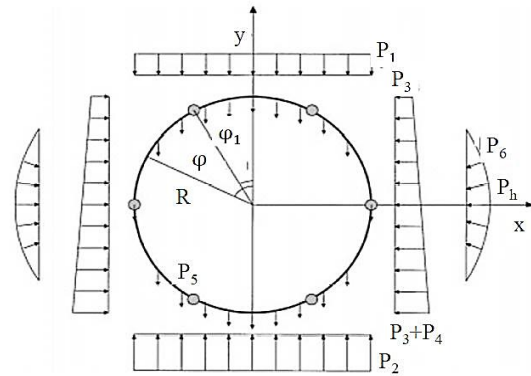
$$\Delta_h = \int \frac{\bar{M}_{T2} M}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{\theta}^{(i)}} \bar{M}_{T2}^{(i)} \bar{M}^{(i)} \quad (11)$$

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است فشار
 انفعالی وارده بر پوشش به جوانب آن اعمال می‌شود؛ اما این
 موضوع فقط تحت شرایطی که مقدار نسبت تنش افقی به
 قائم زمین کوچکتر از یک باشد، صادق است. برای مقادیر
 نسبت تنش افقی به قائم بزرگتر از یک، پوشش تونل تمایل
 به تغییر شکل به صورت بیضی ایستاده را دارد؛ بنابراین فشار
 انفعالی وارده بر پوشش به سقف تونل انتقال خواهد یافت. به
 بیان دیگر، فشار انفعالی وارده بر پوشش تونل در مواردی که
 $K > 1$ است در محدوده ۴۵- تا ۴۵ درجه بر پوشش اعمال
 می‌شود [11] و [12]. شکل ۲ روند محاسبه و تعیین مقدار
 گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش را
 نشان می‌دهد. با توجه به این روند مقدار فشار انفعالی
 توده‌سنگ (p_h) با تکرار مقدار جابجایی افقی، تعیین
 می‌شود [5]. در ادامه تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای
 مختلف انجام شده، که نتایج آن در زیر تشریح شده است.

۲-۱- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری در فشار هیدرواستاتیک $K=1$

در این حالت تمام بار وارده بر پوشش به نیروی محوری
 تبدیل شده، مقدار گشتاور خمشی صفر است و نیروی
 محوری با افزایش بار وارده افزایش می‌یابد. مقدار نیروی

نظر گرفت [5]. فرض شده است P_6 در محدوده‌ی ۴۵ تا
 ۱۳۵ درجه نسبت به سقف تونل است و از گزاره‌ی (۴)
 بدست می‌آید [5].



شکل ۱- توزیع فشار وارده بر پوشش سگمنتی [5]

$$P_6 = P_h (1 - 2 \cos^2 \varphi) \quad , \quad P_h = K_s \Delta_h \quad (4)$$

با استفاده از گزاره‌های روش نیرو و با در نظر گرفتن
 چرخش و جابجایی افقی برابر با صفر در سقف و کف تونل،
 گزاره‌های (۵) و (۶) بدست می‌آید [5]:

$$x_1 = \frac{\delta_{12} \Delta_{2p} - \delta_{22} \Delta_{1p}}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \quad (5)$$

$$x_2 = \frac{\delta_{21} \Delta_{1p} - \delta_{11} \Delta_{2p}}{\delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12} \delta_{21}} \quad (6)$$

x_1 و x_2 به ترتیب گشتاور خمشی و نیروی محوری (در
 واحد طول) اعمالی بر سقف، یعنی نیروهای زاید، و δ_{ii}
 جابجایی‌های ایجاد شده در محل نیروی زاید x_i و هم جهت
 با x_i بعلت اعمال نیروی واحد $x_i = 1$ ، δ_{ij} جابجایی ایجاد
 شده در محل نیروی زاید x_i و هم جهت با x_i به علت
 نیروی واحد $x_j = 1$ جابجایی ایجاد شده در محل
 نیروی زاید x_i و هم راستا با x_i به سبب اعمال فشار زمین
 دربرگیرنده است.

گشتاور خمشی و نیروی محوری داخلی در واحد طول
 به علت اعمال نیروی واحد $x_1=1$ و $x_2=1$ می‌تواند به صورت
 گزاره‌ی (۷) بیان شود.

$$\bar{M}_1 = 1 \quad \bar{M}_2 = R(1 - \cos \varphi) \quad (7)$$

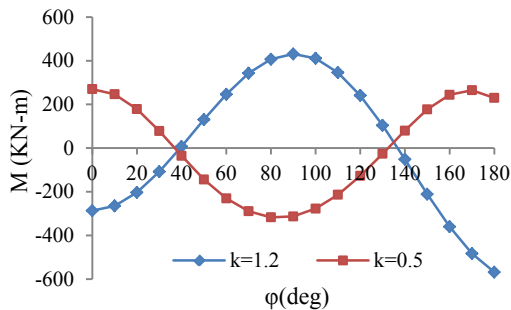
$$\bar{N}_1 = 0 \quad \bar{N}_2 = \cos \varphi$$

با استفاده از گزاره‌های تعادل نیرو، نیروهای حاصل از

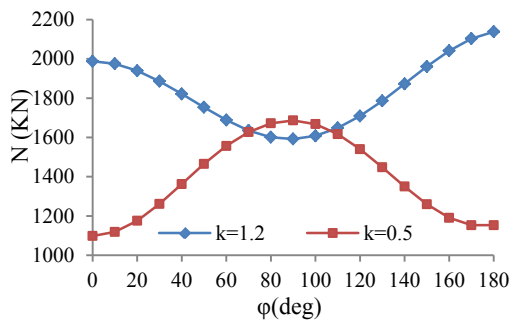
۲-۲- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری

نسبت به مقدار K

با تغییر مقدار K، محل بیش‌ترین فشار وارده بر پوشش تغییر خواهد کرد؛ بنابراین در این حالت نمودارهای مربوط به گشتاور خمشی و نیروی محوری تقریباً قرینه خواهند بود. این موضوع برای پوشش دارای ۶ سگمندی در شکل ۵ و شکل ۶ برای دو حالت $K = 0.5$ و $K = 1.2$ نشان داده شده است. این نمودارها به عنوان نمونه بوده و در رسم آن‌ها شده است. $P_1 = 500 \text{ KN} / \text{m}^2$ و $K_s = 10000 \text{ KN} / \text{m}^3$ فرض



شکل ۵ - تغییرات گشتاور خمشی با مقدار K



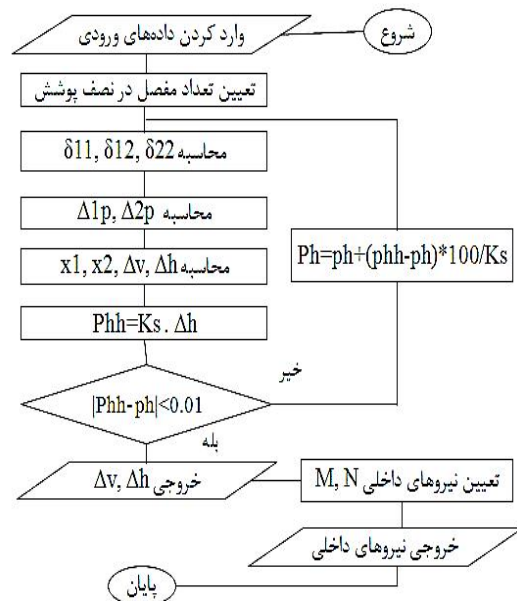
شکل ۶ - تغییرات نیروی محوری با مقدار K

۲-۳- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری

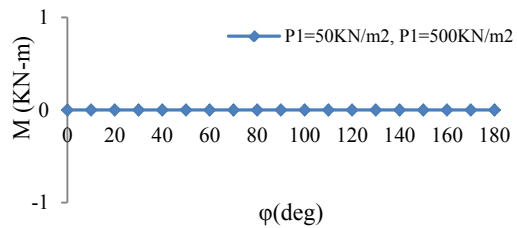
نسبت به مقدار سختی پیچشی مفاصل

کاهش سختی پیچشی مفاصل موجب افزایش انعطاف‌پذیری پوشش و کاهش گشتاور خمشی وارده بر پوشش می‌شود. از طرفی کاهش سختی پیچشی مفاصل موجب افزایش تغییر شکل پوشش و افزایش فشار انفعالی وارد بر آن خواهد شد؛ بنابراین نیروی محوری پوشش افزایش خواهد یافت. به

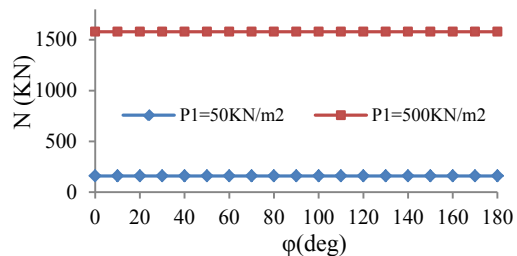
محوری در این حالت تقریباً برابر با نیروی محوری وارده بر استوانه‌های جدار نازک تحت بار یکنواخت است. با توجه به روندنمای شکل ۲ و بارهای P_1 تا P_6 ، مقادیر گشتاور خمشی و نیروی محوری محاسبه می‌شود. به علت وابستگی بارهای وارده بر پوشش به بار P_1 ، مقدار بار P_1 برای پوششی دارای ۶ سگمندی در شکل ۳ و شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۲- روندنمای محاسبه نیروهای داخلی پوشش [5]



شکل ۳- تغییرات ممان خمشی در حالت K=1

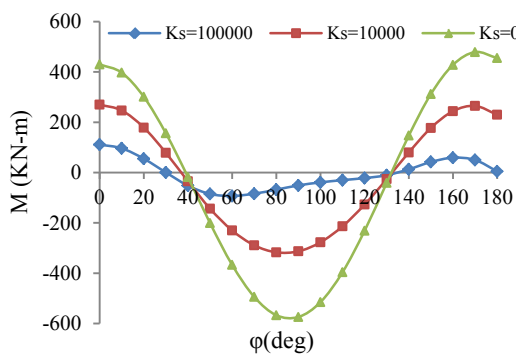


شکل ۴- تغییرات نیروی محوری در حالت K=1

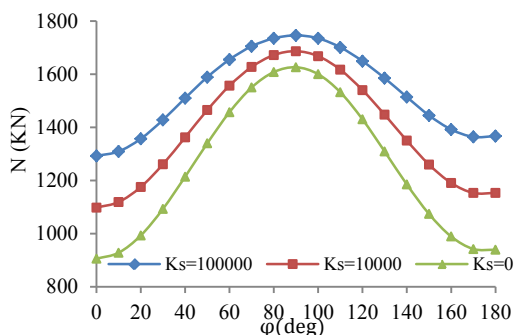
۲-۴- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری

نسبت به مقدار K_s

افزایش مقدار ضریب مقاوم توده‌سنگ (K_s) در واقع بیانگر بهبود خصوصیات مقاومتی توده‌سنگ است که با افزایش آن محصورشدگی پوشش تونل در داخل توده‌سنگ افزایش یافته و از قابلیت تغییر شکل آن در برابر فشارهای وارده کاسته خواهد شد. از طرفی گشتاور وارد بر اجسام غیر صلب علاوه بر نیروی وارده، به تغییر شکل‌های جسم نیز بستگی دارد. با افزایش مقدار K_s گشتاور وارده بر پوشش کاهش خواهد یافت ولی فشار انفعالی وارده بر پوشش بیش‌تر خواهد شد؛ بنابراین نیروی محوری وارده بر پوشش افزایش خواهد یافت. این مسئله در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ برای پوششی با ۶ سگمنت تشریح شده است. همان‌طور در شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار K_s مقدار گشتاور خمشی وارده بر پوشش کاهش و نیروی محوری وارده اندکی افزایش یافته است. در این تحلیل، سختی مفاصل برابر سختی پوشش در نظر گرفته شده است.

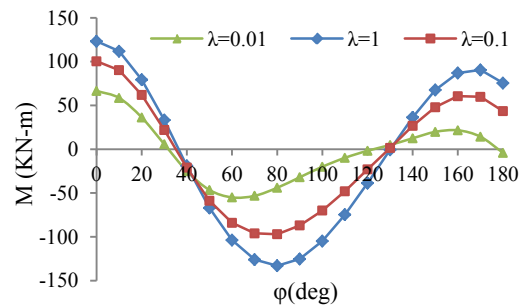


شکل ۱۰- تغییرات گشتاور خمشی با مقدار K_s

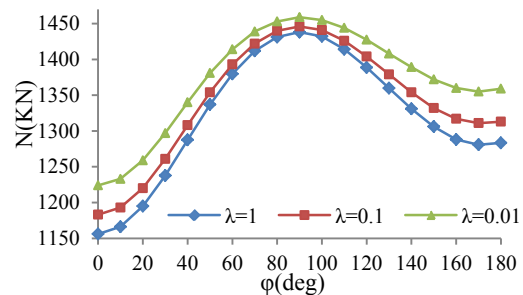


شکل ۱۱- تغییرات نیروی محوری با مقدار K_s

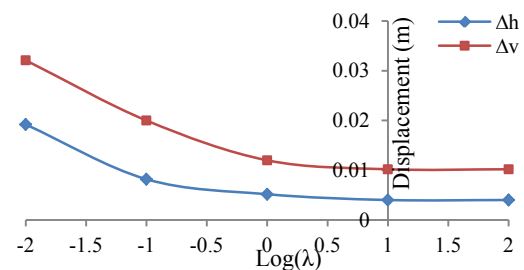
منظور درک بهتر اثر مفاصل، مقدار گشتاور خمشی و نیروی محوری برای سه حالت $\lambda=1$ ، $\lambda=0.1$ و $\lambda=0.01$ و پوششی با ۶ سگمنت در هر حلقه در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت سختی مفاصل به صورت نسبت سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش تعریف می‌شود ($\lambda = K_\theta / EI$). شکل ۹ نشان می‌دهد که جابجایی‌های قائم (Δ_v) و افقی (Δ_h) پوشش تونل، با کاهش مقدار λ افزایش می‌یابد. افزایش جابجایی‌های قائم و افقی پوشش تونل وقتی سختی مفاصل کمتر از ۰٫۱ سختی پوشش است، بیش‌تر بوده و قابل توجه است. در این شکل محور افقی بر حسب لگاریتم، نشان‌دهنده‌ی نسبت سختی مفصل است.



شکل ۷- تغییرات گشتاور خمشی با مقدار سختی مفاصل



شکل ۸- تغییرات نیروی محوری با مقدار سختی مفاصل

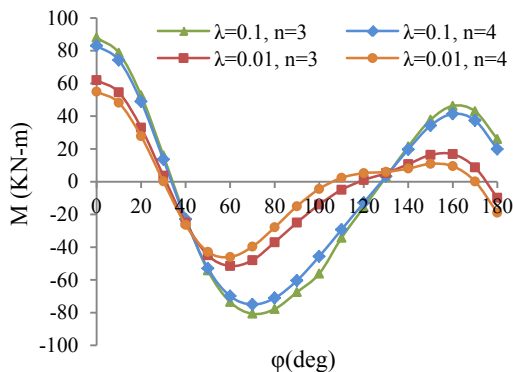


شکل ۹- جابجایی پوشش تونل با مقدار سختی مفصل

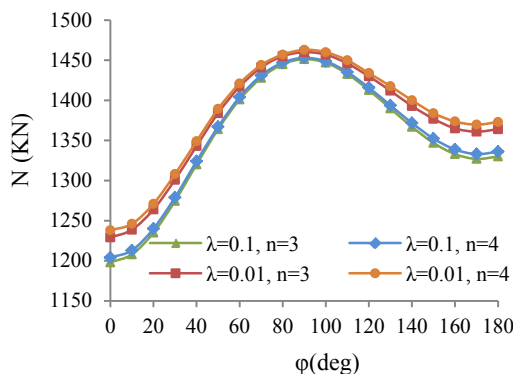
۲-۵- تغییرات گشتاور خمشی و نیروی محوری نسبت به تعداد مفاصل

افزایش تعداد مفاصل موجب افزایش انعطاف‌پذیری پوشش خواهد شد؛ بنابراین گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل کاهش خواهد یافت. از طرفی افزایش تعداد مفاصل منجر به افزایش تغییر شکل پوشش و افزایش فشار انفعالی وارد بر آن خواهد شد و نیروی محوری پوشش که حساسیت زیادی بر فشار وارده بر پوشش دارد، افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۴ و شکل ۱۵، گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش سگمندی دارای ۶ و ۸ عدد مفصل و نسبت‌های سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش برای دو حالت $\lambda = 0.1$ و $\lambda = 0.01$ با هم مقایسه شده است.

شکل ۱۶ نیز نشان می‌دهد که جابجایی‌های پوشش تونل، با افزایش تعداد مفاصل، افزایش می‌یابد. افزایش جابجایی قائم پوشش تونل وقتی سختی مفاصل کمتر از ۰٫۱ سختی پوشش است، بیش‌تر و قابل توجه است.



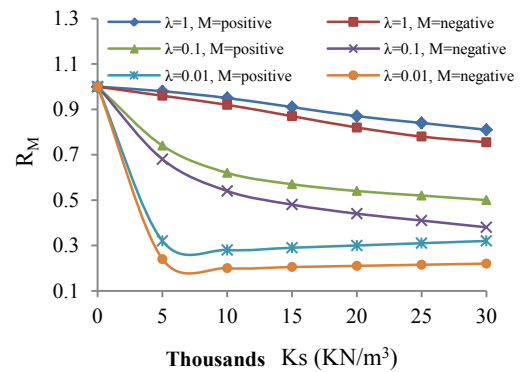
شکل ۱۴- تغییرات گشتاور خمشی با تعداد مفاصل



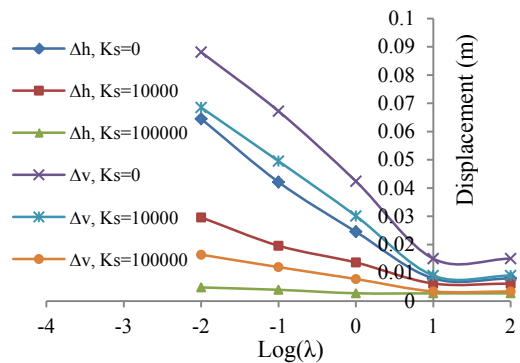
شکل ۱۵- تغییرات نیروی محوری با تعداد مفاصل

تأثیر ضریب مقاوم توده‌سنگ بر روی نسبت گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل به صورت شکل ۱۲ نیز قابل بررسی است. نسبت گشتاور خمشی (R_M)، به صورت قدر مطلق بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل با توجه به تأثیر مفاصل به قدر مطلق بیش‌ترین گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل یکپارچه تعریف می‌شود. هنگامی که $K_s = 0$ است، مقدار نیروی محوری و گشتاور خمشی به سختی مفاصل بستگی ندارد؛ بنابراین در این حالت مقدار نیروی محوری و گشتاور خمشی وارده بر پوشش تونل یکپارچه با پوشش سگمندی برابر است.

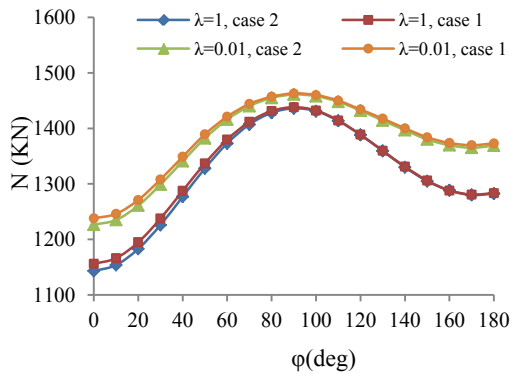
شکل ۱۳ نیز ارتباط بین جابجایی‌های تونل در مقابل لگاریتم نسبت سختی مفاصل با ضریب مقاوم توده‌سنگ متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، جابجایی‌های قائم و افقی به ضریب مقاوم توده‌سنگ با مقدار صفر، بیش‌تر از دو مقدار دیگر حساس بوده و تغییرات جابجایی بیش‌تری را نشان می‌دهد.



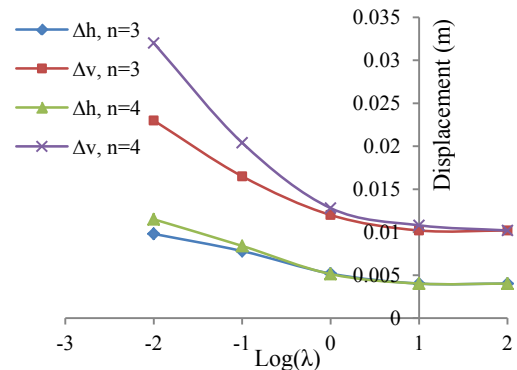
شکل ۱۲- تغییرات نسبت گشتاور خمشی با K_s



شکل ۱۳- جابجایی پوشش تونل با K_s

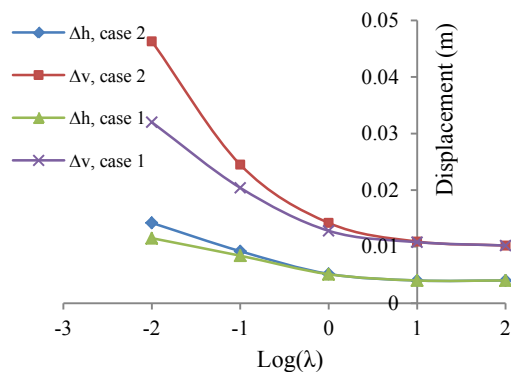


شکل ۱۸- تغییرات نیروی محوری با چیدمان مفاصل



شکل ۱۶- جابجایی پوشش تونل با تعداد مفاصل

شکل ۱۹، جابجایی‌های حاصل از دو حالت توزیع چیدمان مفاصل را نشان می‌دهد. جابجایی افقی حاصل از نحوه‌ی چیدمان مفاصل تغییر قابل توجهی ندارد؛ اما جابجایی قائم در حالت ۲، وقتی سختی مفاصل کمتر از ۰/۱ سختی پوشش است، قابل توجه است.



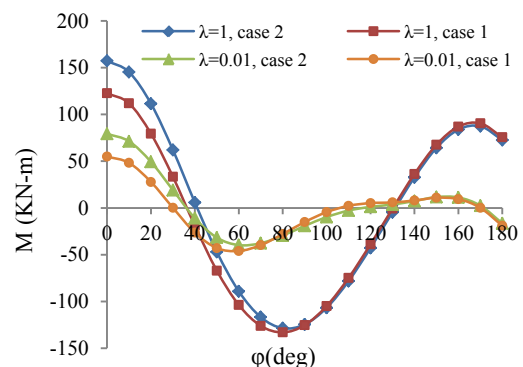
شکل ۱۹- جابجایی پوشش تونل با چیدمان مفاصل

۲-۶- تاثیر نحوه‌ی چیدمان مفاصل بر گشتاور خمشی و نیروی محوری

به منظور بررسی تاثیر نحوه‌ی چیدمان مفاصل بر گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش دارای ۸ سگمنت، دو نوع چیدمان با زاویه‌ی مفاصل گوناگون به شرح ذیل در نظر گرفته شده است:

حالت اول: ۳، ۴۸، ۹۳، ۱۳۸، ۱۸۳، ۲۲۸، ۲۷۳ و ۳۱۸ درجه
حالت دوم: ۳۵، ۸۰، ۱۲۵، ۱۷۰، ۲۱۵، ۲۶۰، ۳۰۵ و ۳۵۰ درجه

سپس برای هر یک از موقعیت‌های قرارگیری مفاصل، گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش، مطابق شکل ۱۷ و شکل ۱۸ محاسبه شده است. با افزایش زاویه‌ی مفاصل (نسبت به سقف تونل) مقدار گشتاور خمشی افزایش و نیروی محوری کاهش می‌یابد؛ بنابراین در وضعیتی که اولین مفصل پوشش در سقف تونل واقع شود، چیدمان مفاصل از دیدگاه سازه‌ای، بهینه است.



شکل ۱۷- تغییرات گشتاور خمشی با چیدمان مفاصل

۳- طراحی سازه‌ای پوشش تونل

برای طراحی پوشش تونل، باید مقاومت اسمی آن (S_n) توسط ضریبی (ϕ) کاهش داده شود. مقاومت کاهش یافته باید در برابر بارهای وارده بر پوشش (P) که به سبب اضافه بار احتمالی، توسط ضریب β افزایش داده شده‌اند، طبق گزاره‌ی (۱۲) ایمن باشد [۱۳].

$$\phi S_n \geq \beta P \quad (12)$$

نمودار اثر متقابل پوشش، ترکیب‌های قابل قبول گشتاور خمشی و نیروی محوری را در عضو بتن مسلح یا غیر مسلح نشان می‌دهد. نمودار توزیع تنش در سطح مقطع

از ردیف رسوبی کرتاسه قرار گرفته و دگرگونی ضعیفی را پشت سر گذاشته است. این پهنه‌ی گسترده به لحاظ ترکیب سنگ‌شناختی اولیه از تناوب شیل و ماسه‌سنگ تشکیل و تحت اثر دگرگونی دینامیکی به تناوب اسلیت و فیلیت تبدیل شده است. این دگرگونی موجب شده است طبیعت توده‌سنگ بسیار درزه‌دار و فاصله‌داری درزه‌ها کم باشد. مدول یانگ و نسبت پواسون در طول مسیر تونل بلند انتقال آب به ترتیب ۴ گیگاپاسکال و ۰٫۲۸ است. سایر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ به شرح جدول ۱ است [۱۶].

جدول ۱- تفکیک تونل بلند انتقال آب سد سردشت به محدوده‌های مختلف [۱۶]

GSI	σ_{ci} (MPa)	C (MPa)	ϕ (deg)	h_0 (m)	h (m)
۳۵	۲۰	۰٫۱۷	۳۷	۲۲	۵۰
۳۵	۲۲	۰٫۲۶۵	۳۲٫۵۲	۵۲	۱۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۴۱۳	۳۲	۱۱۰	۱۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۴۸۸	۳۰٫۶	۱۴۰	۲۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۵۵۷	۲۸٫۹۳	۱۹۰	۲۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۶۲۱	۲۷٫۵۹	۲۱۵	۳۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۶۸۱	۲۶٫۴۷	۲۶۰	۳۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۷۳۷	۲۵٫۵۲	۱۹۰	۴۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۷۹۱	۲۴٫۶۸	۲۰۰	۴۵۰
۴۰	۲۷	۰٫۸۴۲	۲۳٫۹۵	۲۱۰	۵۰۰
۴۰	۲۷	۰٫۸۹۱	۲۳٫۳	۲۳۰	۵۵۰

۵- ارزیابی پوشش طراحی شده تونل بلند انتقال آب سد سردشت با روش تحلیلی

با توجه به جدول ۱، میزان بار وارده بر پوشش تونل در سقف و دیواره‌ی تونل (P_1 تا P_6) تعیین شده است. در ادامه، نیروهای داخلی وارده بر پوشش در محدوده‌های مختلف تعیین و سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش برای این تحلیل، برابر با ۰٫۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات پوشش نیز به شرح جدول ۲ است [۱۶].

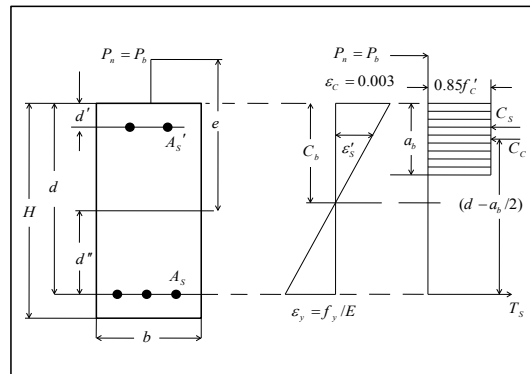
به منظور بررسی مناسب بودن سطح مقطع انتخاب شده برای پوشش، باید ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر آن در داخل نمودار اثر متقابل قرار گیرد. با استفاده از این روش، پایداری پوشش انتخاب شده در تمام

پوشش را می‌توان به صورت شکل ۲۰ در نظر گرفت. با توجه به این شکل، ترکیبی از نیروی محوری و گشتاور خمشی که منجر به گسیختگی پوشش بتن مسلح می‌شود، می‌تواند از گزاره‌های (۱۳) و (۱۴) تعیین شود [۱۴].

$$P_n = C_s + C_c - T_s \quad (13)$$

$$M_n = C_s \times \left(\frac{H}{2} - d' \right) + C_c \times \left(\frac{H}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + T_s \times \left(d'' - \frac{H}{2} \right) \quad (14)$$

که در آن $T_s = A_s f_y$ ، $C_c = 0.85 f_c' b a_b$ ، و $C_s = A_s' f_y$ است.



شکل ۲۰- نمودار توزیع تنش در سطح مقطع پوشش [۱۴]

۴- موقعیت زمین شناسی و جغرافیایی سد سردشت

سد سردشت در شمال غربی ایران و در جنوب غربی شهرستان سردشت از استان آذربایجان غربی قرار گرفته است. ساختگاه سد در ۱۲ کیلومتری جنوب غربی شهر سردشت و بر روی رودخانه‌ی کلاس است. ورودی تونل انتقال آب در تکیه‌گاه چپ سد واقع شده که دسترسی به آن از طریق ساختگاه سد امکان پذیر است. کاربری تونل بلند سد سردشت از نوع آب‌بر و تحت فشار است. طول کلی تونل از بخش ورودی تا خروجی حدود ۴۳۰۰ متر خواهد بود. بخش حفاری مکانیزه آن شامل یک رشته تونل به طول ۴۰۰۰ متر و قطر ۶٫۵۴ متر است که وظیفه‌ی انتقال آب را به عهده دارد [۱۵].

ساختگاه سد و سازه‌های مربوطه در پهنه‌ی گسترده‌ای

تمام محدوده‌ها در داخل نمودار اثر متقابل قرار می‌گیرد؛ بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام محدوده‌ها مناسب است.

محدوده‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه‌ی این بررسی در شکل ۲۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲۱، مشخص است که تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی وارده بر پوشش در

جدول ۲- مشخصات سامانه‌ی نگهداری مورد استفاده [۱۶]

پارامتر	مقدار
قطر خارجی پوشش سگمنتی	۶۳ متر
ضخامت پوشش سگمنتی	۳۰ سانتی‌متر
تعداد سگمنت در هر حلقه	۶ قطعه (با قطعه کلید)
مقاومت فشاری تک محوره‌ی بتن پوشش	۳۵ مگاپاسکال
تنش تسلیم فولاد	۴۰۰ مگاپاسکال
قطر آرماتورها ($\phi 18@15$)	۱۸ میلی‌متر
فاصله‌درای آرماتورها	۱۵ سانتی‌متر
ضخامت پوشش بتن روی آرماتورها	۶ سانتی‌متر

نمونه این موضوع برای محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر در شکل ۲۳ نشان داده شده است. برای تشخیص مناسب بودن پوشش انتخاب شده، ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش در داخل نمودار اثر متقابل قرار داده شده و نتیجه‌ی آن در شکل ۲۴ برای تمام محدوده‌ها آورده شده است. به دلیل این‌که نسبت تنش افقی به قائم زمین برابر با ۱ در نظر گرفته شده است، قسمت بیش‌تر بار وارده بر پوشش تونل به نیروی محوری تبدیل می‌شود و گشتاور خمشی وارده بر پوشش کوچک است. همان‌طور که در شکل ۲۴ نشان داده شده، تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش، در تمام محدوده‌ها در داخل نمودار اثر متقابل قرار می‌گیرد؛ بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام محدوده‌ها مناسب است.

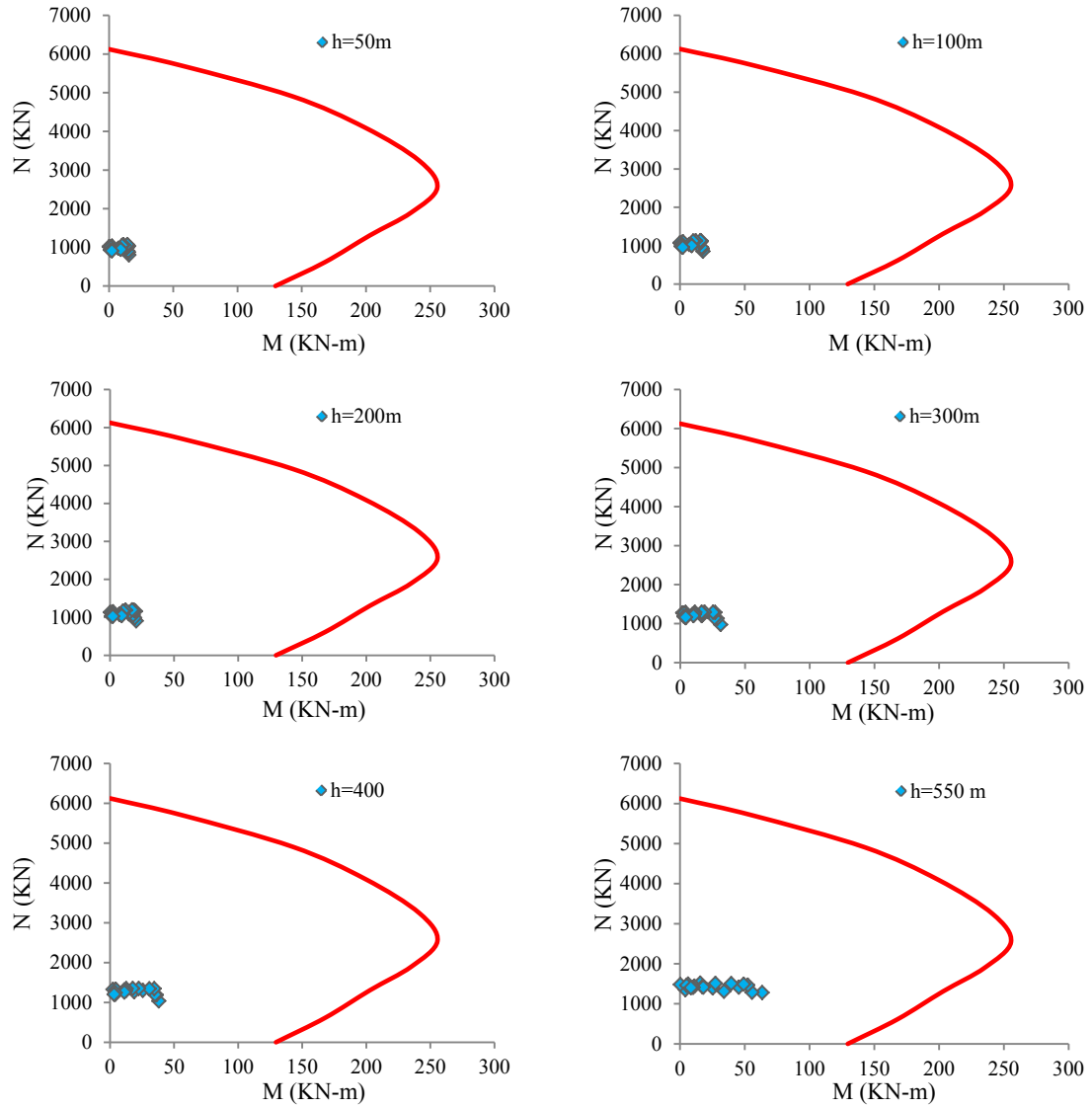
با فرض این‌که نسبت تنش افقی به قائم در طول مسیر تونل بلند انتقال آب سد سردشت بین ۰٫۷ تا ۱٫۳ متغیر است؛ بنابراین پایداری پوشش برای این حالت نیز باید بررسی شود. برای این منظور محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر (دارای کمترین مقدار فاکتور ایمنی) انتخاب شده است. برای این محدوده، با روش عددی، نیروی محوری و گشتاور خمشی وارد بر تونل در دو حالت نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰٫۷ و ۱٫۳ تعیین و ترکیب آن‌ها در نمودار اثر متقابل پوشش منتخب، قرار داده شده است. نتیجه این بررسی در شکل ۲۵ و شکل ۲۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده، ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش یکپارچه برای محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر، درون نمودار اثر متقابل قرار گرفته است. مقدار فاکتور ایمنی در محدوده‌ی با روباره‌ی ۵۵۰ متر برای پوشش یکپارچه ۲٫۲۲ و برای پوشش سگمنتی ۳٫۱۴ برآورد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب ایمنی پوشش با در نظر گرفتن مفاصل بیش‌تر است.

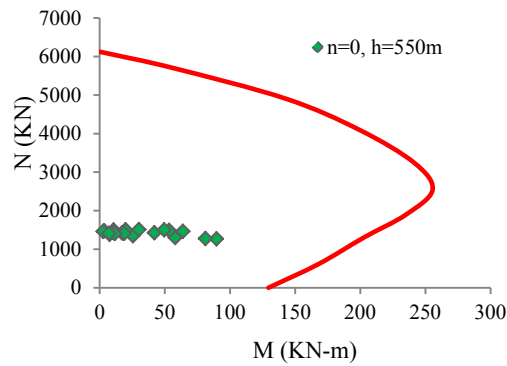
۶- ارزیابی پوشش طراحی شده تونل بلند انتقال آب سد سردشت با روش عددی

برای محاسبه‌ی نیروی محوری و گشتاور خمشی وارده بر پوشش به روش عددی با توجه به شرایط منطقه‌ی سد سردشت می‌توان توده‌سنگ را به صورت پیوسته در نظر گرفت و از نرم افزار *FLAC* استفاده نمود. به این سبب که تونل توسط *TBM* با طول سپر ۱۲ متر حفر می‌شود؛ بنابراین ابتدا به مدل ساخته شده، اجازه‌ی آزادی تنش داده می‌شود و سپس پوشش تونل توسط المان ساختاری *Liner* مدل می‌شود [۱۷]. در این تحلیل سختی پیچشی مفاصل بر صلبیت خمشی پوشش ۰٫۱ و نسبت تنش افقی به قائم زمین برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. در تمامی محدوده‌ها، نیروهای داخلی وارده بر پوشش تونل توسط نرم‌افزار *FLAC* برآورد شده است. به عنوان

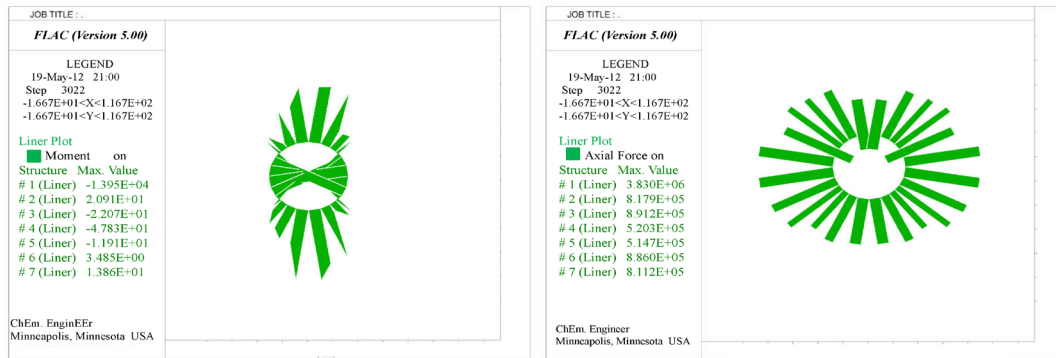
طراحی پوشش سگمنتی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به تأثیر مفاصل قطعات پوشش: ص ۴۳-۵۶



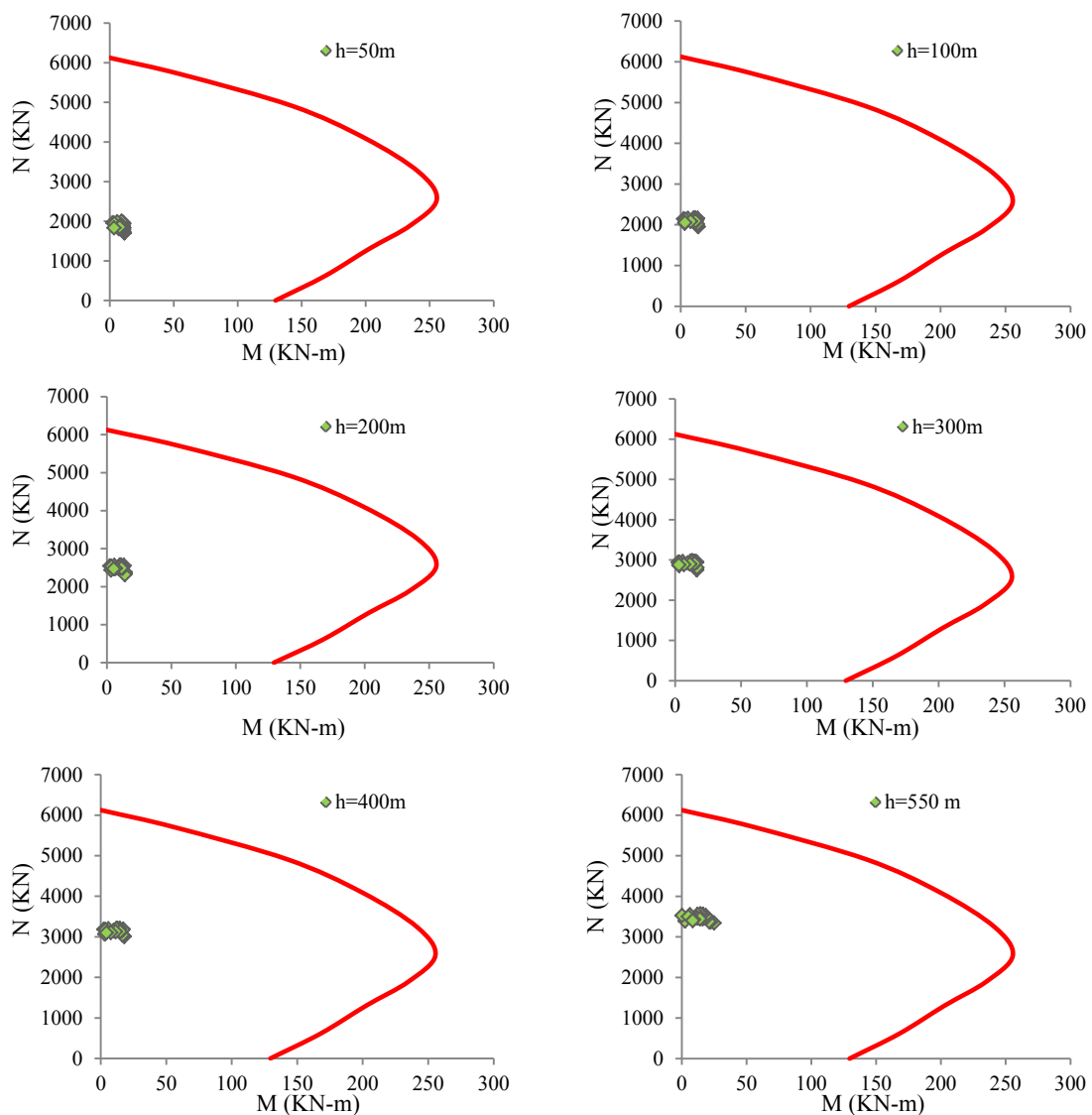
شکل ۲۱- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش انتخاب شده در تمام محدوده‌ها



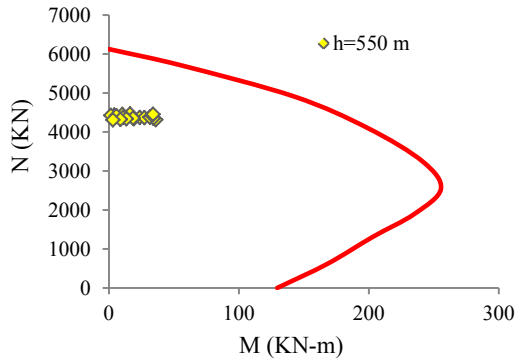
شکل ۲۲- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش یکپارچه در محدوده‌ی بارهای ۵۵۰ متر



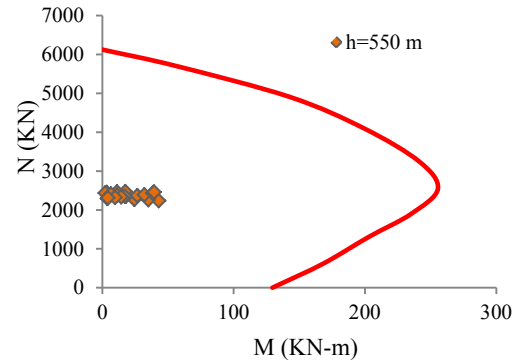
شکل ۲۳- نیروی محوری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش با روباره‌ی ۵۵۰ متر



شکل ۲۴- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش با روش عددی برای نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۱



شکل ۲۶- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش برای نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۱/۳



شکل ۲۵- بررسی پایداری سازه‌ای پوشش برای نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۷

۷- نتیجه‌گیری
در پوشش‌های سگمنتی حضور مفاصل سبب کاهش صلبیت پوشش و مقدار گشتاور خمشی وارده بر پوشش می‌شود. اما نیروی محوری وارده بر پوشش در دو حالت پوشش یکپارچه و سگمنتی تفاوت محسوس با یکدیگر نخواهد داشت. به دلیل پایین بودن مقاومت کششی بتن، در اغلب طراحی‌ها گشتاور خمشی، کنترل کننده‌ی ضخامت پوشش است؛ بنابراین در نظر گرفتن اثر مفاصل سبب کاهش گشتاور خمشی و استفاده از پوشش با ضخامت کمتر می‌شود.
در این پژوهش برای پوشش سگمنتی با بکارگیری روش تحلیلی، تأثیر نسبت تنش افقی به قائم زمین، ضریب مقاوم توده‌سنگ، سختی، نحوه‌ی توزیع و تعداد مفاصل بررسی و گشتاور خمشی، نیروی محوری و جابجایی‌های پوشش تونل در اثر نیروهای درونی وارد بر پوشش محاسبه شده است. در روش تحلیلی تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش سگمنتی تونل بلند انتقال آب سد سردشت با توجه به اثر مفاصل درون نمودار اثر متقابل قرار گرفته؛ بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام محدوده‌ها مناسب است. گشتاور خمشی و نیروی محوری

وارد بر پوشش یکپارچه نیز در داخل نمودار اثر متقابل قرار گرفته است. فاکتور ایمنی برای پوشش پیوسته و سگمنتی به ترتیب برابر با ۲/۲۲ و ۳/۱۴ برآورد شده است.
نسبت تنش افقی به قائم در طول مسیر تونل بلند انتقال آب سد سردشت بین ۰/۷ تا ۱/۳ متغیر است. در روش عددی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC* نیروی محوری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش تونل در سه حالت نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۷، ۱ و ۱/۳ برآورد شده و ترکیب آن‌ها درون نمودار اثر متقابل پوشش قرار گرفته است. در نهایت پوشش سگمنتی مد نظر با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در همه‌ی محدوده‌ها پایدار بوده است. در روش تحلیلی نسبت تنش افقی به قائم برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است. با مقایسه‌ی نیروهای داخلی حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی می‌توان نتیجه گرفت که این روش‌ها در تخمین گشتاور خمشی اختلاف کمی دارند؛ اما مقدار نیروی محوری در روش تحلیلی کمتر تخمین زده شده است. علت این امر در نظر گرفتن شش نوع بار وارده به پوشش سگمنتی در روش تحلیلی است که در نرم‌افزار و در طبیعت مقدار آن‌ها بیش‌تر است.

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
E_s	KN/m^2	مدول یانگ توده‌سنگ	P_6	KN/m^2	فشار مقاوم توده‌سنگ
E	KN/m^2	مدول یانگ پوشش	P_h	KN/m^2	فشار انفعالی توده‌سنگ
v_s	-	نسبت پواسون توده‌سنگ	K_s	KN/m^3	ضریب مقاوم توده‌سنگ
v	-	نسبت پواسون پوشش	Δh	m	جابجایی افقی پوشش

جابجایی قائم پوشش	m	Δ_v	لختی دورانی پوشش	m^4	I
مقدار زاویه از سقف تونل	deg	φ	شعاع خارجی پوشش	m	R
تعداد مفصل در نصف حلقه‌ی پوشش	-	n	لختی دورانی پوشش بدون مفصل	m^4	I_o
ارتفاع مقطع (ضخامت پوشش)	m	H	لختی دورانی پوشش در محل مفصل	m^4	I_j
عرض سطح مقطع	m	b	گشتاور خمشی در واحد طول	$KN-m$	M
عرض مقطع تحت تنش فشاری	m	a_b	نیروی محوری در واحد طول	KN	N
ضخامت پوشش بتنی آرماتور	m	d'	تعداد سگمنت	-	N'
فاصله‌ی آرماتور از تار خنثی	m	$d//$	ضریب کاهش گشتاور خمشی	-	η
تنش تسلیم فولاد	KN/m^2	f_y	سختی پیچشی مفاصل	$KN-m/rad$	K_θ
مقاومت فشاری بتن	KN/m^2	f_c	زاویه‌ی مفصل نام نسبت به سقف تونل	deg	φ_i
مساحت کل آرماتور فشاری	m^2	A_s'	فشار قائم توده‌سنگ روباره	KN/m^2	P_1
مساحت کل آرماتور کششی	m^2	A_s	فشار عکس‌العمل کف پوشش	KN/m^2	P_2
ارتفاع روباره	m	h	فشار جانبی زمین در سقف پوشش	KN/m^2	P_3
مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ	MPa	σ_{ci}	فشار جانبی اضافی در کف پوشش	KN/m^2	P_4
تراز آب زیرزمینی	m	h_0	وزن پوشش	KN/m^2	P_5

۹- منابع‌ها

- [1] Kim, S. H., Pelizza, S., & Kim, J. S. (2006). A study of Strength Parameters in the Reinforced Ground by Rock Bolts. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 378-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.192>.
- [2] Kim, H. J., & Eisenstein, Z. (2006). Prediction of Tunnel Lining Loads Using Correction Factors. *Engineering Geology*, 85 (3-4), 302-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.03.001>.
- [3] Wood, A. M. (1975). The Circular Tunnel in Elastic Ground. *Geotechnique*, 25 (1), 115-127. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1975.25.1.115>.
- [4] Lee, K. M., & Ge, X. W. (2001). The Equivalent of The Jointed Shield Driven Tunnel Lining to A Continuous Ring Structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3), 461-483. <http://dx.doi.org/10.1139/t00-107>.
- [5] Lee, K. M., & Hou, X. Y., Ge, X. W., Tang, Y. (2001). An Analytical Solution for A Jointed Shield-Driven Tunnel Lining. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(4), 365-390. <http://dx.doi.org/10.1002/nag.134>.
- [6] Koyama, Y. (2003). Present Status and Technology of Shield Tunneling Method in Japan. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18(2-3), 145-159. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00040-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00040-3).
- [7] Lu, L., Lu, X., & Fan, P. (2011). Full-Ring Experimental Study of The Lining Structure of Shanghai Changjiang Tunnel. *Civil Engineering and Architecture*, 45(8), 732-739. ISSN :1934-7359.
- [8] Xiaochun, Z., Wei, Z., Zhengrong, H., & Yuewang, H. (2006). Effect of Joint Structure on Joint Stiffness for Shield Tunnel Lining. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 406-407. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.215>.

- [9] Teachavorasinskun, S., & Chub-uppakarn, T. (2010). Influence of Segmental Joints on Tunnel Lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 490-494. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.003>.
- [۱۰] مختاریان، م.، جعفری، ا.، و اسماعیلی، م. (۱۳۸۸). تحلیل پایداری پوشش سگمندی تونل خط ۲ قطار شهری تبریز. هشتمین کنفرانس تونل/ایران (ص. ۲۱۵ - ۲۱۱). تهران، ایران: دانشگاه تربیت مدرس. شابک: ۱۷۳۵-۵۵۴۰.
- [11] Hefny, A. M., & Chua, H. C. (2006). An Investigation into the Behaviour of jointed Tunnel Lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3-4), 428-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.12.070>.
- [12] Roland, W. (2000). *Steel Fibre Reinforced Tunnel Segments for The Application in shield Driven Tunnel Lining* (pp. 35-44). Netherland: Doctoral Thesis, Delft University of Technology. ISBN:90-407-1965-9.
- [۱۳] مستوفی نژاد، د. (۱۳۸۶). *سازه‌های بتن آرمه (جلد اول)*. (ص. ۱۴۱ - ۱۳۵). اصفهان: انتشارات ارکان دانش. شابک: ۴-۷۴-۹۶۴-۷۳۰۸.
- [۱۴] طاحونی، ش. (۱۳۸۳). *طراحی سازه‌های بتن مسلح (چاپ اول)*. (ص. ۳۲۸ - ۳۲۱). تهران: انتشارات دهخدا. شابک: ۹۶۴۶۵۷۲۱۴۶.
- [۱۵] شرکت مهندسی مشاور سپاسد- فراب. (۱۳۹۰). *گزارش زمین‌شناسی مهندسی مطالعات مرحله‌ی دوم*. تهران. کد طرح: ۵۵۸۷۳۴۰.
- [۱۶] شرکت مهندسی مشاور سپاسد- فراب. (۱۳۹۰). *گزارش بازنگری مرحله‌ی دوم پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ*. تهران. کد طرح: ۵۵۸۷۳۴۱.
- [17] Structural Elements. (2007). *FLAC User's Guide, 5th*. Minneapolis, Minnesota, United States of America: ITASCA Consulting Group, Inc.

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم - مطالعه موردی: تونل قطعه شرقی - غربی خط ۷ متروی تهران

رضا حیدری شیبانی^۱؛ شکرالله زارع^{۲*}؛ حسین میرزائی نصیرآباد^۳؛ محمد فروغی^۴

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن؛ گرایش استخراج؛ دانشگاه صنعتی شاهرود

۲ و ۳- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- کارشناس مطالعات مهندسی حین ساخت پروژه‌ی تونل خط ۷ تهران، قطعه‌ی شرقی - غربی؛ موسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۲۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

واژگان کلیدی	چکیده
نشست <i>EPB</i> تونل متروی تهران ابزار بندی مدلسازی عددی	در تونل‌های مناطق شهری که بیش‌تر در عمق کم و در بستر خاکی حفر می‌شوند، فشار جبهه‌کار می‌تواند یکی از عوامل پیشگیری‌کننده‌ی نشست سطح زمین باشد. در پروژه‌ی خط ۷ متروی تهران، تونل با ماشین حفاری مکانیزه از نوع متعادل‌کننده‌ی فشار زمین (<i>EPB</i>) حفر می‌شود. در این تحقیق با تمرکز بر روی چهار مقطع از این تونل، تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین مورد تحلیل قرار گرفته است. فشار جبهه‌کار در چهار حالت فشار اولیه، ۱/۵، ۲ و ۴ برابر فشار اولیه و فشار تزریق در ۵ حالت بدون اعمال تزریق، برابر فشار جبهه‌کار، ۰/۵، ۱ و ۲ بار بیش‌تر از فشار جبهه‌کار با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود <i>PLAXIS3D</i> مورد ارزیابی قرار گرفته است. اعتبارسنجی نتایج با استفاده از ابزاربندی در سطح زمین و بر روی دو مقطع از تونل انجام گرفته است. مقایسه‌ی نتایج مدلسازی و نتایج حاصل از ابزاربندی بیانگر صحت روند مدلسازی است. برای حالت $H < 2D$ تاثیرات فشار جبهه‌کار بر نشست سطح به مراتب بیش‌تر از حالت $H > 2D$ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، حداکثر سبب کاهش ۵ میلی‌متری بیش‌ترین نشست می‌شود. بنابراین افزایش فشار جبهه‌کار، میزان نشست را کاهش می‌دهد اما این مقدار بسیار ناچیز است.

۱- مقدمه

کننده‌ی فشار زمین دارای محدودیت‌هایی است. به عنوان نمونه در خاک‌های نامناسب این سامانه‌ها با مشکلات زیادی روبرو شده و در برخی موارد حتی ممکن است ادامه‌ی پروژه امکان‌پذیر نباشد. اما آنچه سبب بکارگیری این سامانه‌ها برای حفاری در زمین‌های نرم شده است، توانایی آن‌ها در مهار تغییر شکل محیط اطراف تونل است [1]. برای مهار تغییر شکل‌های قائم و افقی ناشی از تونلسازی در یک محدوده‌ی معین، لازم است فشارهای برداشته شده از روی جبهه‌کار به آن برگردانده شوند تا پیش از پایان زمان خودپایداری جبهه‌کار تعادل نیروها دوباره برقرار شود. روش‌های مختلفی برای ارزیابی فشار جبهه‌کار

در محیط‌های شهری به دلیل وجود سازه‌های گوناگون از جمله ساختمان‌ها، تاسیسات و خیابان‌ها محدودیت‌های زیادی برای میزان نشست ناشی از ساخت تونل وجود دارد. اکثر این فضاها به علت نزدیک بودن به سطح زمین در بستر خاکی حفر می‌شوند. در چنین شرایطی پایداری جبهه‌کار یکی از مهم‌ترین و پرمخاطره‌ترین عوامل در حفاری تونل بوده و نیازمند بررسی و تحلیل دقیق است. بکارگیری روش‌های تونلسازی مکانیزه دارای مزایایی از جمله کاهش زمان ساخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های اجرا است. کاربرد دستگاه‌های حفار مکانیزه‌ی مجهز به سامانه‌ی متعادل

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی دوم؛ کدپستی:

۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ شماره‌ی تلفن و دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۹۵۵۰۹؛ رایانامه: zare@shahroodut.ac.ir

بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین پرداخته است [17]. در سال ۲۰۰۶، کسپر (*Kasper*) با استفاده از روش اجزا محدود و مدل‌سازی سه بعدی با نرم‌افزار *TSIM3D*، تاثیر پارامترهای ماشین حفار متعادل کننده‌ی فشار زمین شامل فشار جبهه‌کار، فشار تزریق، وزن ماشین و مخروطی بودن سپر ماشین بر نشست سطح زمین را مطالعه کرده است [18]. در سال ۲۰۱۲ لامبروگی (*Lambrughi*) با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC3D* به تحلیل حساسیت مدل‌های رفتاری گوناگون خاک و بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین برای پروژه‌ی متروی مادرید پرداخته است. لامبروگی پروفیل‌های طولی نشست را در حالت‌های مختلف بدست آورده و نتایج مدل‌سازی را با اطلاعات حاصل از ایزابندی مقایسه کرده است [19]. برتوز (*Bertoz*) در سال ۲۰۱۲، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی فرآیند تونلسازی با *EPB*، روابطی برای فشار جبهه‌کار ارائه داده است [20].

در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی تاثیر فشار جبهه‌کار بر نشست سطح زمین در پروژه‌ی تونل خط ۷ متروی تهران مطالعه و بررسی شده است. از آنجایی که محیط در برگیرنده‌ی تونل، محیط خاکی و پیوسته است، در این مطالعه نرم‌افزار *PLAXIS3D* بکار برده شده است. این نرم‌افزار ابزار بسیار مناسبی برای تحلیل و مدل‌سازی شرایط تونلسازی با ماشین *EPB* است.

۲- زمین‌شناسی و خصوصیات ژئوتکنیکی مسیر خط ۷ متروی تهران

خط ۷ متروی تهران به دو قطعه‌ی شمالی- جنوبی و شرقی- غربی تقسیم شده است. مطالعات انجام شده در این تحقیق مربوط به بخش شرقی- غربی است. این تونل دارای طول ۱۲ کیلومتر است. تونل با یک دستگاه ماشین حفار متعادل کننده‌ی فشار زمین با قطر ۹،۱۶۴ متر حفاری می‌شود. پوشش نهایی تونل بصورت تتراگونال، با ضخامت ۳۵۰ میلی‌متر، عرض ۱،۵ متر و قطر خارجی ۸،۸۵ متر است. تاکنون بیش از ۲ کیلومتر از تونل حفاری شده است. در طی مطالعات مقدماتی، تعداد ۱۵ گمانه و چاهک اکتشافی بر روی بخش شرقی- غربی حفر شده است. سپس در طی

وجود دارد. موحکم (*Mohkam*) در سال ۱۹۸۹ یک مدل سه بعدی بر مبنای نظریه‌ی تعادل حدی برای تحلیل پایداری تونل و ارزیابی نشست، پیش از نصب نگهداری صلب ارائه کرده است [2]. جانسز (*Jancsecz*) در سال ۱۹۹۴ فشار جبهه‌کار را برای تونل‌های حفر شده در خاک‌های دانه‌ای و غیر چسبنده محاسبه نموده است [3]. برویر (*Broere*) در سال ۱۹۹۸ بر اساس مدل پایداری گوه که اساس آن از روش سیلو و گوه گرفته شده، روشی برای محاسبه‌ی فشار جبهه‌کار ارائه داده است [4]. در مجموع روش‌های مختلف تجربی [5]، [6] و [7]، مدل‌سازی فیزیکی [8] و عددی برای ارزیابی تغییر شکل محیط اطراف تونل و بررسی تاثیر عوامل گوناگون از جمله فشار جبهه‌کار بر جابجایی و نشست سطح زمین در تونلسازی در زمین نرم بکار گرفته شده است.

مطالعات مختلفی با استفاده از نتایج ایزابندی برای بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار و پارامترهای تاثیرگذار ماشین حفار بر نشست ناشی از تونلسازی در زمین نرم صورت گرفته است. از جمله‌ی این تحقیقات می‌توان به مطالعات کلوت و همکاران (*Clough, et al.*) در سال ۱۹۸۳ بر روی تونل انتقال آب سانفرانسیسکو [9]، تحقیقات لکا (*Leca*) در سال ۱۹۸۹ بر روی تونل شهری واشنگتن [10]، مطالعه‌ی وانگ (*Hwang*) در سال ۱۹۹۴ بر روی تونل قطار سریع‌السیر تایپه [11]، تحقیقات ماتسوشیتا و همکاران (*Matsushita, et al.*) در سال ۱۹۹۴ بر روی متروی فوکاکای ژاپن [12]، مطالعات چیوربولی و مارچسلی (*Chiorboli & Marchesili*) در سال ۱۹۹۶ بر روی تونل متروی میلان [13]، مطالعه‌ی سوانسات (*Suwansawat*) در سال ۲۰۰۲ بر روی تونل متروی بانکوک [14]، تحقیق کرو (*Crow*) در سال ۲۰۰۳ بر روی تونل انتقال آب لوس‌آنجلس [15] و مطالعه‌ی آنلوتپ (*Unlutep*) در سال ۲۰۰۹ بر روی متروی ازمیر [16] اشاره نمود.

تحلیل‌های عددی از روش‌های پرکاربرد هستند که امکان بررسی مراحل ساخت، رفتار سه بعدی جبهه‌کار و همچنین برهم‌کنش بین تونل و پوشش بتنی را فراهم می‌سازند. با این وجود صحت نتایج این روش‌ها کاملاً به داده‌های اولیه‌ی مسئله بستگی دارد. در سال ۲۰۰۳ گرین‌وود (*Greenwood*) با استفاده از روش اجزا محدود به

دارد و ماشین حفار بیش‌تر با این شرایط زمین‌شناسی مواجه خواهد شد، هر دو مقطع، دارای شرایط یکسان هستند؛ با این تفاوت که روباره‌ی تونل در مقطع کیلومتر ۸+۲۰۰، ۵، ۱۱ متر ($H < 2D$) و در کیلومتر ۸+۲۰۰، ۲۱ متر ($H > 2D$) است. هر دو مقطع تونل در زیر سطح آب زیرزمینی قرار گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که در زمان تهیه‌ی این مقاله، تونل در این دو مقطع هنوز حفر نشده است. دو مقطع کیلومتر ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده‌اند نیز برای بررسی صحت مدلسازی با استفاده از نتایج ایزاربندی انتخاب شده است.

خصوصیات ژئوتکنیکی واحدهای دو مقطع تونل در کیلومتر ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ در جدول ۱ معرفی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، لایه‌های خاکی دربرگیرنده‌ی مسیر تونل به سه گونه‌ی زمین‌شناسی مهندسی شامل *ET-2*، *ET-3* و *ET-5* تفکیک شده‌اند. وضعیت لایه‌بندی، جنس لایه‌ها، ابعاد هندسی مدل سه بعدی اجزا محدود و نحوه‌ی مش‌بندی دو مقطع نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. برای مدلسازی عددی، ابتدا هندسه‌ی مدل تعریف شده و سپس شرایط اولیه و مرزی با توجه به طبیعت مسئله، اعمال شده است. بدین منظور در سطح مدل بار ۲۰ کیلو نیوتنی اعمال شده است.

ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی و المان سپر در جدول ۲ آورده شده است. رفتار مکانیکی توده‌ی خاک محیط اطراف تونل با مدل موهر-کلمب توصیف شده و همان‌طور که بیان شد، برای خواص ژئومکانیکی لایه‌های مختلف خاک نظیر وزن مخصوص خشک، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک، از اطلاعات جدول ۱ استفاده شده است.

مطالعات تکمیلی ۱۳ گمانه و ۵ چاهک بر روی مسیر تونل و همچنین ۳۳ گمانه و ۸ چاهک بر روی ایستگاه‌های مسیر حفر شده است.

بطور کلی جنوب تهران و ساختگاه این تونل بیش‌تر از رسوبات سیلنتی با عدسی‌های کم‌ضخامت ماسه و شن تشکیل شده است [۲۱]. رسوبات آبرفتی تهران در مسیر متروی خط ۷، بیش‌تر شامل ترکیبی از رسوبات ریزدانه، شن، ماسه و قلوه‌سنگ است و به شکل روکشی روی رسوبات قدیمی‌تر را پوشانده است. در مجموع از شرق به غرب رسوبات دانه‌ریزتر می‌شوند؛ بطوریکه در قسمت‌های غربی مسیر تونل، لایه‌ی ریزدانه‌ی رسی توسعه‌ی بیش‌تری دارد.

بر اساس مطالعات هیدروژئولوژی انجام شده، جهت جریان آب‌های زیرزمینی در محدوده‌ی مسیر تونل، از شمال شرق به جنوب غرب است. با توجه به متوسط سطح آب اندازه‌گیری شده در گمانه‌ها، ۳۵ درصد مسیر تونل بالاتر از سطح ایستابی قرار می‌گیرد. در این مناطق، ممکن است ورود آب‌های منطقه‌ی غیر اشباع، فاضلاب و کاریزه‌ها، مشکلاتی را ایجاد نماید. در حدود ۶۵ درصد از مسیر تونل نیز در زیر سطح ایستابی قرار می‌گیرد [۲۱].

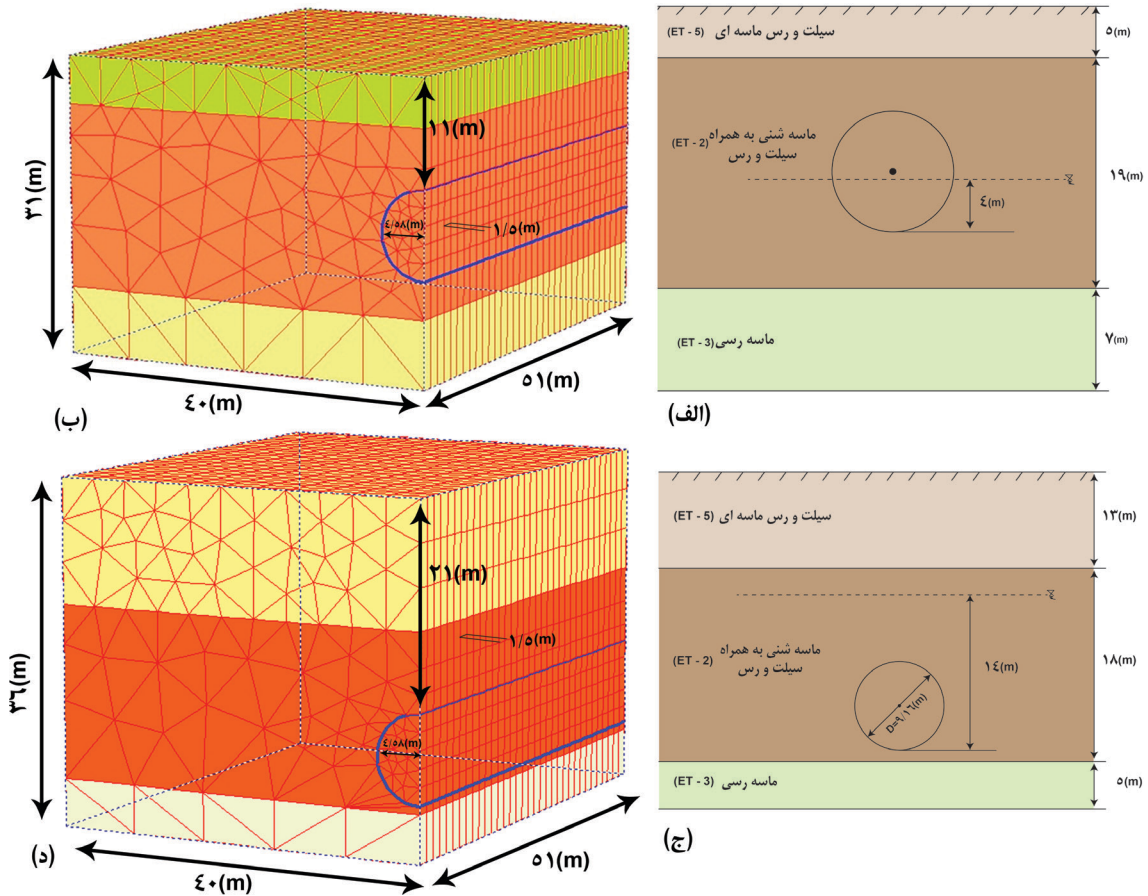
۳- انتخاب مقاطع حفاری و مدلسازی عددی با نرم‌افزار *PIAXIS3D*

برای مدلسازی و بررسی تاثیر فشار جبهه‌کار در این پژوهش، ۴ مقطع از تونل انتخاب شده است. دو مقطع از تونل در کیلومتر ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰، به دلایلی مانند شرایط زمین‌شناسی، سطح ایستابی آب زیرزمینی و ضخامت روباره برای تحلیل حساسیت فشار جبهه‌کار و فشار تزریق، انتخاب شده است. بدین سبب که درصد زیادی از جبهه‌کار مسیر تونل در ماسه‌ی شنی به همراه سیلت و رس (*ET-2*) قرار

جدول ۱- پارامترهای ژئوتکنیکی برای واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل [۲۱]

گونه‌ی زمین‌شناسی	چسبندگی (kPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	وزن مخصوص خشک خاک (g/cm^3)
<i>ET-2</i>	۱۵	۳۳	۷۵	۰٫۳	۱٫۸۴
<i>ET-3</i>	۳۰	۳۳	۵۰	۰٫۳۲	۱٫۹
<i>ET-5</i>	۳۱	۲۸	۳۵	۰٫۳۵	۱٫۷

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم- تونل شرقی غربی خط ۷ متروی تهران: ص ۵۷-۶۸



شکل ۱- لایه بندی، شرایط زمین شناسی، سطح آب و موقعیت تونل در کیلومتراژ ۲۰۰+۵ (الف وب) و ۲۰۰+۸ (ج و د)

جدول ۲- خصوصیات ماشین EPB و پوشش بتنی تونل خط ۷ متروی تهران قطعه شرقی- غربی

واحد	مقدار		علایم	پارامتر
	پوشش بتنی	EPB		
-	الاستیک	الاستیک	-	نوع مواد
MN/m	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	EA	صلبیت محوری
MNm ² /m	۱۰۲	۵۰	EI	صلبیت خمشی
m	۰,۳۵۰	۰,۲۴۵	d	ضخامت
KN/m/m	۸,۴	۴۸,۸	w	وزن
-	۰,۲	۰,۲	v	نسبت پواسون

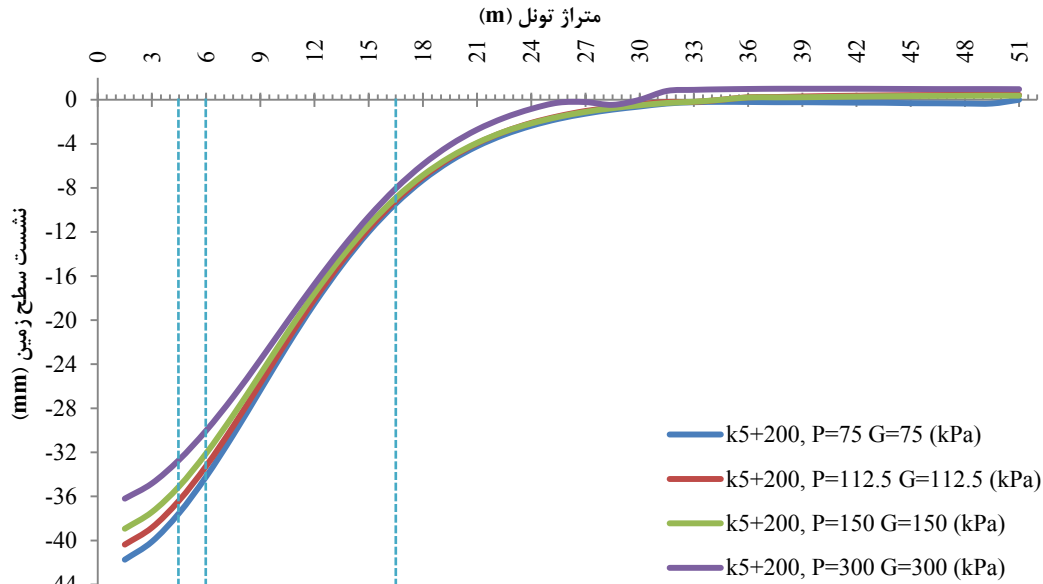
فاصله ۳۰ متری از جبهه کار در کیلومتراژ ۱۰+۵۰۰ و به فاصله ۳۵ متری از جبهه کار در کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ برای پایش نشست انتخاب شده است. در جدول ۳ نتایج مدل سازی عددی و نتایج حاصل از ابزاربندی برای دو مقطع فوق برای مقایسه آورده شده است. با توجه به این جدول،

۴- اعتبارسنجی نتایج مدل سازی عددی

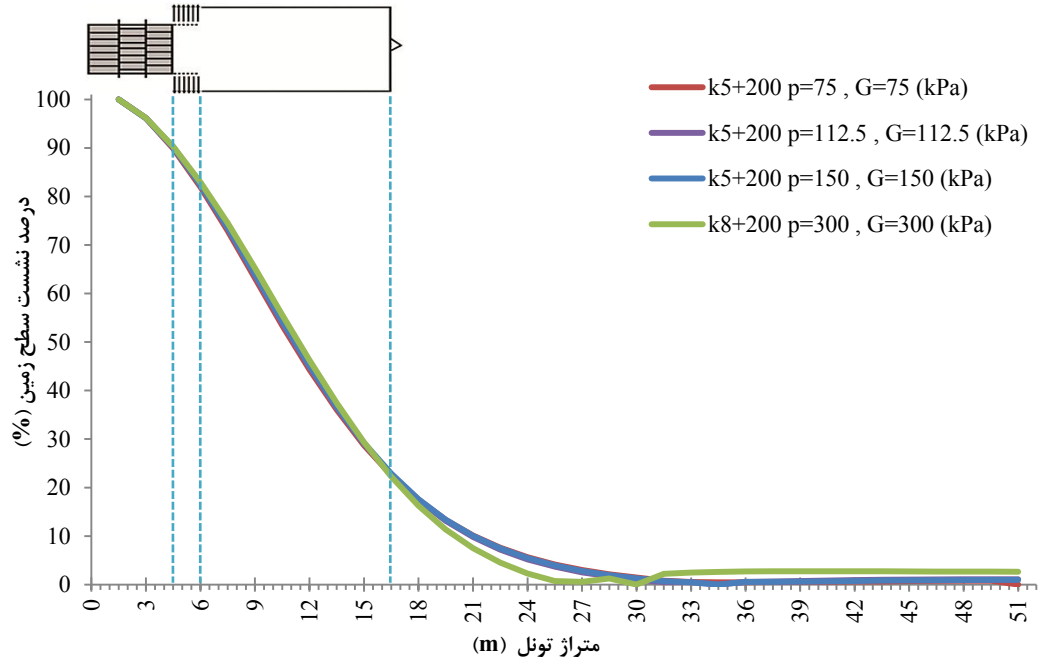
به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت روند مدل سازی عددی سه بعدی اجزا محدود در دو مقطع ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل از نتایج ابزاربندی و رفتارنگاری استفاده شده است. برای مدل سازی عددی این مقاطع، نقطه ای در سطح زمین به

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم- تونل شرقی غربی خط ۷ متروی تهران: ص ۵۷-۶۸

تزریق ۵۰ کیلوپاسکال بیش تر از فشار جبهه کار، کمتر از ۲۵ درصد نشست در جلو سپر، ۲۵ تا ۸۸ درصد نشست در بالای سپر و ۸۸ تا ۱۰۰ درصد نشست پس از عبور سپر صورت گرفته است. در دو حالت دیگر یعنی فشار تزریق ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال بیش تر از فشار جبهه کار نیز روند یکسانی مشاهده شده است.



الف- پروفیل طولی نشست سطح زمین در حالت های مختلف مدلسازی (فشار تزریق برابر با فشار جبهه کار)



ب- درصد نشست سطح زمین (فشار تزریق برابر با فشار جبهه کار)

شکل ۲- تاثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتر از ۵+۲۰۰

میزان نشست کلی بوضوح دیده می‌شود. میزان نشست در دو وضعیت بدون فشار تزریق و با فشار تزریق کاملاً متفاوت است. با اعمال فشار تزریق کاهش میزان نشست چشمگیر است. در حالت اعمال فشار تزریق، به ازای مقادیر بیش‌تر از ۵۰ کیلوپاسکال بیش از فشار جبهه‌کار ($P+50$)، تغییرات نشست سطح زمین ناچیز است.

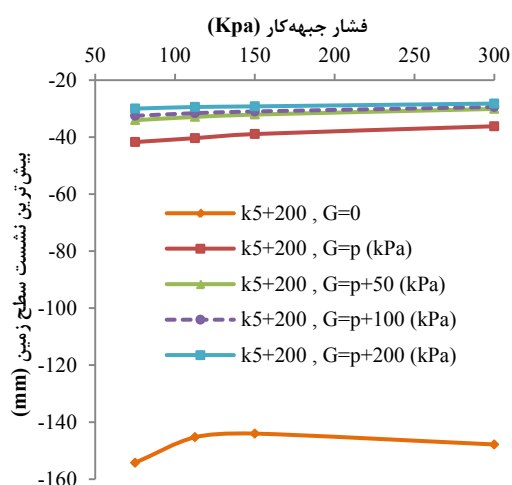
بیش‌ترین نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار برای کیلومترهای ۵+۲۰۰ تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شیب کم نمودار برای حالات مختلف فشار جبهه‌کار، تاثیر نه چندان زیاد فشار جبهه‌کار بر بیش‌ترین نشست سطح زمین را نشان می‌دهد. این در حالی است که تاثیر فشار تزریق در

جدول ۴- درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار جبهه‌کار در کیلومترهای ۵+۲۰۰

شرایط مدلسازی	نشست جلوی جبهه‌کار (%)	نشست در بالای سپر (%)	نشست پس از عبور سپر (%)
P و $G=0$	<10	۴۵-۱۰	۱۰۰-۴۵
P و $G=P$	<20	۸۲-۲۰	۱۰۰-۸۲
P و $G=P+50$	<25	۸۸-۲۵	۱۰۰-۸۸
P و $G=P+100$	<26	۸۸-۲۶	۱۰۰-۸۸
P و $G=P+200$	<28	۸۸-۲۸	۱۰۰-۸۸

نشست سطح زمین در حالت فشار جبهه‌کار برابر با فشار تزریق در کیلومترهای ۸+۲۰۰ نشان داده شده است. به ازای فشار جبهه‌کار ۷۵ کیلوپاسکال، بیش‌ترین نشست سطح برابر با ۲۲/۹ میلی‌متر محاسبه شده است. با افزایش ۱/۵ برابری فشار جبهه‌کار، نشست ۲۱/۱۷ میلی‌متر، با افزایش ۲ برابری فشار جبهه‌کار، مقدار آن ۲۰/۵۳ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست برابر با ۱۹/۳۲ میلی‌متر محاسبه شده است. بنابراین با افزایش ۱/۵ برابری فشار جبهه‌کار، نشست به طور نسبی، ۱/۷۳ میلی‌متر کاهش یافته است. با افزایش ۲ برابری فشار، ۲/۳۷ میلی‌متر و با افزایش ۴ برابری فشار جبهه‌کار، نشست زمین ۳/۶ میلی‌متر کاهش نشان داده است که چندان زیاد نیست. شکل ۴-ب درصد نشست سطح زمین در این مقطع را به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق برابر فشار جبهه‌کار نشان می‌دهد. با توجه به شکل کمتر از ۴۸ درصد نشست در جلوی جبهه‌کار، ۴۸ تا ۹۰ درصد نشست در بالای سپر و ۹۰ تا ۱۰۰ درصد نشست پس از عبور سپر رخ داده است.

درصد نشست در جلوی جبهه‌کار، بالای سپر و پس از عبور سپر به ازای حالات مختلف فشار جبهه‌کار و فشار تزریق در کیلومترهای ۸+۲۰۰ در جدول ۵ درج شده است. در این کیلومترهای با افزایش فشار جبهه‌کار، بیش‌ترین نشست سطح کاهش می‌یابد؛ اما این تغییرات قابل توجه نیست.

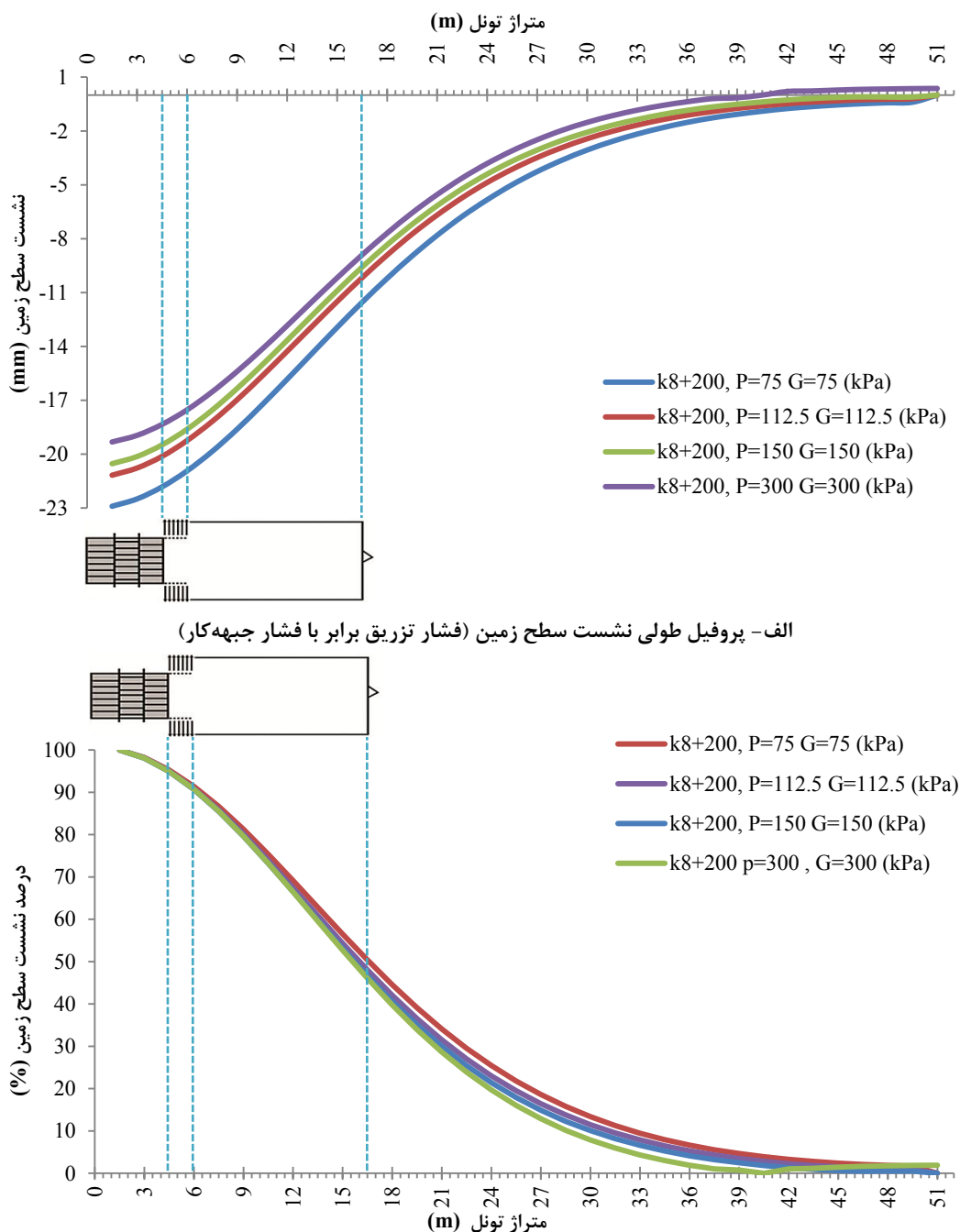


شکل ۳- فشار جبهه‌کار در برابر بیش‌ترین نشست سطح زمین در کیلومترهای ۵+۲۰۰

۵-۲- کیلومترهای ۸+۲۰۰

در این مقطع از تونل، روباره ۲۱ متر و بیش‌تر از دو برابر قطر تونل است ($H>2D$). طول مدل ۵۱ متر و سطح آب از کف تونل ۱۴ متر است. نتایج مدلسازی عددی پس از ۱۶۵ متر حفاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای تحلیل بهتر نتایج، تاثیر فشار جبهه‌کار در این مقطع همانند مقطع کیلومترهای ۵+۲۰۰ انجام شده است.

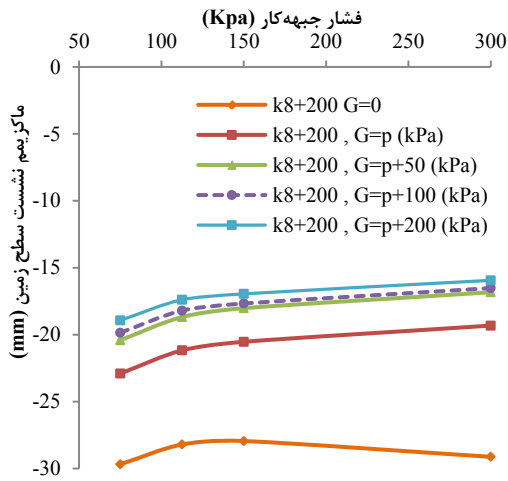
در شکل ۴-الف تاثیر فشار جبهه‌کار بر پروفیل طولی



شکل ۴- تاثیر فشار جبهه کار و فشار تزریق بر نشست سطح زمین در کیلومتر ۸+۲۰۰

نمودار برای حالات مختلف فشار جبهه کار کم بوده و بیانگر تاثیر نه چندان زیاد فشار جبهه کار بر بیشترین نشست سطح زمین است. افزایش ۴ برابری فشار جبهه کار حداکثر

بیشترین نشست سطح زمین به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه کار برای کیلومتر ۸+۲۰۰ تونل در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل در این مقطع نیز شیب

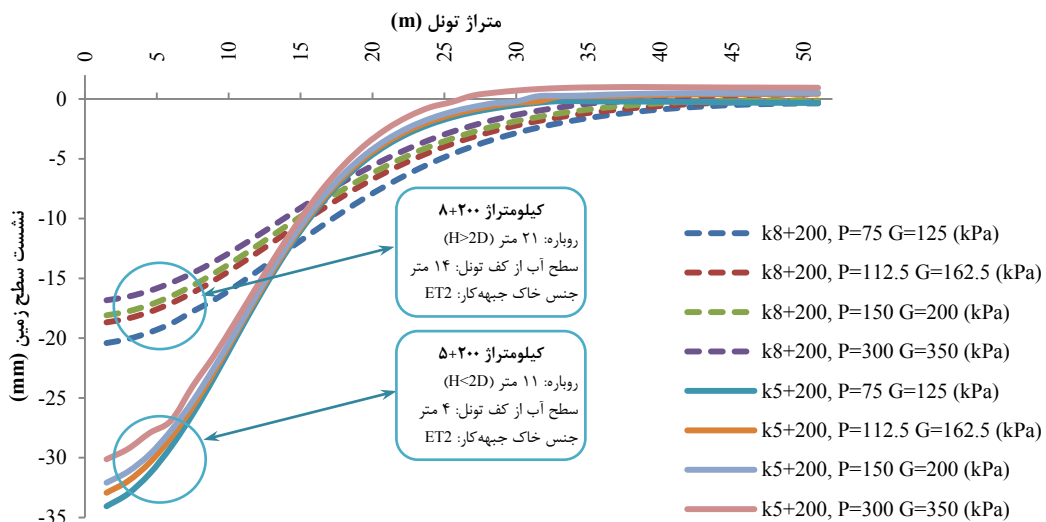


شکل ۵- فشار جبهه‌کار در برابر بیش‌ترین نشست سطح زمین در کیلومتر ۸+۲۰۰

باعث کاهش ۵ میلی‌متری بیش‌ترین نشست شده است. ولی همانند مقطع قبلی تاثیر فشار تزریق در نشست کلی قابل توجه است. نشست در دو وضعیت بدون فشار تزریق و با فشار تزریق کاملاً متفاوت و با اعمال فشار تزریق کاهش نشست زیاد است. در حالت اعمال فشار تزریق، به ازای مقادیر بیش‌تر از مقدار ۵۰ کیلوپاسکال بیش از فشار جبهه‌کار ($P+50$)، نرخ تغییرات نشست سطح زمین نسبتاً کم است. در این مقطع افزایش چند برابری فشار جبهه‌کار بدون اعمال فشار تزریق موجب بالادگی سطح زمین می‌شود. لازم به ذکر است که بیش‌ترین نشست مشاهده شده در مقطع ۸+۲۰۰ از بیش‌ترین نشست مقطع ۵+۲۰۰ بیش‌تر است. این امر به سبب کمتر بودن روباره در این مقطع رخ داده است (شکل ۶).

جدول ۵- درصد نشست سطح زمین در حالات مختلف فشار جبهه‌کار در کیلومتر ۸+۲۰۰

شرایط مدلسازی	نشست جلوی جبهه‌کار (%)	نشست در بالای سپر (%)	نشست پس از عبور سپر (%)
P و $G=0$	<40	۹۰-۴۰	۱۰۰-۹۰
P و $G=P$	<48	۹۰-۴۸	۱۰۰-۹۰
P و $G=P+50$	<50	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰
P و $G=P+100$	<50	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰
P و $G=P+200$	<50	۹۰-۵۰	۱۰۰-۹۰



شکل ۶- مقایسه‌ی تاثیر فشار جبهه‌کار در دو مقطع ۸+۲۰۰ و ۵+۲۰۰ بر پروفیل طولی نشست سطح زمین (فشار تزریق ۵۰ کیلوپاسکال بیش‌تر از فشار جبهه‌کار)

۶- نتیجه گیری

۷، با افزایش فشار جبهه کار، بیشترین نشست سطح زمین کاهش می یابد ولی این تغییرات قابل توجه نیست؛ بطوری که افزایش ۴ برابری فشار جبهه کار باعث می شود بیشترین نشست سطح زمین، حداکثر ۵ میلی متر کاهش یابد. با این وجود، فشار تزریق به طور قابل ملاحظه ای سبب کاهش نشست سطح زمین می شود. همچنین مقایسه ای حداکثر نشست محاسبه شده در مقطع ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰، نشست کمتری را در مقطع ۵+۲۰۰ نشان داده است. دلیل این امر کمتر بودن روباره در این مقطع است. لازم به ذکر است در بررسی نشست زمین علاوه بر فشار جبهه کار و فشار تزریق، پارامترهایی نظیر اختلاف قطر حفاری و سپر و شرایط هندسی نیز موثر هستند.

۷- سپاس گذاری

از آقایان مهندس صادق طریق ازلی و مهندس محسن رضایی و همچنین موسسه مهندسی مشاور ساحل به سبب همکاری در مراحل تحقیق و در اختیار قراردادن اطلاعات لازم تشکر و قدردانی می شود.

در این تحقیق تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل خط ۷ متروی تهران با مدلسازی سه بعدی اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار *PLAXIS3D Tunnel v.12* مطالعه و بررسی شده است. بدین منظور ابتدا دو مقطع کیلومتراژ ۱۰+۵۵۰ و ۱۰+۵۰۰ تونل که به تازگی حفر شده اند، انتخاب و صحت نتایج مدلسازی عددی با استفاده از نتایج ایزاربندی در بالای سطح، ارزیابی شد. سپس در دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ تونل، به ازای مقادیر مختلف فشار جبهه کار در دو حالت بدون فشار تزریق و با اعمال فشار تزریق، تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است. فشار جبهه کار در چهار حالت فشار اولیه، ۱/۵ برابر فشار اولیه، ۲ برابر فشار اولیه و ۴ برابر فشار اولیه و فشار تزریق در ۵ حالت بدون اعمال تزریق، برابر فشار جبهه کار، ۰/۵ بار بیش تر از فشار جبهه کار، ۱ بار بیش تر از فشار جبهه کار و ۲ بار بیش تر از فشار جبهه کار مدلسازی شده است. بر اساس نتایج، در هر دو مقطع کیلومتراژ ۵+۲۰۰ و ۸+۲۰۰ قطعه ی شرقی- غربی تونل خط

۸- منابع

- [1] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). *Mechanized Tunneling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control*. (V. Guglielmetti, Ed.) London: Taylor and Francis e-Library. ISBN: 978-0-203-393851-5 (eBook).
- [2] Mohkam, M., & Wong, Y. W. (1989). Three Dimensional Stability Analysis of The Tunnel Face Under Fluid Pressure. *Numerical Methods in Geomechanics* (pp. 2271-2287). Rotterdam: A. A. Balkema.
- [3] Jancsecz, S., & Steiner, W. (1994). Face Support for a Large Mix-Shield in Heterogeneous Ground Conditions. *Tunnelling '94: Seventh International Symposium Organized by the Institution of Mining and Metallurgy and the British Tunnelling Society* (pp. 531-541). London: Chapman and Hall. ISBN: 9780412598609.
- [4] Broere, W. (1998). Face Stability Calculation for a Slurry Shield in Heterogeneous Soft Soils. In Nego, & Ferreira (Ed.), *Proceedings of the World Tunnel Congress'98 on Tunnels and Metropolises* (pp. 215-218). Sao Paulo, Brazil. Taylor & Francis. ISBN: 9789054109365.
- [5] Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (1977). Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(4), 307-325.
- [6] Attewell, P. B., & Woodman, J. P. (1982). Predicting the Dynamics of Ground Settlement and its Derivatives Caused by Tunneling in Soil. *Ground Engineering*, 15(8), 13-22.

- [7] Baligh, M. (1985). Strain Path Method. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(9), 1108-1136. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:9\(1108\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:9(1108)).
- [8] Chambon, P., & Corte, J. F. (1994). Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(7), 1148-1165. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:7\(1148\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:7(1148)).
- [9] Clough, G. W., Sweeney, B. P., & Finno, R. J. (1983). Measured Soil Response to EPB Shield Tunneling. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(2), 131-149. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:2\(131\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:2(131)).
- [10] Leca, E. (1989). *Analysis of NATM and Shield Tunneling in Soft Ground*. Blacksburg: Doctoral Thesis, Virginia Institute and State University.
- [11] Hwang, R. N., & Moh, Z. C. (1996). Pore Pressures Induced in Soft Ground due to Tunneling. In R. J. Mair, & R. N. Taylor (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 695-700). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 9789054108566.
- [12] Matsushita, Y., Iwasaki, Y., Hashimoto, T., & Imanishi, H. (1994). Behavior of Subway Tunnel Driven by Large Slurry Shield. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (pp. 253-256). Rotterdam: A. A. Balkema.
- [13] Chiorboli, M. A., & Marchesili, P. P. (1996). Analysis and Control of Subsidence due to Earth Pressure Shield Tunneling in Pass ante Ferroviario of Milano. In L. Ozdemir (Ed.), *Proceedings of the International Conference on North American Tunneling'96* (pp. 97-106). Rotterdam: A. A. Balkema. ISBN: 9054108037.
- [14] Suchatvee, S. (2002). Earth Pressure Balance (EPB) Shield Tunneling in Bangkok: Ground Response and Prediction of Surface Settlements Using Artificial Neural Networks. Doctoral Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Department of Civil and Environmental Engineering. <http://hdl.handle.net/1721.1/32222>.
- [15] Crow, M., & Holzhäuser, J. (2003). Performance of Four EPB-TBMs Above and Below the Groundwater Table on the ECIS Project, Los Angeles, CA, USA. In R. A. Robinson, & J. M. Marquardt (Ed.), *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings* (pp. 905-926). New Orleans: Society for Mining, Metallurgy and Exploration. ISBN: 9780873352307.
- [16] Unlutep, A., Tellioglu, V., & Arioglu, B. (2009). Redicted and Observed Ground Deformations due to TBM Tunnel Excavations on the IZMIR Metro Project (Stage 1). In P. Kocsonya (Ed.), *ITA-AITES World Tunnel Congress: Safe Tunnelling for the City and Environment Conference Proceedings* (pp. 234-240). Budapest, Hungary: Hungarian Tunnelling Association. ISBN: 9789630672399.
- [17] Greenwood, J. D. (2003). *Three Dimension Analysis of Surface Settlement in Soft Ground Tunneling*. Master of Engineering Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Department of Civil and Environmental Engineering. <http://hdl.handle.net/1721.1/29558>.
- [18] Kasper, T., & Meschke, G. (2006). On the Influence of Face Pressure, Grouting Pressure and TBM Design in soft Ground Tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(2), 160-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.006>.

بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونلسازی مکانیزه در زمین نرم - تونل شرقی غربی خط ۷ متروی تهران: ص ۵۷ - ۶۸

[19] Lambrugh, A., Rodríguez, L. M., & Castellanza, R. (2012). Development and validation of a 3D Numerical Model for TBM-EPB Mechanized Excavations. *Computers and Geotechnics Journal*, 40, 97-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.10.004>.

[20] Nicolas, B., Branque, D., Subrin, D., Wong, H., & Humbert, E. (2012). Face Failure in Homogeneous and Stratified Soft Ground: Theoretical and Experimental Approaches on 1g EPBS Reduced Scale Model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 25-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.01.005>.

[۲۱] موسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل. (۱۳۸۹). گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک مسیر تونل خط ۷ متروی تهران، قطعه‌ی شرقی - غربی. تهران، ایران.

توسعه پایدار شهری با استفاده از فضاهای زیرسطحی - مطالعه موردی: محدوده میدان تجریش تهران

اصغر مولایی*

دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد طراحی شهری؛ دانشکده‌ی مهندسی معماری و شهرسازی؛ دانشگاه علم و صنعت ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۸/۰۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

چکیده	واژگان کلیدی
توسعه پایدار شهری با رویکرد استفاده از فضاهای زیرسطحی یکی از رهیافت‌های نوین در زمینه‌ی شهرسازی است. این رویکرد ضمن استفاده از قابلیت‌های مثبت فضاهای زیرسطحی تلاش می‌کند تا مسایل و مشکلات شهرها از قبیل کمبود فضا، مسایل حمل و نقل و زیست‌محیطی را حل نماید. هدف این مقاله، مطالعه‌ی فضاهای زیرسطحی، جنبه‌ها و فواید استفاده از این فضاها از دیدگاه توسعه پایدار شهری با روش تحقیق توصیفی- تحلیلی و بررسی موردی نمونه‌ها است. پس از طرح مساله و اهمیت آن، به تبیین مفهوم توسعه پایدار و ویژگی‌های فضاهای زیرزمینی پرداخته شده است. در مطالعه موردی، محدوده میدان تجریش تهران، با زمینه‌ها و عناصر طبیعی، تاریخی، فرهنگی و اجتماعی و همچنین مسایل متعدد در ابعاد ترافیکی، زیست‌محیطی و فضایی بررسی شده است. در این پژوهش توسعه زیرسطحی محدوده میدان تجریش به صورت ترکیبی از توسعه‌های نقطه‌ای و خطی پیشنهاد شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که توسعه فضاهای زیرزمینی با رعایت اصول پایداری می‌تواند در حل مسایل شهری بویژه در شهرهای بزرگ و مراکز متراکم آن‌ها موثر واقع شود.	طراحی شهری حیات زیرسطحی میدان تجریش تحلیل سوات (SWOT) حمل و نقل زیرزمینی سطح مداخله‌ای

۱- مقدمه

است و کشورها در جستجوی استانداردهای بهتری برای زندگی هستند. در واقع باید خوراک، انرژی و منابع معدنی بیش‌تری برای حمایت از این رشد فزاینده فراهم شود. این قضیه متأثر از سه روند عمده‌ی ذیل است:

- ۱- تبدیل زمین‌های کشاورزی به ساختارهای شهری
 - ۲- افزایش جمعیت شهرنشینی در جهان
 - ۳- گسترش نگرانی در مورد حفاظت از محیط زیست
- استفاده از فضای زیرسطحی فرصت‌هایی آرایه می‌دهد که به اصلاح و بهبود این سه روند کمک می‌نماید [۱].
- امروزه شهرهای بزرگ با مشکلات متعددی از قبیل کمبود فضا، آلودگی‌های زیست‌محیطی، مسایل ترافیکی، الزامات امنیتی و نیاز روزافزون به گسترش زیرساخت‌ها روبرو هستند. توسعه نامتوازن شهرها، بویژه در مراکز

زندگی راحت و ایمن رویای دایمی انسان است. برای تحقق این رویا، فضای مناسبی برای سکونت و کار و همچنین عملکردهای گوناگونی همچون تامین و ذخیره انرژی و حمل و نقل ضروری است. اما فضای مناسب برای تحقق این نیازها در بسیاری از مناطق جهان با مشکلاتی مانند کمبود فضا در مراکز متراکم شهری، ازدحام و شلوغی بیش از حد، آلودگی صوتی، آب و هوا و اقلیم ناسازگار روبرو است. پیشرفت‌های اخیر علمی و فنی سازندگان را قادر ساخته است تا بر موانع همیشگی در برابر ساخت و سازهای زیرزمینی غلبه نمایند. رشد گسترده‌ی تمدن بشری در مقیاس جهانی، اثر چشمگیری بر نحوه‌ی زندگی بشر داشته است. در حالی که جمعیت کره‌ی زمین در حال افزایش

* تهران؛ نارمک؛ دانشگاه علم و صنعت ایران؛ دانشکده‌ی مهندسی معماری و شهرسازی؛ گروه شهرسازی؛ کدپستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶؛ رایانامه: molaiei.2488@gmail.com

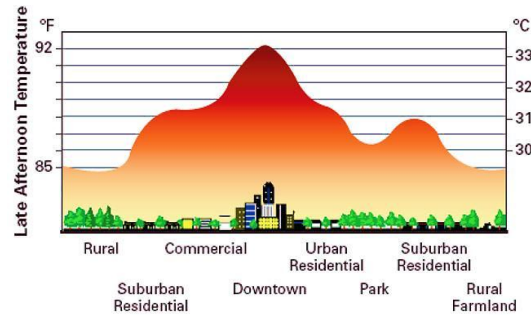
استفاده از فضاهای زیرسطحی در دوران گذشته و معاصر ویژگی‌های این فضاها از دیدگاه پایداری تحلیل شده و در پایان ضمن مطالعه‌ی موردی توسعه‌ی زیرسطحی محدوده‌ی میدان تجریش تهران، اصول و راهکارهای کلی پیشنهادی برای شرایط موجود مراکز متراکم و شلوغ شهرهای بزرگ ارائه می‌شود.

۲- توسعه پایدار شهری

یکی از مهم‌ترین رویکردهای پیش روی معماری و شهرگرایی معاصر، رویکرد پایداری و توسعه پایدار شهری است. واژه‌ی «توسعه پایدار» پس از بحران نفتی سال ۱۹۷۳ بسیار به کار رفته است. نقطه‌ی اوج بحث‌های توسعه پایدار در سال ۱۹۹۲ در کنفرانس جهانی توسعه پایدار، معروف به اجلاس زمین در شهر ریودوژانیروی برزیل بوده است که بعدها به اجلاس ریو (Rio Summit) مشهور شد. در این اجلاس قطعنامه‌های راهبردی برای توسعه پایدار کشورهای جهان صادر شد و کشورهای جهان ملزم به پیروی از این قطعنامه شدند. مهم‌ترین تعریف توسعه پایدار در همایش ریو بدین قرار است: «توسعه‌ای که نیازهای کنونی بشر را بدون به مخاطره افکندن نیازهای نسل‌های آینده برآورده ساخته و در آن به محیط زیست و نسل‌های فردا نیز توجه شود». توجه به زمینه‌های اجتماعی- فرهنگی، ویژگی‌های بومی و تجربیات گذشته و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدشونده و پرهیز از بکارگیری انرژی‌های تجدیدناپذیر از اصول توسعه پایدار هستند [۴].

سازمان ملل نیز در گزارشی با نام آینده‌ی مشترکمان توسعه پایدار را این‌چنین تعریف می‌نماید: «گسترش و ترویج فعالیت‌هایی که نیازهای امروزی بشر را تامین کند بی‌آنکه قابلیت‌ها و توانایی‌های طبیعت را برای نسل‌های آینده با مشکل مواجه نماید» [۵]. به عقیده‌ی بزعم لمن (Leman)، قرن بیست و یکم با بحث جدال‌برانگیز توسعه پایدار بویژه توسعه پایدار شهری مواجه خواهد بود. وی شهرها را موتور و مرکز توسعه‌ی جوامع می‌نامد. بیش‌ترین تخریب‌های زیست‌محیطی در شهرها اتفاق می‌افتد و از سوی دیگر، موثرترین راه‌های ارتقای زیست‌محیطی می‌تواند در شهرها به اجرا در آید. بانک جهانی نیز چنین اظهار می‌دارد: «بدون حفاظت مناسب و کافی از محیط زیست،

آن‌ها، دمای فضاهای شهری را تغییر داده و آسایش اقلیمی و پایداری را در مراکز شهرها تضعیف نموده است. شکل ۱، جزیره‌ی گرمایی در مرکز شهر و میزان دمای مناطق مختلف را در شهرهای بزرگ نمایش می‌دهد. در حرکت از حومه‌ها به سمت مرکز شهر دمای هوا و در نتیجه میزان مصرف انرژی برای تولید سرمایش بیش‌تر می‌شود.



شکل ۱- مقطع شماتیک جزیره‌ی گرمایی در شهر [2]

در کنار این مسایل، تجارب انسان در دوره‌های گذشته و معاصر و قابلیت‌های بومی و محیطی نیز قابل توجه است. از جمله‌ی این تجارب، استفاده از عمق زمین و فضاهای زیرزمینی در بناهای خصوصی و عمومی ایران و جهان است. در کشورهای دیگر مانند کشورهای آمریکای شمالی، کشورهای اروپایی نظیر نروژ، سوئد، فنلاند و کشورهای آسیای شرقی بویژه ژاپن و چین در دوران گذشته و معاصر، استفاده‌های وسیعی از فضاهای زیرسطحی شده است. فضاهای زیرزمینی مزایای قابل توجهی نسبت به فضاهای سطحی دارند. حفاظت در برابر شرایط نامطلوب اقلیمی مانند بارش‌های جوی، طوفان و تابش شدید آفتاب از مهم‌ترین نکات مثبت ساختمان‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند [۳].

با چنین باوری این مقاله تلاش می‌کند تا با تبیین مفهوم فضاهای زیرزمینی، ابعاد مختلف این فضاها و نقش و جایگاه آن را در توسعه پایدار شهری بویژه در رابطه با مصرف انرژی بررسی نماید. بنابراین با طرح این مساله، سوال اصلی تحقیق عبارت است از: مفهوم فضای زیرزمینی و توسعه‌ی زیرسطحی چیست و روابط آن با رویکرد توسعه پایدار کدام است؟ در این مقاله ابتدا به بررسی مفهوم توسعه پایدار، مفهوم فضای زیرسطحی، تاریخچه و انواع آن پرداخته می‌شود. سپس ضمن تجزیه و تحلیل فلسفه‌ی

توسعه به نتیجه نخواهد رسید و بدون توسعه، حفاظت از محیط زیست با شکست مواجه خواهد شد». توسعه‌ی پایدار دارای ابعاد و سطوح مختلفی به شرح ذیل است:

- ۱- اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و ...
- ۲- زیست‌محیطی
- ۳- بین‌المللی، ملی، محلی و ...

در این رابطه، شهر پایدار شهری است که در آن بهبود در عدالت اجتماعی، تنوع و امکان زندگی با کیفیت مطلوب تحقق یابد. فرم پایدار شهری نیز فرمی است که در آن منابع کمتری از جمله انرژی مصرف شود، شبکه‌های شهری کارا و رقابتی بوده و قابلیت بالا برای زندگی انسان را دارا باشد [۶]. توسعه بر مبنای کارایی انرژی (*Energy-Efficient Development*)، رویکردی با هدف ارتقای اقتصادی، زیست‌محیطی و بهداشت عمومی جامعه از راه بکارگیری بهینه‌ی منابع انرژی و الگوهای جدید توسعه بر مبنای بازدهی انرژی در جامعه است. این رویکرد پنج دستورالعمل را در این راستا توصیه می‌نماید:

- ۱- مصرف پایدار منابع انرژی
- ۲- فرم و عملکرد بافت بوم‌شناختی
- ۳- مدیریت منابع مبتنی بر اجتماع محلی
- ۴- کاربری بهینه‌ی زمین
- ۵- عدالت اجتماعی و رونق اقتصادی

این پنج اصل بر روی هم مفهوم واحدی را از طراحی مبتنی بر بازدهی انرژی بیان می‌کنند. برنامه‌ریزی و طراحی باید تا بیش‌ترین حدی که ممکن است، پیروی از طبیعت و بکارگیری سامانه‌های طبیعی همچون باد، جریان آب و نور خورشید را در نظر گیرد. طراحی راهبردی و موفق، با این سامانه‌های طبیعی می‌تواند از مصرف انرژی متاثر از سامانه‌های مصنوعی به میزان بسیار زیادی بکاهد [۷].

۳- تعاریف پایه

فضای زیرزمینی در کشورهای مختلف با تعاریف گسترده‌ای به کار رفته است که در زیر به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود:

۳-۱- فضای زیرزمینی

در توصیف، فضایی است که از گذشته‌های دور تا دوران معاصر با اهداف گوناگون اقلیمی، امنیتی، اقتصادی و حفاظتی بکار برده شده است؛ به طوری‌که تمام یا قسمتی از

آن در زیر زمین و در تراز پایین‌تر از همکف قرار گیرد [۸].

۳-۲- فضاهای زیرسطحی

فضای زیرسطحی به فضاهای شهری همگانی اطلاق می‌شود که در ترازهای پایین‌تر زمین طراحی و ساخته می‌شود. چنین فضایی باید دارای کیفیت‌های فضاهای شهری یعنی هویت و خوانایی، پایداری و سرزندگی، ایمنی و امنیت، کارایی و تنوع، پیاده‌مداری و سهولت دسترسی، پیوستگی و یکپارچگی و تناسبات بصری باشد [۸].

۴- طبقه‌بندی فضاهای زیرزمینی

استرلینگ در سال ۱۹۹۳، فضاهای زیرزمینی را بر مبنای اصول زیر طبقه‌بندی می‌کند [۱].

- ۱- عملکردی (مسکونی، غیرمسکونی، زیرساختی و نظامی)
 - ۲- هندسی (نوع فضا، میزان گشودگی‌ها، ارتباط با سطح عمق، ابعاد و مقیاس پروژه)
 - ۳- مبدا (طبیعی، معدنی، بکاربری مجدد پس از اتمام کاربری قبلی)
 - ۴- خصوصیات سایت (جغرافیا، اقلیم، کاربری زمین، شرایط زمین و ارتباطات ساختمان)
 - ۵- ویژگی‌های پروژه (منطق پروژه، طراحی و ساخت)
- گیدئون گولانی (*Gideon Golany*) فضاهای زیرزمینی را در پنج دسته طبقه‌بندی می‌کند [۹].

• *Earth-Sheltered Habitat*

این نوع فضا، به نوعی مسکن در ایالات متحده اطلاق می‌شود که روی سطح زمین بوده و با لایه‌ای به ضخامت نیم متر خاک حفاظت می‌شود. این روش پاسخی به مصرف بالای انرژی برای سرمایش و گرمایش بخصوص در اقلیم‌های ناسازگار است (جدول ۱-الف و ب).

• *Semi Belowground*

نوعی مسکن زیرزمینی است که قسمتی از آن در زیرزمین و قسمتی از آن روی سطح زمین قرار گرفته است. این نوع مسکن معمولی‌ترین نمونه‌ی به کار رفته در روستاهای چین، ژاپن، جنوب تونس و کلبه‌های زمستانی اسکیموها و سایر مناطق است. این فرم هنوز هم در روستاهای آفریقایی استفاده می‌شود (جدول ۱-پ، ت و ث).

• *Subsurface House*

این نوع خانه‌ها با الگوی حیاط مرکزی، دارای عمق کمی بین سقف خانه تا سطح زمین (در حدود نیم متر) بوده و در

ژاپنی‌ها برای فضاهایی به کار می‌رود که کاملاً در عمق زمین قرار گرفته‌اند. این فضاها دارای کاربردهای متنوع مانند تجاری و حمل و نقل هستند (جدول ۱-د و ذ).

علاوه بر این موارد، زیر زمین به عنوان منبع فضا برای ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری، مصالح حفاری شده، آب و انرژی‌های زیرزمینی نیز می‌تواند محسوب شود (شکل ۲) و [10]. در مجموع یک فضای زیرزمینی از دیده‌ها پنهان است و توانایی پنهان کردن پدیده‌ها را دارد. به طور کلی ویژگی‌ها و قابلیت‌های مهم فضاهای زیرزمینی در جدول ۲ آورده شده است [11].

زمان‌های گذشته توسط رومی‌ها در شهرهای مستعمره‌ای در شمال تونس استفاده می‌شده است (جدول ۱-ج).

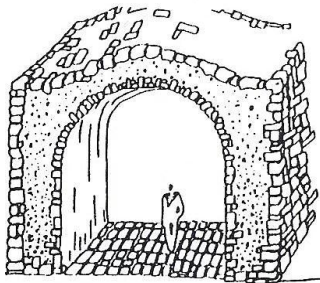
• *Below Ground*

این نوع فضا، معمول‌ترین فرم فضای زیرزمینی استفاده شده در سراسر تاریخ بوده است. عمق این فضاها معقول و مناسب بوده (در حدود ۳ متر از سقف تا سطح زمین) و به این دلیل فضای زیرزمینی، به روش *cut-and-use* خلق می‌شده است. در این روش، نیازی به استفاده از مصالح ساختمانی نیست (جدول ۱-ج، ح و خ).

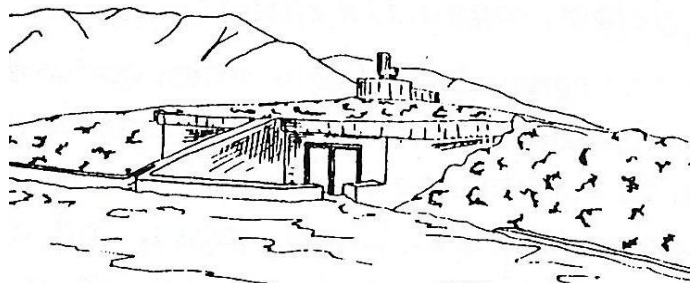
• *Geo-Space*

عنوانی برای فضاهای زیرزمینی معاصر است که توسط

جدول ۱- طبقه‌بندی فضاهای زیرزمینی از دیدگاه گیدئون گولانی [9]

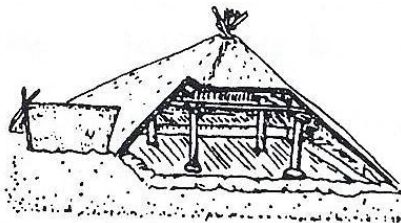


ب- مسکن بومیان اورشلیم

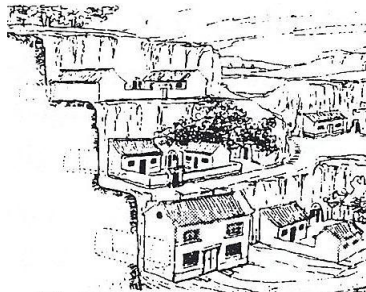


الف- مسکن قرار گرفته در دل زمین

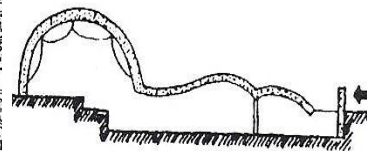
Earth-Sheltered Habitat



ث- مسکن نئولیتیک (چین و ژاپن)

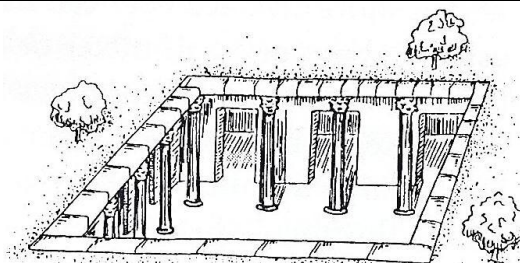


ت- مسکن پله‌ای مدیترانه‌ای



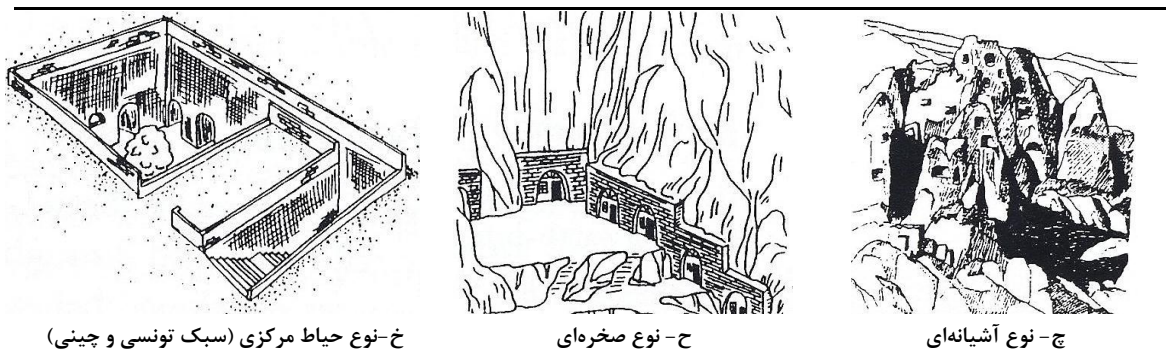
پ- کلبه (اسکیمویی)

Semi Belowground



ج- ویلای تابستانی رومی‌ها

Subsurface House

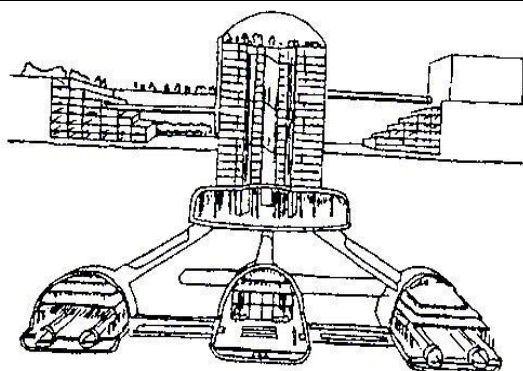


خ- نوع حیاط مرکزی (سبک تونس و چینی)

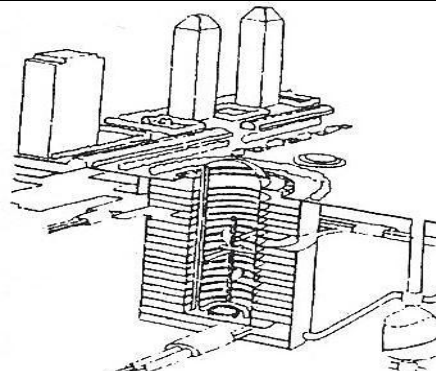
ح- نوع صخره‌ای

چ- نوع آشیانه‌ای

Below Ground



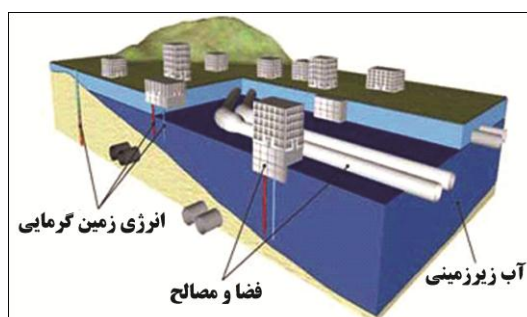
ذ- زیرساخت‌ها: حمل و نقل زیرزمینی و خطوط مترو



د- مراکز خرید و سکونت زیرزمینی

Geo-Space

زیستی زیرزمینی هستند. کلیساها و محل‌های دفن شهدای دوران صدر مسیحیت در اروپا، روستاهای زیرزمینی شمال چین و سیلوهای زیرزمینی چین و تونس موارد ارزشمند دیگری هستند. در ایران، فضاهای معماری مانند گودال باغچه‌ها در شهرهای کویری، شوادان در شهرهای گرم و مرطوب مانند شوش و دزفول، کاریزها و آب‌انبارها از نمونه‌های برجسته به شمار می‌آیند (جدول ۳) و [۸].



شکل ۲- منابع مهم زیرزمین: آب، فضا، مصالح و انرژی [10]

جدول ۲- قابلیت‌های ذاتی فضاهای زیرزمینی [۸]

- ۱ محلی برای پنهان شدن، پنهان کردن و اختفا
- ۲ منبع فضا برای جایدهی اجسام یا کاربری‌های مورد نیاز
- ۳ حفاظت (انسان و دارایی‌هایش، نگهداری مواد و غذا)
- ۴ منبع مواد و مصالح (استخراج و نگهداری منابع)
- ۵ منبع انرژی زمین گرمایی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- ۶ منبع آب زیرزمینی (نگهداری، انتقال و استخراج)
- ۷ ثبات دمایی و تعادل محیطی
- ۸ پایداری فیزیکی و کالبدی (در برابر زلزله، ارتعاش و طوفان)

۵- سوابق فضاهای زیرسطحی در دوران گذشته

فضاهای زیرسطحی در دوران گذشته، عمدتاً به دلایل اقلیمی و امنیتی مورد استفاده قرار می‌گرفته است. شهرها و روستاهایی که تمام یا در صدی از آن‌ها در زیرزمین یا زیر صخره‌ها قرار دارند مانند شهرهای زیرزمینی کاپادوکیای ترکیه و اوبی نوش‌آباد کاشان، نمونه‌های از این مجتمع‌های

جدول ۳- انواع فضاهای زیرزمینی در دوره‌های گذشته‌ی ایران و جهان [۸]

<p>الف- شهر زیرزمینی کایماکلی، کاپادوکیای ترکیه</p>	<p>ب- مقبره‌های دخمه‌ای صدر مسیحیت</p>
<p>ب- روستاهای زیرزمینی چین</p>	<p>ت- شهر زیرزمینی اویبی، نوش‌آباد کاشان</p>
<p>ج- آب‌انبارهای ایرانی</p>	<p>ث- شوادان: خانه‌های زیرزمینی دزفول</p>

دگرگونی شهرها شدند. افزایش ارتفاع ساختمان‌ها، اغلب افزایش عمق آن‌ها را در پی داشته و توسعه‌ی حمل و نقل بویژه از نوع ریلی با ساخت ایستگاه‌های زیرزمینی و تونل‌ها همراه بوده است. بطور کلی دلایل توسعه‌ی زیرزمینی در دوره‌ی معاصر به شرح زیر است:

- ۱- ایجاد محیطی امن در شرایط نامساعد اقلیمی
- ۲- توسعه یا حل مسایل حمل و نقل شهری

۶- توسعه‌ی فضاهای زیرسطحی شهری در دوران معاصر

از انقلاب صنعتی به بعد، با ظهور فناوری‌ها و پیشرفت‌های فنی امکان غلبه بر طبیعت روز به روز بیش‌تر شده است. ازدیاد جمعیت، رشد بی‌رویه‌ی شهرها، احداث ساختمان‌های بلند، گسترش شبکه‌های حمل و نقل، نیاز به ارتباطات و حمل و نقل سریع‌السیر و سایر تحولات صنعتی، زمینه‌ساز

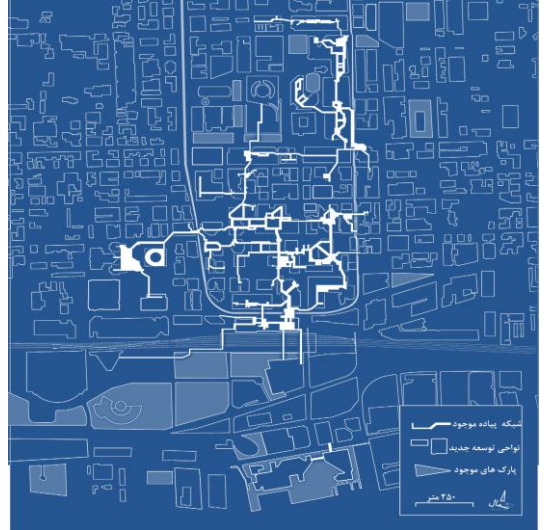
توسعه‌ی زیرسطحی شهری در این پژوهش، به مفهوم بهره‌گیری از قابلیت‌های ترازهای زیرین زمین برای تامین نیازها و پاسخ به تقاضاهایی یک شهر مدرن و مراکز آن است (جدول ۴) و [۸].

- ۳- کمک به پایداری محیط زیست
- ۴- افزایش بهره‌وری از ارزش اقتصادی زمین
- ۵- تامین نیازهای فضایی و عملکردی
- ۶- ایجاد محیطی ایمن در سوانح و مواقع بحرانی

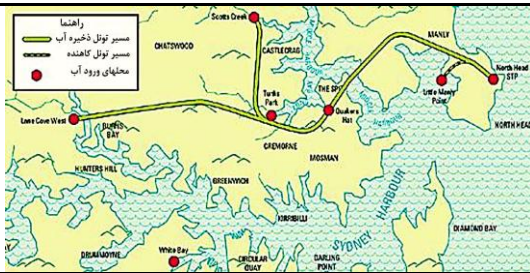
جدول ۴- انواع فضاهای زیرسطحی در دوره‌ی معاصر [۸]



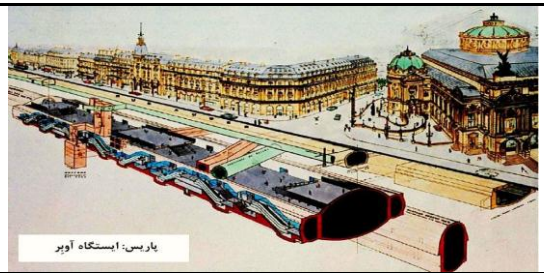
ب- مجموعه‌ی زیرزمینی شنای ایناکسکوس، هلسینکی



الف- شبکه‌ی زیرسطحی تورنتو



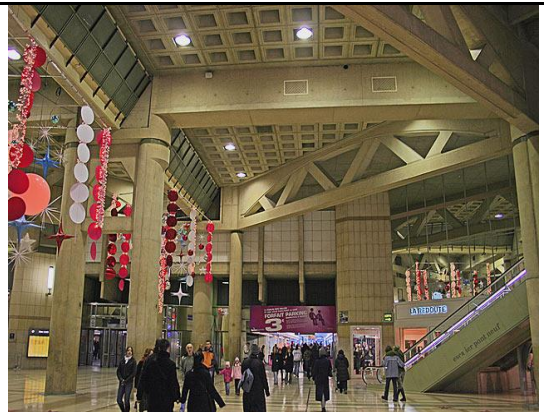
ت- تونل کنترل سیلاب نورث‌ساید، سیدنی



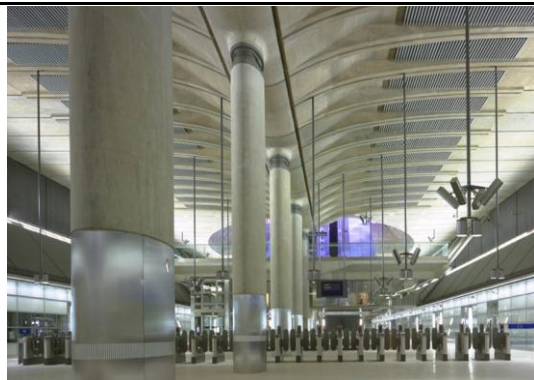
پ- ایستگاه آوبر: شبکه‌ی قطارهای سریع‌السیر منطقه‌ای R.E.R.



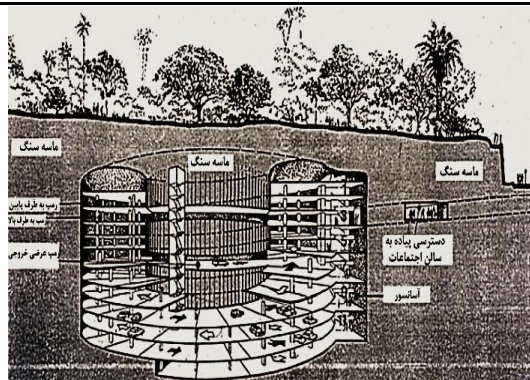
ج- تونل تراموای زیرزمینی هاگ، هلند



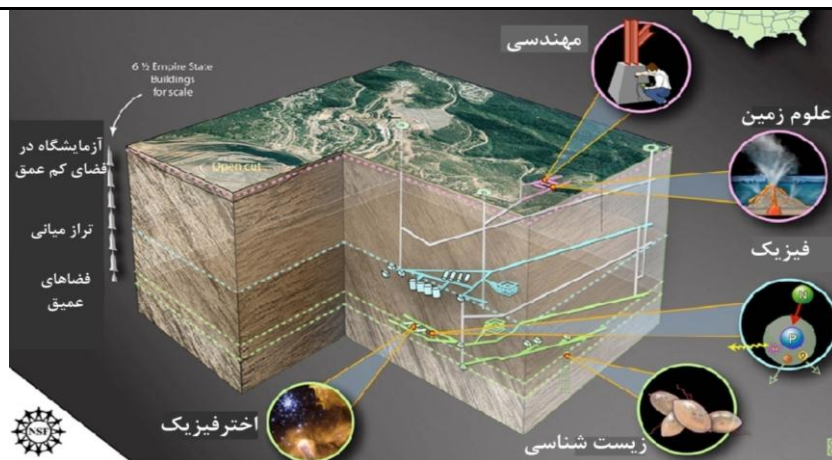
ث- مجموعه‌ی تجاری لس‌هالس، پاریس



ح- ایستگاه مترو کاناری وارف، لندن



چ- پارکینگ زیرزمینی اپرای سیدنی



خ- آزمایشگاه علوم و مهندسی زیرزمینی (DUSEL)، آمریکا

پایین‌تر، محیط حرارتی متعادل و باثباتی را در مقایسه با حداکثر اختلاف درجه حرارت سطح نشان می‌دهد. دمای متعادل و باثبات زیرزمین- با نوسانات اندک دمایی- زمینی مناسبی برای حفظ انرژی و ذخیره‌ی آن فراهم می‌نماید. میزان انرژی ذخیره شده به حجم فضای زیرزمینی، عمق فضا، فرم فضا، چگونگی ارتباط با بیرون و ویژگی‌های زمین‌شناسی بستگی دارد [12]. به بیان دیگر، جرم حرارتی زمین، سیکل نوسانات درجه حرارت سالانه را تعدیل می‌کند و به تاخیر می‌اندازد [۳].

در فضای زیرزمینی، در زمستان با کاهش جریان هوای خارج، کاهش نفوذ هوا و کاهش جریان هدایتی گرما از اتلاف حرارت جلوگیری می‌شود. این فضاها در تابستان نیز با کاهش جریان هدایت گرما، کاهش نفوذ هوا و کاهش جذب حرارت از خورشید و استفاده از برودت زمین به تعادل دمایی و آسایش اقلیمی کمک می‌نماید [۳].

۷- ویژگی‌های فضاهای زیرزمینی از دیدگاه توسعه‌ی پایدار

فضاهای زیرسطحی محاسن و مزایای قابل توجهی در ابعاد گوناگون دارند. در ادامه به مهم‌ترین این مزایا اشاره می‌شود.

۷-۱- سلامتی

فضاهای زیرزمینی با تامین دمای محیطی مطلوب نقش مثبتی در ارتقا آرامش و سرزندگی روحی و کاهش اضطراب ایفا می‌نمایند. این فضاها با جدا بودن از فضای بیرونی، آسفتگی و اغتشاش بصری و شنوایی را به حداقل می‌رسانند. بر اساس تحقیقات دانشگاه مینه‌سوتا (Minnesota) دوره‌ی بهبود بعد از عمل جراحی در فضاهای زیرزمینی تا حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد [9].

۷-۲- آب و هوا

در اکثر مناطق جهان، دمای خاک و سنگ در اعماق

نمونه‌ی دوم، ساختمان دفتر مرکزی شرکت *Pre-mix* در ناحیه‌ی اسپوکان واشنگتن است. این شرکت از زیرزمین، برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی به خوبی استفاده نموده است. در این ناحیه، دمای هوای بطور میانگین بین ۲۳ تا ۴۸ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر است؛ درحالی‌که در فضاهای زیرزمینی این ساختمان، دمای هوا بدون بکارگیری سامانه‌های سرمایشی و گرمایشی در بازه‌ی ۵ تا ۱۶ درجه‌ی سانتی‌گراد متغیر است. مصرف انرژی در این مجموعه‌ی زیرزمینی به میزان ۵۰ درصد کمتر از ساختمان‌های روزمینی با ابعاد و عملکرد مشابه است (شکل ۴) و [13].



شکل ۴- ساختمان دفتر مرکزی شرکت *Pre-Mix* [13]

نمونه‌ی سوم، ساختمان جدید تحقیقات حقوقی دانشگاه میشیگان است. این ساختمان به دلیل واقع شدن در حریم محدوده‌ی تاریخی (مربوط به دوره‌ی گوتیک) و حفظ زیبایی سایت در زیرزمین ساخته شده است. در این فضاها مصرف انرژی، تفاوت چندانی نسبت به شرایط مشابه سطح زمین ندارد. این امر می‌تواند بدلیل کاربرد مصالح شیشه‌ای و لعابی فراوان در سطوح داخلی فضاها باشد (شکل ۵) و [13].

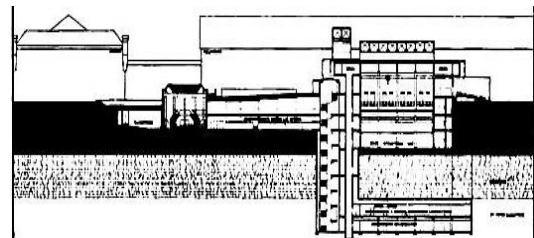


شکل ۵- ساختمان تحقیقات حقوق دانشگاه میشیگان [13]

در اقلیم‌های سرد، دفع حرارت از جدار بیرونی ساختمان به علت مجاورت با هوای سرد کاهش می‌یابد. در اقلیم‌های گرم، از جذب حرارت در جدار بیرونی ساختمان به علت تابش مستقیم خورشید و همچنین مجاورت با هوای داغ جلوگیری می‌شود. همچنین به علت تماس با خاک، امکان خنک شدن نیز فراهم می‌شود. به بیان دیگر، نیاز به گرمایش و سرمایش مصنوعی در فصول سرد و گرم به علت ثبات حرارتی در این بناها بسیار کاهش می‌یابد [۳].

نتایج مشابهی نیز در تحقیق بر روی فضاهای زیرزمینی معاصر بدست آمده است. بر اساس تحقیق انجام شده در مراکز تجاری زیرزمینی توکیو، دمای این فضاها در تابستان خنک‌تر و در زمستان گرم‌تر از بیرون است [9]. به عبارت دیگر شرایط اقلیمی در مراکز تجاری زیرزمینی ژاپنی نیز مانند نمونه‌های شوادان در ایران، به محدوده‌ی آسایش انسان نزدیک‌تر است. فضاهای زیرزمینی به دلیل ایزوله بودن، شرایط مناسبی و راحتی را در مقایسه با آب و هوای ناسازگار و نامطلوب بیرونی ایجاد کرده و تاثیر باد را به طور محسوسی می‌کاهد.

میشل بارکر (*Michael B. Barker*)، در تحقیقی درباره‌ی مصرف انرژی بر روی چهار ساختمان مهم زیرزمینی در ایالات متحده‌ی آمریکا به نتایج مهمی دست یافته است. نمونه‌ی اول، ساختمان دانشکده‌ی مهندسی عمران و معدن دانشگاه مینه‌سوتا است. این دانشکده در شهری با آب و هوای بسیار سرد احداث و در حدود ۹۵ درصد از حجم آن در زیرزمین واقع شده است. این مجموعه‌ی زیرزمینی با طراحی مناسب از نظر نورگیری و سطوح زیرزمینی، تقریباً به میزان یک‌سوم کمتر از ساختمان‌های مشابه سطحی، انرژی مصرف می‌کند. همچنین علاوه بر تامین فضای باز و سبز در سطح زمین، محیطی ایمن، مهیج و بی‌نظیری را برای دانشجویان و استادان فراهم می‌نماید (شکل ۳) و [13].



شکل ۳- دانشکده‌ی معدن دانشگاه مینه‌سوتا [13]

از بیشیه و کمینه‌ی دمای خارج بالاتر، پایدارتر و به محدوده‌ی آسایش حرارتی انسان نزدیک‌تر است [۱۴].

۷-۳- شرایط نامساعد جوی

سازه‌های زیرزمینی در برابر گردبادها، تندبادها، توفان، صاعقه، تگرگ، و اکثر پدیده‌های طبیعی دیگر پایدار هستند. طراحی ساختمان‌ها در زیرزمین پاسخگوی بسیاری از نیازها و مشکلات مربوط به آب و هوا از قبیل پایداری در مقابل اثر رطوبت بر مواد و مصالح است [9].

۷-۴- آتش‌سوزی

ساختمان‌های زیرسطحی به طور بالقوه در برابر آتش‌سوزی بیرونی محافظت می‌شوند. سطح زمین غیر قابل اشتعال بوده و عایقی بسیار مطلوب برای سازه‌ی زیرین خود محسوب می‌شود.

۷-۵- زلزله

به علت تشدید حرکات زمین در سطح، سازه‌های زیرسطحی نسبت به سازه‌های روزمینی تاثیرپذیری کمتری از زمین‌لرزه دارند و مقاوم‌تر هستند. به عنوان نمونه، فضا‌های زیرسطحی در زمین‌لرزه‌های اخیر کوبا، سانفرانسیسکو و مکزیکوسیتی سالم مانده‌اند [11].

۷-۶- ایمنی

فضاهای زیرزمینی در برابر آلودگی‌های صوتی، ارتعاش و نشت مواد رادیواکتیو ایمن هستند. مقدار کوچکی از لایه‌ی سطحی زمین مانعی بسیار موثر در پیشگیری از نفوذ سر و صدای فرودگاه‌ها و بزرگراه‌ها به داخل بنا‌های زیرزمینی است. میزان لرزش و ارتعاش ناشی از ترافیک جاده‌ها و بزرگراه‌ها، قطارها، ماشین‌آلات صنعتی و ساختمانی با افزایش عمق و فاصله با منبع آن به سرعت محو می‌شود. بسیاری از مواد رادیواکتیویته نیز که بر اثر انفجار بمب اتمی در هوا انتشار می‌یابند، با چند اینچ بتن، فولاد یا خاک جذب می‌شوند [11].

فضای زیرسطحی، در مهار عواقب ناشی از پدیده‌ی تغییر اقلیم نیز می‌تواند به کار گرفته شود. به عنوان نمونه در کشورهای آسیای شرقی تغییرات آب و هوایی شدید، سبب افزایش تناوب وقوع سیلاب‌ها و بالا آمدن سطح آب دریا می‌شود. بنابراین بکارگیری تاسیسات زیرسطحی در مناطق در معرض سیلاب می‌تواند بسیار مفید باشد. تونل کوالالامپور (SMART: Stormwater Management &)

نمونه‌ی چهارم، مدرسه‌ی ابتدایی جفرسون در واشنگتن است. این مدرسه در مجاورت محدوده‌ی مهم تاریخی و زیبای والاولا (Valavala) قرار دارد و با هدف حفظ حریم تاریخی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در زیرزمین طراحی و ساخته شده است. تمامی جداره‌ها و بام این مجموعه با عایقی از جنس طبیعی پوشیده شده است. حدود ۴۰ درصد از کل انرژی مورد نیاز این بنا برای تامین روشنایی مصنوعی مصرف می‌شود. قسمت‌های شیشه‌ای در سمت جنوبی این مجموعه در زمستان برای تامین گرما و روشنایی استفاده و در تابستان برای صرفه‌جویی ۳۰ درصدی در انرژی سرمایشی پوشانده می‌شود. بطور کلی این مجموعه، نسبت به ساختمان‌های مشابه روزمینی به ۷۰ درصد انرژی نیاز دارد. در حدود ۵۵ درصد انرژی مصرفی این ساختمان برای گرمایش و تهویه مطبوع، ۳۵ درصد برای روشنایی و ۱۰ درصد برای سایر موارد مانند تولید آب گرم بکار برده می‌شود [13].

در برخی کشورها فضا‌های زیرزمینی برای کشاورزی صنعتی، دفن زباله، انبار مواد غذایی، تاسیسات اداری و امنیتی، کاربریهای فرهنگی- ورزشی و به طور کلی برای زیرساخت‌های شهری با کارایی مناسب در اقلیم‌های ناسازگار بکار می‌رود [13]. به عنوان نمونه، سامانه‌ی ذخیره‌ی انرژی زمین‌گرمایی در استکهلم، ۶۵ درصد صرفه‌جویی انرژی معادل ۵۵۰۰۰ دلار صرفه‌ی اقتصادی در سال را برای این شهر به همراه دارد [۸].

در نمونه‌های ایرانی نیز این امر قابل ملاحظه است. شوادان یک بنای زیرزمینی در ساختمان‌های سنتی دزفول است. شوادان با حفاری در دل زمین سخت در تابستان برای استراحت روزانه، نگهداری مواد خوراکی و نیازهای برودتی استفاده می‌شود. خنکای شوادان با دمایی در حدود ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در حالی که دمای خیابان‌های اطراف به ۵۴ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد، بسیار شگفت‌آور است. مقایسه‌ی دمای داخل و خارج شوادان در تابستان در چندین نمونه از آن، وجود نوسانات کم دما را نشان می‌دهد. همچنین دمای شوادان در تابستان علاوه بر دمای بیشینه، از دمای کمینه‌ی خارج نیز خنک‌تر است. نکته‌ی جالب توجه پایداری و ثبات دمایی شوادان است. نوسان دمای روزانه‌ی شوادان کمتر از نیم‌درجه است. در زمستان نیز دمای شوادان



شکل ۶- تونل کوالامپور [۸]

Road Tunnel با کاربری مهار سیلاب‌های شهری از نمونه‌های موفق در این زمینه است (شکل ۶) و [۸].

۷-۷- توسعه‌ی زیرسطحی شهری و افزایش فضاهای سبز و حفاظت از محیط زیست

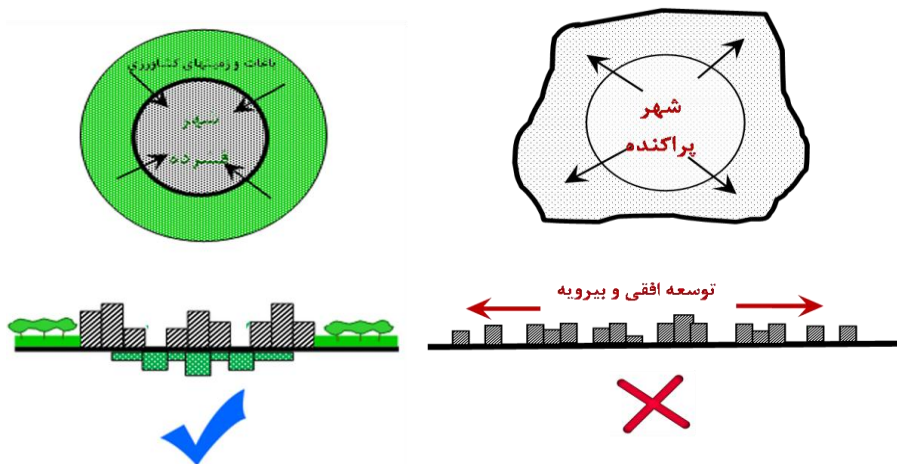
بکارگیری فضاهای زیرزمینی تاثیر بر طبیعت را به حداقل رسانده و با انتقال توقفگاه‌ها و انباری‌ها به زیرزمین و آزاد نمودن فضاهای سطحی برای ایجاد پارک‌ها و فضاهای سبز، محیطی آرامش‌بخش و خوشایند را به دور از آلودگی‌های جوی، صوتی و بصری را به ارمغان می‌آورد. وجود شبکه‌ی عابر پیاده‌ی ایمن، وسیع و مجزا از سواره با کاربری‌های متنوع مانند نمونه‌های موجود در تورنتو و مونترال از دیگر امتیازات فضاهای زیرزمینی به نفع انسان و محیط زیست است [9].

با توسعه‌ی زیرسطحی و انتقال بخشی از فعالیت‌ها و کاربری‌ها از جمله حمل و نقل سواره و ریلی به زیرزمین می‌توان تا حدودی به رفع آلودگی‌های زیست‌محیطی، بصری و صوتی کمک نمود. برای نمونه می‌توان از تونل بیگ‌دیگ در بوستن آمریکا نام برد. این تونل با هدف حل مسایل ترافیکی و زیست‌محیطی احداث شده است. در نتیجه بیش از ۱۵۰ ایکر پارک و فضای سبز جدید برای شهر ایجاد شده و کاهش ۱۲ درصدی لایه‌های مونواکسیدکربن را به دنبال داشته است [۸]. پارکینگ زیرزمینی ویل کلرادو نیز نمونه‌ی موفق دیگری در این زمینه است. در زمین بالای پارکینگ، کاشت برخی گونه‌های گیاهی مجاز است [15].

۷-۸- فضاهای زیرزمینی و حل مشکلات فضایی

توسعه‌ی زیرسطحی می‌تواند به فشردگی شهر کمک نماید. شهر فشردگی با کوتاه کردن فاصله‌ی سفرهای شخصی، کاهش مصرف و اتلاف زمین، افزایش امکان‌پذیری بکارگیری سامانه‌های حمل و نقل همگانی و تاسیسات حرارتی و برقی مشترک، آسیب کمتری به محیط می‌رساند [۱۶]. به عبارت دیگر میان پایداری شهر و تراکم آن رابطه‌ی معناداری برقرار است. بنابراین توسعه‌ی سطوح زیرین شهر گزینه‌ی برای پایداری محیط زیست و شهر است (شکل ۷).

علاوه بر نقاط قوت ذکر شده، فضاهای زیرزمینی نقاط ضعفی نیز دارند که باید در فرآیند برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای زیرسطحی به آن‌ها توجه و برای رفع آن‌ها تلاش شود. بطور کلی می‌توان نقاط قوت و ضعف فضاهای زیرسطحی را با رویکرد توسعه‌ی پایدار مطابق جدول ۵ خلاصه نمود.



شکل ۷- مقایسه‌ی شهر پراکنده و شهر فشرده [۸]

جدول ۵- بررسی مزایا و کاستی‌های فضاهای زیرسطحی شهری [۸]

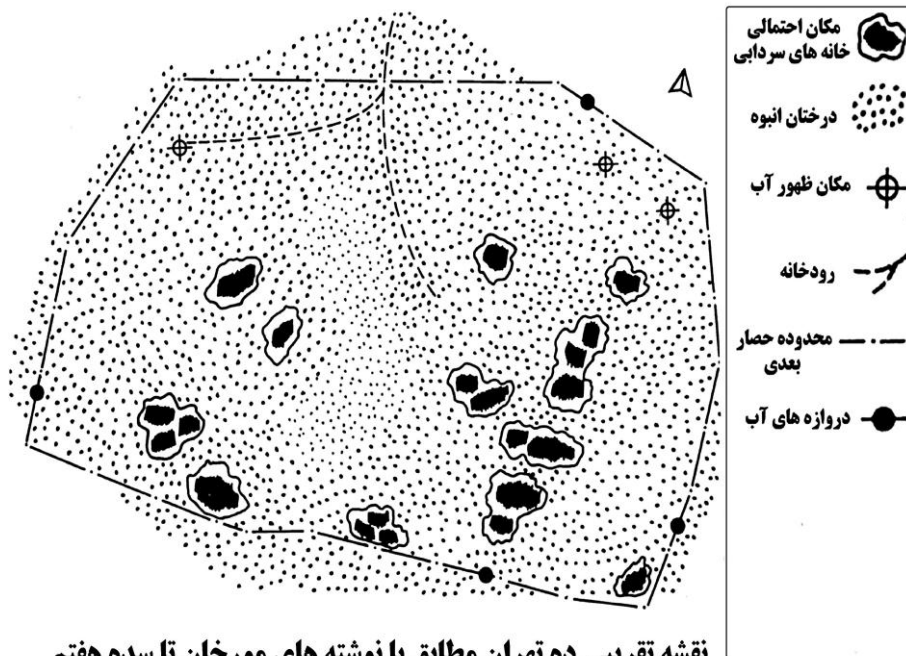
کاستی‌ها	مزایا
<ul style="list-style-type: none"> • تضعیف هویت و خوانایی در بافت‌های تاریخی، از بین بردن عناصر هویتی یا پی‌ان‌ها در زیرزمین • آسیب‌پذیری در برخی پدیده‌های تغییر اقلیم مانند سیل‌گیری در سیلاب‌های شهری • ایجاد مسیرها و گره‌های غیر پیاده‌مدار • ایجاد محیط‌های ناامن، مبهم و جرم‌خیز، اثرات نامطلوب روحی و روانی، آبگیری (سیل‌گیری)، کارایی ضعیف در مواقع آتش‌سوزی، ریزش لایه‌های سست و ناپایدار، تهویه‌ی نامناسب، وقوع فعالیت‌های جاسوسی، ماجراجویانه و عملیات تروریستی • انسداد بصری و محروم ماندن از درک جذابیت‌های بصری در فضاهای زیرسطحی • ایجاد فضاهای ناکارآمد از نظر دسترسی، تهویه و تردد و امکان از کارافتادن سامانه‌های تهویه و روشنایی • ایجاد محیط‌های مجزا، بسته، محصور و جزیره‌ای • ایجاد فضاهایی با مقیاس غیر انسانی و ابعاد و اندازه‌های مرعوب‌کننده • تضییع حقوق افراد و مالکان در توسعه‌ی فضاهای زیرسطحی • دشواری استفاده برای معلولان، کودکان و سالخوردگان 	<ul style="list-style-type: none"> • ارتقای هویت و خوانایی فضاهای شهری از راه بهبود کیفیت‌های محیطی • کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، تامین آسایش اقلیمی، کاهش مصرف انرژی و جایدگی عناصر نامطلوب محیطی • افزایش بهره‌وری اقتصادی زمین • افزایش تنوع در گزینه‌های حمل و نقل عمومی و خصوصی، تامین پارکینگ • برای اتومبیل‌ها و دوچرخه‌ها و برقراری ارتباط و دسترسی زیرسطحی • ارتقای امنیت از طریق جداسازی سواره و پیاده، استفاده در مواقع بحران به عنوان پناهگاه، پایداری مناسب در زمان وقوع زلزله و حفاظت از سرما و گرما • ارتقای کیفیت بصری با انتقال زیرساخت‌ها به زیرزمین، ایجاد مکان‌های جذاب و سرزنده، کمک به افزایش سطح سبز، جایدگی سواره و افزایش مطلوبیت فضایی • جا دادن زیرساخت‌های تجاری و تفریحی، پشتیبانی و تامین نیازمندی‌هایی مانند حمل و نقل عمومی، توقفگاه اتومبیل، جایدگی تاسیسات و تجهیزات شهری به ویژه کابل‌ها، لوله‌ها و تونل‌های تاسیساتی و افزایش تراکم و فشردگی • تقویت ارتباطات فضایی، اتصال به مبادی ورودی مراکز شهری، ایستگاه‌های مترو و اتوبوس، ساختمان‌های مهم تجاری و خدماتی از قبیل پارکینگ و هتل • انتقال و نگهداری تاسیسات و تجهیزات سرمایشی و گرمایشی، انبارها و مخازن نفت و گاز، نیرو و مواد ضروری، کابل‌های مخابراتی و ارتباطی، نیروگاه‌های تامین انرژی، خطوط انتقال نیرو • کاهش محصوریت در فضاهای سطح زمین با افزایش تراکم در زیرزمین، آزادسازی فضا از سطره‌ی سواره برای استفاده‌ی انسان‌ها و ایجاد فضاهای سبز

۸- محدوده‌ی میدان تجریش تهران

غربی آن: شمال ناحیه‌ی ۱ منطقه‌ی ۶ شهرداری تهران
 ۲- محور انقلاب و محدوده‌ی شمال آن: ناحیه‌ی ۲ منطقه‌ی ۶ شهرداری تهران
 ۳- محدوده‌ی بازار و تهران ناصری: نواحی ۲ و ۳ منطقه‌ی ۱۲ شهرداری تهران
 ۴- محدوده‌ی پارک‌سوار بیهقی: ناحیه‌ی ۵ منطقه‌ی ۶ شهرداری تهران
 ۵- محدوده‌ی میدان تجریش و اطراف آن: شمال ناحیه‌ی ۷ منطقه‌ی ۱ شهرداری تهران
 ۶- محدوده‌ی میدان آزادی: ناحیه‌ی ۲ منطقه‌ی ۱ و ناحیه‌ی ۱ منطقه‌ی ۹ شهرداری تهران
 ۷- محدوده‌ی راه‌آهن و ترمینال جنوب: نواحی ۱ و ۶ منطقه‌ی ۱۶ شهرداری تهران
 بدیهی است که این پهنه‌ها برای توسعه‌ی زیرسطحی، نیازمند طرح‌های تفصیلی و انجام بررسی‌های کارشناسانه است. همچنین این نوع توسعه برای تهران با مشکلات

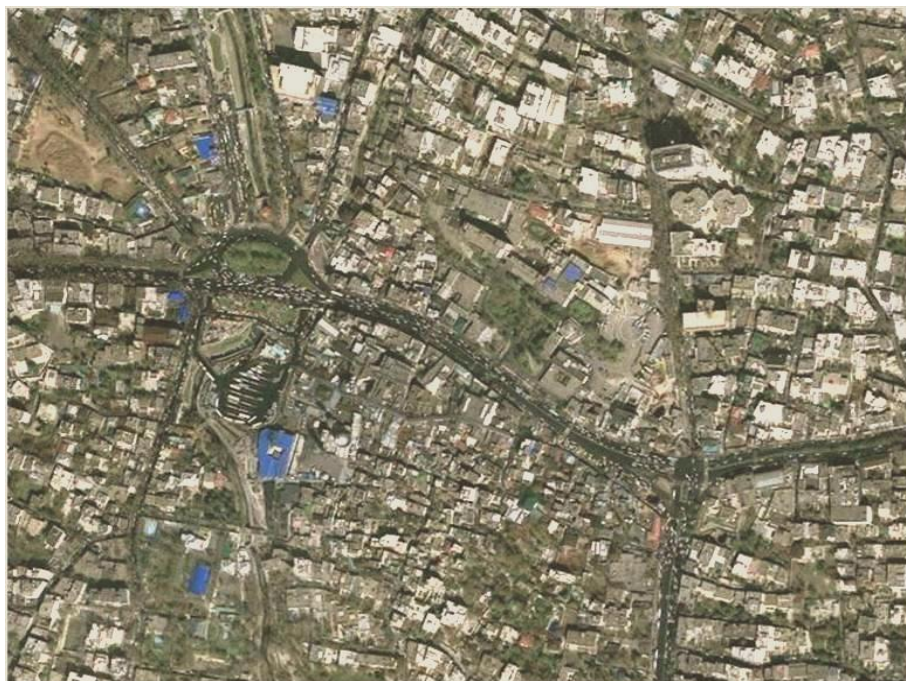
در گذشته، تهران بصورت خانه‌ها و غارهای زیرزمینی مسکونی بوده که در مواقع حمله‌ی دشمنان، مردم به این مکان‌ها پناه می‌بردند. همچنی تهران در روزگاری متشکل از خانه‌های سردابی به صورت پراکنده و پیوسته در محل فعلی بافت قدیمی شهر بوده است. حمله‌ی اقوام مهاجم و نزدیکی به محل‌های آب از دلایل شکل‌گیری این سکونت‌گاه زیرزمینی بوده است (شکل ۸). امروزه تهران، از فضاهای زیرزمینی در توسعه‌ی خود به میزان کمتری بهره می‌برد. این استفاده بیش‌تر در بعد حمل و نقل و شامل شبکه‌ی مترو و زیرگذرهای سواره است. در سال‌های اخیر برنامه‌ریزی برای توسعه‌ی زیرسطحی تهران در دستور کار مدیران شهری قرار گرفته است. بر اساس طرح امکان‌سنجی توسعه‌ی حیات زیرسطحی تهران، ۷ پهنه‌ی مستعد توسعه‌ی زیرسطحی به شرح ذیل شناسایی و معرفی شده است:
 ۱- محدوده‌ی میدان هفت تیر، محور فتح و محدوده‌ی

عدیده‌ای همراه و نیازمند مقاوم‌سازی شهر در سوانح و مواقع بحرانی به عنوان یک شهر جهانی است. در این پژوهش، محدوده‌ی میدان تجریش برای توسعه‌ی زیرسطحی به تفصیل بررسی شده است (شکل ۹).



نقشه تقریبی ده تهران مطابق با نوشته‌های مورخان تا سده هفتم

شکل ۸- تهران زیرزمینی در گذشته‌های دور: خانه‌های زیرزمینی برای مصون ماندن از حملات دشمن [۱۷]



شکل ۹- تصویر ماهواره‌ای محدوده‌ی میدان تجریش

- کاربری‌های پر ازدحام مانند پایانه‌های سواره، بیمارستان شهدای تجریش، پاساژها، مراکز تجاری و شهرداری منطقه ۱
- ۶- آلودگی‌های زیست‌محیطی
- ۷- قرار گرفتن در محدوده‌ی گسل‌های لرزه‌خیز
- ۸- طغیان رودخانه‌ی دربند در سال‌های اخیر
- ۹- توپوگرافی و شیب محسوس در محدوده (امکان استفاده از اختلاف سطح موجود برای توسعه‌ی زیرسطحی شهری)
- ۱۰- کمبود فضا برای کاربری‌های گوناگون شهری

- در محدوده‌ی میدان تجریش، مشکلات و مسایل خاصی در ابعاد گوناگون شهرسازی به شرح زیر وجود دارد:
- ۱- وجود فضاهای منفصل زیرزمینی مانند زیرزمین واحدهای خصوصی و ایستگاه‌های مترو (شکل ۱۰)
- ۲- تراکم بالای انسانی
- ۳- تراکم بالای ساختمان‌ها
- ۴- تراکم بالای سواره و خودروهای متوقف و در حال حرکت و در مجموع مشکلات ترافیکی و ترددی برای سواره و پیاده
- ۵- وجود مراکز اجتماعی حساس و آسیب‌پذیر با



شکل ۱۰- فضاهای زیرزمینی موجود در محدوده میدان تجریش

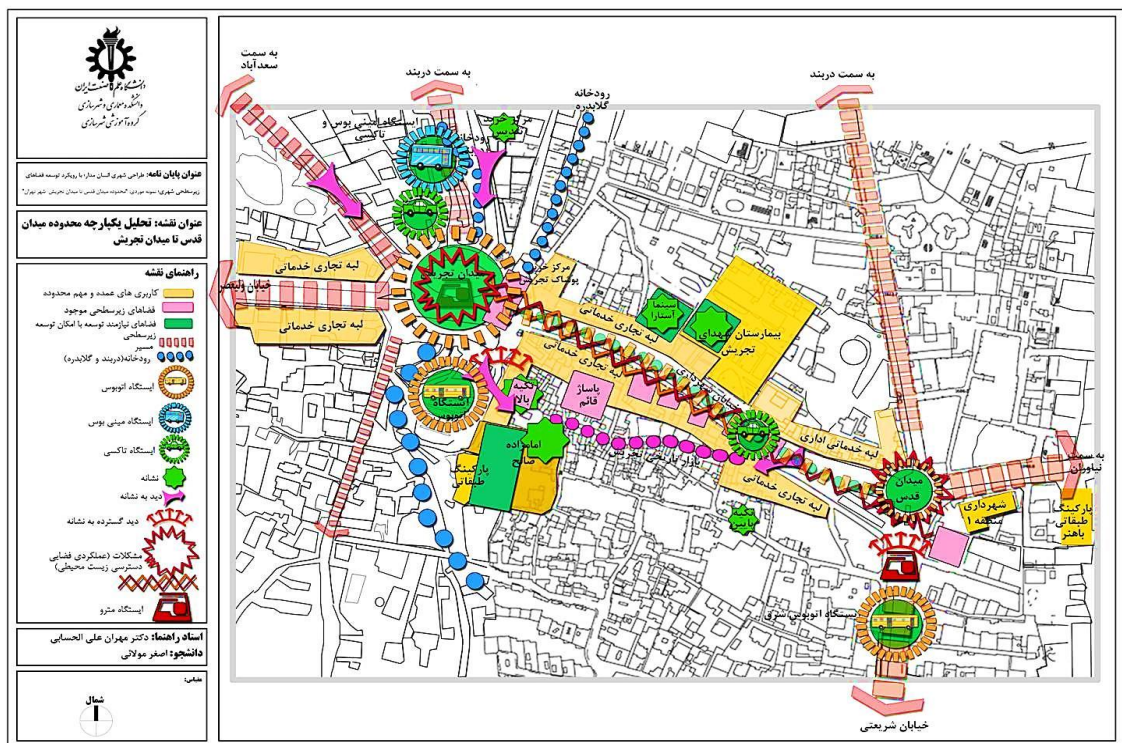
۸-۱- تحلیل سوات

- در این مقاله، تجزیه و تحلیل محدوده‌ی تجریش با روش سوات (SWOT) انجام شده است. خلاصه‌ای از داده‌های در نظر گرفته شده در این تحلیل عبارت است از:
- مهم‌ترین ویژگی‌ها و اجزای هویتی مثبت میدان تجریش عبارت است از:
 - عناصر طبیعی مانند رودخانه، کوهساران شمالی البرز، پوشش گیاهی و باغات
 - عناصر تاریخی مانند بازار تاریخی تجریش
 - عناصر مذهبی مانند تکیه‌ها، مسجد همت و امامزاده صالح
 - مهم‌ترین مشکلات محدوده عبارت است از:
 - مسایل ترافیکی شامل تراکم و ازدحام نامطلوب سواره و پیاده، کمبود پارکینگ و آلودگی‌های ناشی از

خدماتی، گردشگری، پذیرایی و فضاهای باز و تفریحی مهم‌ترین نیازهای محدوده نیز در راستای حل و بهبود همین مسایل خواهد بود (شکل ۱۱). چشم‌انداز توسعه‌ی محدوده‌ی میدان تجریش با توجه به ویژگی‌های بنیانی و الزامات طرح‌های جامع و تفصیلی، شامل پهنه‌ی تفرجگاهی-گردشگری با هویت ممتاز طبیعی، تاریخی و فرهنگی است. محدوده‌ی مذکور یکی از ۷ پهنه‌ی مستعد توسعه‌ی زیرسطحی در طرح مصوب شورای اسلامی تهران با عنوان «امکان‌سنجی توسعه‌ی حیات زیرسطحی شهر تهران» است.

سامانه‌های حمل و نقل مستقر در میدان مسایل زیست‌محیطی شامل آلودگی صوتی و جوی، نبود برنامه و طرح مشخص برای رودخانه‌ی گلابدره، رعایت نشدن حریم رودخانه‌ها و گسل‌ها، آلودگی کاریزها و آب‌های زیرزمینی توسط فاضلاب، مشکل دفع آب‌های روان سطحی، سیل و زهکش‌ها و سایر آلودگی‌های ناشی از آن‌ها

مسایل فضایی-عملکردی شامل کمبود فضا برای کاربری‌های پایانه‌ای و ایستگاهی، فرهنگی، تجاری،



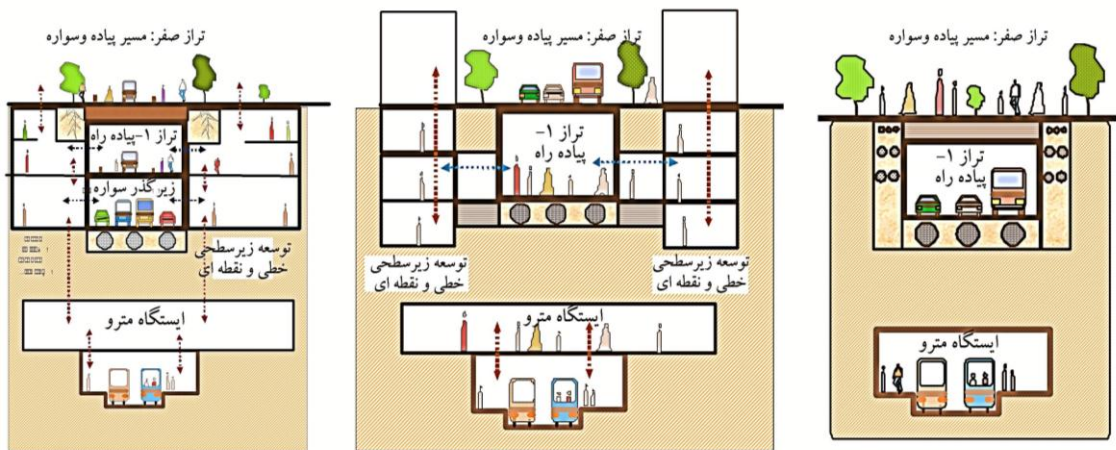
شکل ۱۱- تحلیل یکپارچه‌ی محدوده‌ی میدان تجریش تهران

ترافیکی متفاوت است. در گزینه‌ی اول حمل و نقل سواره به زیرزمین تراز ۱- منتقل شده و تراز همکف (تراز صفر) به پیاده‌راهی برای عابران پیاده تبدیل می‌شود. در گزینه‌ی دوم در تراز ۱- پیاده‌راهی برای عابران پیاده در نظر گرفته می‌شود که در سرما، منطقه‌ی فضایی مطلوبی ایجاد می‌نماید. در گزینه‌ی سوم دو زیرگذر یکی در تراز ۱- برای عابران پیاده و دیگری در تراز ۲ برای حرکت سریع سواره در نظر گرفته شده است (شکل ۱۳).

۸-۲- طرح راهبردی توسعه‌ی زیرسطحی در این بخش با توجه به تحلیل یکپارچه، طرح راهبردی توسعه‌ی زیرسطحی محدوده‌ی میدان تجریش و نتایج آن به صورت توسعه‌های نقطه‌ای و خطی ارائه شده است (شکل ۱۲). سپس گزینه‌های طرح راهبردی در سه سطح مختلف مداخله‌ای، یعنی مداخله‌های حداقلی، میانی و حداکثری تهیه و ترسیم شده است (شکل ۱۳). لازم به ذکر است که تفاوت این گزینه‌ها در تعداد ترازهای پیشنهادی و برنامه‌های



شکل ۱۲- طرح راهبردی توسعه زیرسطحی محدوده میدان تجریش به صورت توسعه‌های نقطه‌ای و خطی



گزینه (۳) مداخله حداکثری

گزینه (۲) مداخله میانی

گزینه (۱) مداخله حداقلی

شکل ۱۳- گزینه‌های توسعه زیرسطحی محدوده میدان تجریش از مداخله حداقلی تا مداخله حداکثری

یا بدون استفاده هستند (مانند پناهگاه بیمارستان شهدای تجریش). امکان احیا و توسعه این مجموعه‌ها و نیز اتصال و ارتباط کالبدی آن‌ها برای استفاده اجتماعی و شهری، یکی از مهم‌ترین راهکارها است.

در برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای زیرسطحی بویژه در مورد مطالعه با رویکرد توسعه پایدار، نتایج زیر توصیه می‌شود:
۱- اغلب فضاهای زیرزمینی موجود تک‌عملکردی، خصوصی

۵- در راستای اهداف فوق در نظر گرفتن قابلیت‌های اجتماعی و مشارکت‌های مردمی، تهیه‌ی طرح راهبردی، تفصیلی و امکان‌سنجی توسعه‌ی زیرسطحی از نظر فنی و زمین‌شناسی در نقاط مختلف ضروری خواهد بود.

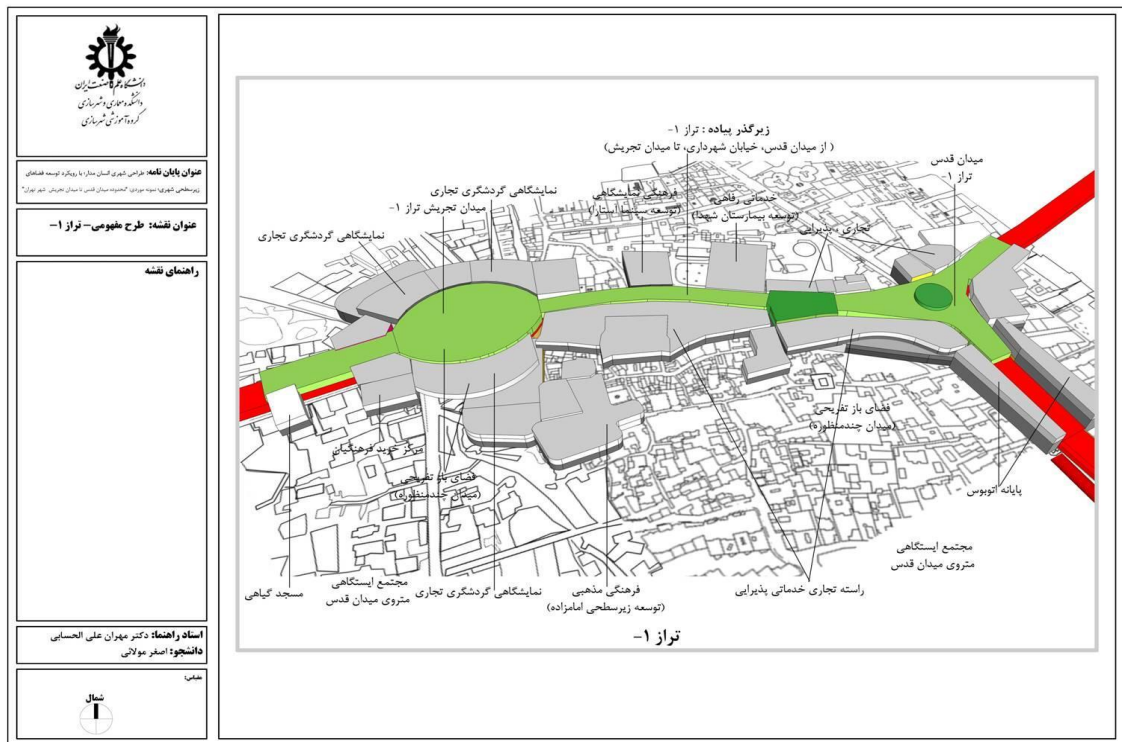
۶- این محدوده، بعنوان محدوده‌ای تفرجگاهی و گردشگری (با توجه به پیشینه‌ی تفرجگاهی، قابلیت‌های طبیعی و تعیین عملکرد فراشهری گردشگری و تفرجگاهی در طرح جامع تهران) از کمبود فضاهای پذیرایی و خدماتی برخوردار است. توسعه‌ی فضاهای زیرزمینی می‌تواند با رفع این کمبود، اهداف توسعه‌ی پایدار را تا حدودی برطرف نماید.

۷- در نهایت در نظر گرفتن گزینه‌های متعدد برنامه‌ریزی و طراحی برای توسعه‌ی زیرسطحی محدوده از مداخله‌ی حداقلی تا مداخله‌ی حداکثری و انتخاب گزینه‌ی بهینه می‌تواند راهگشا باشد (شکل ۱۴).

۲- با توجه به مسایل حمل و نقلی موجود، توسعه‌ی حمل و نقل زیرزمینی در گونه‌های زیرگذر سواره، زیرگذر پیاده، خطوط مترو و پارکینگ‌های زیرزمینی در اولویت توسعه‌ی زیرسطحی این محدوده قرار می‌گیرد.

۳- با توجه به فضاهای زیرسطحی موجود، توسعه‌ی چندمنظوره‌ی زیرزمینی کاربری‌های پرمراجعه از جمله بیمارستان شهدای تجریش، امام‌زاده صالح و پایانه‌ها می‌تواند برنامه‌ریزی و طراحی شود. همچنین ارتباط و اتصال سطوح زیرین این مراکز و مجتمع‌های ایستگاهی مترو در میدان‌های قدس و تجریش نیز ممکن و عملی خواهد بود.

۴- توسعه‌ی زیرسطحی این محدوده می‌تواند به حل مسایل کمبود فضا، مشکلات زیست‌محیطی، مشکلات ترافیکی، آسیب‌پذیری در برابر سوانح و بلایای طبیعی و غیرطبیعی و بطور کلی پایداری محدوده منتهی شود.



شکل ۱۴- طرح مفهومی توسعه‌ی زیرسطحی محدوده‌ی میدان تجریش در تراز ۱-

نیاز کمتر به سرمایه‌ی و گرمایش مکانیکی به میزان قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌نماید. این امر گام مهمی در توسعه‌ی پایدار شهری است. در این راستا

۹- نتیجه‌گیری

فضاهای زیرزمینی می‌توانند در راستای توسعه‌ی پایدار شهری بکار گرفته شوند. فضاهای زیرزمینی با ثبات دمایی و

- انتقال عناصر، فعالیت‌ها و کاربری‌های غیر ضروری (مانند پارکینگ‌ها، انباری‌ها و دکل‌های برق) به زیرزمین و آزاد نمودن فضاهای روستحی برای کاربری‌های مورد نیاز (مانند فضای سبز، پارک و کاربری‌های تفریحی) در نظر گرفتن این رویکرد برای محدوده‌ی میدان تجریش تهران، ضمن اتخاذ نگرشی جامع به ویژگی‌های تاریخی، طبیعی، فرهنگی اجتماعی آن و نیز در نظر گرفتن طرح‌های بالادستی نظیر طرح جامع تهران با چشم‌اندازی تفرجگاهی-گردشگری برای محدوده‌ی مذکور می‌تواند به ارتقای کیفیت محیطی آن کمک نماید. شناخت و تحلیل این محدوده نشان می‌دهد که اختلال در ترافیک و کمبود فضا در صدر مسایل محدوده قرار دارند. از طرفی مطالعه‌ی فضاهای زیرسطحی موجود که اغلب به صورت نقطه‌ای هستند دلیل دیگری بر قابلیت و امکان‌پذیری توسعه‌ی زیرسطحی در منطقه است. در طرح پیشنهادی، ایجاد زیرگذر پیاده‌راه در تراز ۱- می‌تواند مسیری مطلوب برای حرکت و دسترسی پیاده‌ها تامین نماید. همچنین توسعه‌های زیرسطحی نقطه‌ای (مانند میدان تجریش و پیرامون آن و میدان قدس) برای پارکینگ‌های عمومی و فضاهای عمومی می‌تواند در طرح فوق مدنظر قرار گیرد. البته قابل ذکر است که این فضاها باید با نگرشی جامع و در نظرگرفتن تمامی جوانب موضوع استفاده شود و نگرش‌های تک‌بعدی می‌تواند به ناکارایی و عدم توفیق این فضاها منجر شود. همچنین توجه لازم به ارتباط این فضاها با فضاهای بیرونی، تامین حداکثر روشنایی و تهویه‌ی طبیعی، می‌تواند به پایداری هر چه بیش‌تر این فضاها و موفقیت در کاهش مصرف انرژی منتهی شود.

توجه به قابلیت‌های طبیعی زمین در تعادل دمایی، حفاظت و نگهداری مطلوب پدیده‌ها و مناسب بودن برای زیست انسان در شرایط مختلف و نیز مرور سوابق موفق جهانی، ضروری است. برنامه‌ریزی و طراحی فضاهای زیرزمینی در فرآیند توسعه‌ی شهرها می‌تواند نتایج زیر را به همراه داشته باشد:

- تداوم حیات و فعالیت‌های خصوصی و عمومی در اقلیم ناسازگار (گرم‌ا و سرمای شدید)
- کاهش استفاده از گرمایش و سرمایش مکانیکی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- تعادل بخشی به محدوده‌های پرازدحام با توسعه‌ی زیرزمینی و حل مشکلات زیست‌محیطی
- برخورداری فضاهای زیرزمینی از پایداری بالا در سوانح و مواقع بحرانی نظیر زلزله
- فضاهای زیرزمینی انعطاف‌پذیری ساختمان‌ها، فضاهای شهری و بخش‌های شهری را تقویت نموده و امکان انتخاب کاربران را در شرایط متفاوت اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی ارتقا می‌بخشند.
- توسعه‌ی زیرسطحی می‌تواند آلودگی‌های صوتی، بصری و هوا را کاهش داده و تعادل محیطی و اقلیمی را به همراه داشته باشد.
- فضاهای زیرزمینی، دارای ثبات دمایی و حداقل تغییرات دمایی در زمستان و تابستان بوده و قابلیت خوبی در آسایش اقلیمی برای انسان و ملزومات زندگی انسان‌ها دارد.
- طراحی و ایجاد شبکه‌ی دسترسی پیاده‌مدار با در نظر گرفتن طرح‌های بالادستی شهری و توجه به یکپارچگی آن با سایر فضاها و کانون‌های شهری از قبیل ایستگاه‌های مترو

۱۰- منبع‌ها

[۱] استرلینگ، آر. و کارمودی، جی. (۱۳۸۸). *طراحی فضاهای زیرزمینی* (ویرایش اول). (و. ر. ابراهیمی، ترجمه). مشهد، ایران: نشر مرندیز. شابک: ۹۷۸۶۰۰۱۰۶۰۱۶۸.

[2] Kauffman, A. (2012). *Urban Heat Island Effect*. Retrieved March 02, 2013, from Southwest Urban Hydrology Web Site: <http://www.southwesturbanhydrology.com/urbanization-concerns/urban-heat-island-effect/>.

[۳] واتسون، دی. و لیز، کی. (۱۳۸۲). *طراحی اقلیمی: اصول نظری و اجرایی کاربرد انرژی در ساختمان*. ص ۱۲۳-۱۲۵. (و. قبادیان و م. ف. مهدوی، ترجمه) تهران، ایران: انتشارات دانشگاه تهران. شابک: ۹۶۴-۰۳-۳۸۷۵-۳.

- [۴] لقایی، ح.، و محمدزاده‌تیتکانلو، ح. (۱۳۷۸). مقدمه‌ای بر مفهوم توسعه‌ی شهری پایدار و نقش برنامه‌ریزی شهری. نشریه‌ی هنرهای زیبا، ۶، ۳۲-۴۳. تهران، ایران: دانشگاه تهران.
- [۵] خاتمی، س. م. ج.، و فلاح، م. ح. (۱۳۸۹). جایگاه آموزش پایداری در معماری و ساختمان. نشریه‌ی صفحه، ۲۰ (۵۰)، ۲۱-۳۴. تهران، ایران: دانشگاه شهید بهشتی.
- [۶] عزیزی، م. م. (۱۳۸۰). توسعه‌ی شهری پایدار، برداشت و تحلیلی از دیدگاه‌های جهانی. نشریه‌ی صفحه، ۱۱ (۳۳)، ۱۵-۲۷. تهران، ایران: دانشگاه شهید بهشتی.
- [۷] ردریک، آر.، و بوتلر، کی. (۱۳۸۷). مکان‌ها و مکان‌سازی، استانداردهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری انجمن شهرسازی آمریکا، ص ۳۲۸-۳۳۴. (گ. اعتماد، م. بهزادفر، و س. صالحی میلانی، ترجمه) انتشارات جامعه‌ی مهندسیین مشاور ایران. شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۰۴-۲۴۱۱-۷.
- [۸] مولایی، الف. (۱۳۸۹). طراحی شهری انسان‌مدار با رویکرد توسعه‌ی زیرسطحی شهری- نمونه‌ی موردی محدوده‌ی میدان قدس تا میدان تجریش تهران. تهران، ایران: پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد شهرسازی- طراحی شهری، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [9] Golany, S. G., & Ojima, T. (1996). *Geo-Space Urban Design*. New York: John Wiley. ISBN-13: 9780471162520.
- [10] Parriaux, A., Blunier, P., Maire, P., & Tacher, L. (2007). The Urban Underground in the Deep City Project: for Construction but not only. *The Associated Research Centers for Urban Underground Space (ACUUS) 11th Conference on Underground Space: Expanding the Frontiers*. Athens. <http://www.thinkdeep.nl/documents/Papers/Parriaux.pdf>.
- [11] Bobylev, N. (2009). Mainstreaming Sustainable Development into A City's Master Plan: A Case of Urban Underground Space Use. *Land Use Policy*, 26(4), 1128-1137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.02.003>.
- [12] Liu, N., & Zhang, C. (2011). Based on Energy-Saving of Utilization and Development of Urban Underground Space Resource of Qingdao. *Energy Procedia*, 5(IACEED2010), 15-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.003>.
- [13] Barker, M. B. (1986). Using the Earth to Save Energy: Four Underground Buildings. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1(1), 59-65. [http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798\(86\)90129-X](http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(86)90129-X).
- [۱۴] بینا، م. (۱۳۸۶). تجزیه و تحلیل اقلیمی شوادان‌ها در خانه‌های دزفول. نشریه‌ی هنرهای زیبا، ۳۳، ۳۷-۴۶. تهران، ایران: دانشگاه تهران.
- [15] Sterling, R. L., & Godard, J. P. (2005). *GeoEngineering Considerations in the Optimum Use of Underground Space*. ITA-Technical Report. ITA-AITES: <http://www.ita-aites.org/index.php?id=64>.
- [۱۶] گلکار، ک. (۱۳۷۹). طراحی شهری پایدار در حاشیه‌ی شهرهای کویری. نشریه‌ی هنرهای زیبا، ۸، ۴۳-۵۲. تهران، ایران: دانشگاه تهران.

توسعه‌ی پایدار شهری با استفاده از فضاها‌ی زیرسطحی - مطالعه‌ی موردی: محدوده‌ی میدان تجریش تهران: ص ۶۹-۸۸

[۱۷] معتمدی، م. (۱۳۸۱). *جغرافیای تاریخی تهران*. ص ۱۱. تهران، ایران: مرکز نشر دانشگاهی. شابک: ۸-۱۰۲۴-۱-۰۱-۹۶۴.

شیوه‌نامه‌ی نهایی نگارش دست‌نوشته برای ارسال به نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

سید محمد اسماعیل جلالی^{۱*}؛ احمد رمضان‌زاده^۲؛ ملیحه داودآبادی^۳

- ۱- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود
 ۲- استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود
 ۳- کارشناس فنی نشریه؛ دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی استخراج معدن

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۶/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۷

چکیده	واژگان کلیدی
این شیوه‌نامه به منظور یکسان‌سازی و ساده‌سازی فرآیند نگارش و ویرایش دست‌نوشته‌های (Manuscripts) این نشریه توسط پژوهشگران تهیه شده است. در متن شیوه‌نامه، ویژگی‌های بخش‌های اصلی دست‌نوشته، چیدمان صفحه (Page layout)، شکل‌ها، جدول‌ها، پیوست‌ها، منابع‌ها و دیگر موارد ضروری برای تدوین دست‌نوشته بیان شده است. در چکیده باید چگونگی، ضرورت، روش، ابزارها و دستاوردهای پژوهش در یک بند (Paragraph) تک ستونی به صورت روشن بیان شود. در چکیده نباید نمودار، جدول، شکل، گزاره یا نمادهای ریاضی دیده شود. چکیده‌ی پارسی می‌تواند تا ۲۰۰ واژه و چکیده‌ی بلند انگلیسی تا ۴۰۰ واژه باشد. توجه شود که چکیده‌ی بلند انگلیسی باید در یک فایل جداگانه و با رعایت موارد ارایه شده در شیوه‌نامه‌ی انگلیسی نوشته شود.	شیوه‌نامه نگارش نشریه‌ی علمی-پژوهشی تونل فضاهای زیرزمینی دانشگاه صنعتی شاهرود انجمن تونل ایران

الف- اندازه‌ی هر صفحه برابر با $A4$ و حاشیه‌های بالا، پایین، راست و چپ آن‌ها به ترتیب برابر با ۴، ۴، ۳ و ۳ سانتی‌متر انتخاب شود (جدول ۱).

جدول ۱- حدود متن

مشخصات	اندازه (سانتی‌متر)
عرض ستون‌ها	۷
فاصله‌ی بین ستون‌ها	۱
فاصله از بالا	۴
فاصله از پایین	۴
فاصله از راست	۳
فاصله از چپ	۳

۱- مقدمه

در این دست‌نوشته، شیوه‌نامه‌ی تهیه‌ی دست‌نوشته‌های نشریه‌ی علمی-پژوهشی «مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی» تشریح شده است. این شیوه‌نامه بر اساس ویژگی‌های موجود در نرم‌افزار *Microsoft-Word* تهیه شده و به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود از نسخه‌ی ۲۰۱۰ این نرم‌افزار بهره‌گیرند. شیوه‌های (Styles) مورد نیاز برای تمامی بخش‌های دست‌نوشته، به صورت پیش‌فرض تعریف شده و پژوهشگران می‌توانند با استفاده از آن دست‌نوشته‌ی خود را ویرایش نمایند. چیدمان صفحه و نکته‌های مهمی که باید در نگارش و ویرایش دست‌نوشته‌ها رعایت شود عبارت است از:

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه‌ی سوم؛ اتاق ۶؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۷۳-۳۳۰۰۳۰۰؛ دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۰۰۲۸۰؛ رایانامه: jalalime@shahroodut.ac.ir

ب- تعداد صفحه‌های مقاله باید زوج باشد.

پ- پیکره‌ی اصلی دست‌نوشته به صورت دو ستونی با عرض ۷ سانتی‌متر و فاصله‌داری برابر با ۱ سانتی‌متر تهیه شود (جدول ۱).

ت- فاصله‌ی سطرها در تمام بخش‌ها، به صورت تک‌فاصله‌ای (Single) باشد.

ث- پیش از عنوان‌های سطح اول باید یک سطر خالی با مشخصات اولین بند (در بخش Styles) قرار گیرد. برای سایر زیرعنوان‌ها نیازی به درج سطر خالی یا فاصله نیست.

ج- در دست‌نوشته عکس‌های اسکن شده بکار برده نشود و شکل‌های موجود به صورت جداگانه و با کیفیت بالا به سامانه‌ی نشریه ارسال شود.

چ- دقت شود که مرجع‌گذاری (Cross-Reference) برای تمامی شکل‌ها، جدول‌ها، گزاره‌های ریاضی و منبع‌ها انجام شود و متن مرجع پارسی با قلم بی‌نازنین پرننگ ۱۰ و مرجع انگلیسی با قلم پرننگ Times New Roman و با اندازه‌ی ۹ نوشته شود (جدول ۲).

ح- برای نوشتار انگلیسی در پیکره‌ی دست‌نوشته از قلم Times New Roman کج، با اندازه‌ی ۱۰ استفاده شود.

جدول ۲- اندازه و نوع قلم‌ها

نام بخش	نام قلم	اندازه
عنوان دست‌نوشته	بی‌نازنین پرننگ	۱۵
نام پژوهشگران	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
مشخصه‌های پژوهشگران	بی‌نازنین	۱۰
عنوان چکیده	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
متن چکیده	بی‌نازنین	۱۰
عنوان واژگان کلیدی	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
واژگان کلیدی	بی‌نازنین پرننگ	۹
زیرنویس صفحه‌ی اول	بی‌نازنین	۹
پیکره‌ی دست‌نوشته	بی‌نازنین	۱۱
عنوان سطح اول	بی‌نازنین پرننگ	۱۳
عنوان سطح دوم	بی‌نازنین پرننگ	۱۲
عنوان سطح سوم	بی‌نازنین پرننگ	۱۱
عنوان جدول‌ها و شکل‌ها	بی‌نازنین پرننگ	۱۰
متن جدول‌ها و شکل‌ها	بی‌نازنین	۱۰
منبع‌های پارسی	بی‌نازنین	۱۱
منبع‌های انگلیسی	Times New Roman	۱۰

خ- برای نوشتن اعداد در بین عددهای پارسی علامت

اعشار زیرنویس شده (Subscript) بکار برده شود.

د- اندازه و نوع قلم‌های مورد استفاده در دست‌نوشته در جدول ۲ آورده شده است.

۲- بخش‌های اصلی دست‌نوشته

هر دست‌نوشته به ترتیب باید دارای عنوان، نام و مشخصه‌های پژوهشگران، واژگان کلیدی، چکیده‌ی پارسی، مقدمه، پیکره‌ی اصلی پژوهش، نتیجه‌گیری و در نهایت منبع‌ها باشد. سایر بخش‌ها شامل سپاس‌گزاری، نمادگذاری و پیوست‌ها همگی در انتهای دست‌نوشته پس از نتیجه‌گیری و پیش از منبع‌ها قرار می‌گیرد. چکیده‌ی بلند انگلیسی نیز باید در یک فایل جداگانه تهیه و به سامانه‌ی نشریه ارسال شود.

۲-۱- ویژگی‌های عنوان دست‌نوشته

عنوان دست‌نوشته تا حد امکان کوتاه انتخاب شود و دربردارنده‌ی مفهوم اصلی پژوهش و روش انجام آن باشد. عنوان دست‌نوشته باید با قلم بی‌نازنین پرننگ ۱۵ نوشته شود (جدول ۲). پیش از عنوان دست‌نوشته و پس از آن باید یک سطر خالی مطابق با قلم عنوان دست‌نوشته قرار گیرد.

۲-۲- ویژگی‌های نام و مشخصه‌های پژوهشگران

نام نویسندگان با قلم بی‌نازنین پرننگ ۱۰ پس از عنوان دست‌نوشته نگاشته شود. رتبه‌ی علمی یا تحصیلات و نام سازمان متبوع پژوهشگران در زیر نام آن‌ها با قلم بی‌نازنین ۱۰ نوشته شود. چنانچه بعضی از پژوهشگران دارای مشخصه‌های یکسانی باشند، لازم است مشخصه‌های ایشان تنها در یک سطر که دارای یک شماره‌ی مشترک با اسامی آن‌ها است، درج شود. پس از مشخصه‌های آخرین پژوهشگر باید یک سطر خالی قرار داده شود.

پژوهشگر عهده‌دار مکاتبات با قرار دادن نشان ستاره در بالای نام آن مشخص شود. نشانی کامل پستی، شماره‌ی تلفن ثابت و همراه، دورنگار و نشانی رایانامه این پژوهشگر باید در زیرنویس صفحه‌ی اول نوشته شود.

۲-۳- ویژگی‌های چکیده‌ی پارسی و انگلیسی

نگارش چکیده به دو زبان پارسی و انگلیسی برای دست‌نوشته ضروری است. چکیده‌ی پارسی در ابتدای دست‌نوشته و چکیده‌ی بلند انگلیسی باید در یک فایل

و انتهای صفحه در دو ستون قرار داد. برای این کار با استفاده از ابزار *Break Continuous*، چیدمان صفحه از وضعیت دوستونی به تک‌ستونی تبدیل شود. لازم است که توضیحات شکل در زیر آن و جدول در بالای آن نوشته و هر شکل یا جدول به شماره‌ی منبع مربوط به آن ارجاع داده شود. در شکل ۱ و جدول ۱ نمونه‌ای از چگونگی تنظیم‌های شکل و جدول، قابل مشاهده است.



شکل ۱- نشان نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

۲-۸- گزاره‌های ریاضی

گزاره‌های ریاضی باید در یک جدول دو ستونه و با استفاده از ابزار گزاره‌نویسی (*Equation*) نوشته شود. توضیحات تمام نمادهای جدید مانند گزاره‌ی (۱)، باید در بخش نمادها در انتهای دست‌نوشته، پس از نتیجه‌گیری و پیش از منبع‌ها آورده شود. ذکر واحد هر نماد در سامانه‌ی بین‌المللی (*SI*) ضروری است.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

۲-۹- ویژگی‌های نتیجه‌ها

در بخش نتیجه‌گیری، مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش انجام شده به صورت کوتاه مرور می‌شود. بیان کاربری نتیجه‌های بدست آمده در توسعه‌ی دانش و فن‌آوری و رفع چالش‌های موجود و ارایه‌ی پیشنهاد برای پژوهش‌های بعدی نیز می‌تواند در این بخش افزوده شود.

۲-۱۰- ویژگی‌های منبع‌های پژوهش

برای نگارش منبع‌های پژوهش باید ابزار *References* بکار برده شود. الگوی مورد استفاده در نشریه‌ی «مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی» الگوی *APA* (به سبب سادگی آن) است. در بخش *Manage Sources* باید نوع منبع شامل کتاب، نشریه، همایش، گزارش یا یکی از سایر گزینه‌ها انتخاب و تمام بخش‌های پیشنهاد شده و ستاره‌دار برای آن تکمیل شود. نگارش شماره‌ی استاندارد برای کتاب‌ها و مقالات (*ISBN, ISSN & DOI*) الزامی است. سپس از

جداگانه تهیه شود. توجه شود که در چکیده‌های پارسی و انگلیسی از آوردن شکل، جدول و نمودار پرهیز شود. پیکره‌ی چکیده‌ی پارسی در یک بند با قلم بی‌نازنین ۱۰ و پیکره‌ی چکیده‌ی انگلیسی با قلم *Times New Roman* و با اندازه‌ی ۱۰ نوشته شود.

۲-۴- ویژگی‌های واژگان کلیدی

واژگان کلیدی حداکثر تا هفت واژه در محل مشخص شده نوشته شود. واژگان کلیدی باید به گونه‌ای انتخاب شود که موضوع و فرآیند انجام پژوهش در ذهن خواننده تداعی شود. این واژگان می‌تواند به صورت یک عبارت تک‌واژه‌ای تا حداکثر سه‌واژه‌ای انتخاب شود.

۲-۵- ویژگی‌های مقدمه

در مقدمه ضرورت، اهداف و فرآیند کلی پژوهش انجام شده و نیز پیشینه‌ی موضوع به صورت کوتاه بیان شود. بطوری که خواننده پس از خواندن مقدمه آمادگی لازم برای ورود به موضوع اصلی پژوهش را بدست آورد.

۲-۶- ویژگی‌های پیکره‌ی اصلی پژوهش

پیکره‌ی دست‌نوشته باید شامل تعریف مفهوم‌ها، روش انجام پژوهش، بیان چالش‌های مورد بررسی و رهیافت‌های پیشنهادی باشد.

۲-۷- ویژگی‌های شکل‌ها و جدول‌ها

در طراحی جدول‌ها به درج خط در کناره‌ها یا بین سطرهای مشابه نیاز نیست. متن جدول با قلم بی‌نازنین ۱۰ نوشته شود. قلم سطر و ستون اول بی‌نازنین ۹ پررنگ باشد. بهتر است شکل‌ها با استفاده از ابزار *Picture Tools* بازبینی و ویرایش شوند. این ابزار با کلیک بر روی عکس فعال می‌شود. دقت شود که جانمایی شکل‌ها در پیکره‌ی دست‌نوشته بصورت *In line with text* است و هر شکل باید در یک سطر جداگانه قرار داده شود.

بین ابتدا و انتهای هر شکل یا جدول، یک سطر خالی با مشخصه‌ی اولین بند (در بخش *Styles*) قرار گیرد. اگر جدول یا شکل در ابتدای صفحه باشد، نیازی به درج سطر خالی در بالا و اگر در انتهای صفحه باشد، نیازی به درج سطر خالی در پایین صفحه نیست.

شماره‌گذاری شکل‌ها و جدول‌ها با ابزار *Caption* انجام شود. در موارد ویژه اگر شکل یا جدول به دلیل وجود داده‌های زیاد در یک ستون جا نگیرد، می‌توان آن را در ابتدا

بخش *Bibliography* فهرست منابع‌های بکار برده شده در پیکره‌ی دست‌نوشته به ترتیب دیده شدن در یک بند تک‌ستونی جانمایی شود. هر منبع باید به اولین بخشی که در آن آمده است ارجاع داده شود. برای مثال شیوه‌ی درست نوشتن یک مقاله‌ی کنفرانسی، یک مقاله‌ی علمی- پژوهشی و یک کتاب با استفاده از الگوی *APA* در بخش منابع‌ها آورده شده است [1]، [2] و [3].

۳- قواعد نوشتاری

دست‌نوشته باید با جملات گویا، ساده و کوتاه نوشته شود. جداسازی بخش‌های گوناگون پیکره‌ی دست‌نوشته با استفاده از بند، کمک زیادی به روانی نوشتار می‌کند. یک بند می‌تواند ۱۰ تا ۱۵ سطر باشد. متن اولین بند دست‌نوشته نباید تورفتگی داشته باشد. سایر بندهای دست‌نوشته باید به اندازه‌ی ۰٫۷ سانتی‌متر تورفتگی داشته باشد.

تا حد امکان تلاش شود برای واژگان بیگانه معادل پارسی آن بکار برده شود. برای واژگان تخصصی لازم است در اولین کاربرد واژه‌ی پارسی، منشا آن و برای واژگان مختصر شده (*Abbreviation*)، عبارت کامل آن درون هلالین (*Parentheses*) در مقابل آن واژه آورده شود. چنانچه معادل پارسی یا واژگان مختصر شده در چکیده آورده شده باشد، تعریف آن باید در همان چکیده نگاشته شود. نام‌های دارای ثبت تجاری (*TM*) می‌تواند به زبان اصلی نوشته شود. به جز صفحه‌ی اول دست‌نوشته در سایر بخش‌ها نباید از زیرنویس استفاده شود. نویسندگان باید تلاش نمایند تا حد امکان از بکارگیری واژگان عربی، تنوین و روش‌های جمع عربی مانند جمع مکسر، «ات» و «ین» در نگارش دست‌نوشته دوری کنند.

برای درج فاصله‌ی مجازی از ابزار "*ctrl+shift+2*" استفاده شود. بکارگیری فاصله‌ی مجازی برای افعال مضارع، واژگان مرکب و قبل از «ها»، «تر» و «بی» الزامی است. در انتهای واژگانی که به «ه» و «کسره» ختم می‌شوند، باید به جای درج نشان کسره از «ی» استفاده شود. دقت شود که نقطه، دونقطه، ویرگول و نقطه‌ویرگول باید به واژه‌ی قبل از

۸- منابع‌ها

خود بچسبید و از واژه‌ی بعدی یک حرف فاصله بگیرد. هلالین و قلاب (*Bracket*) باید به واژگان درون خود بچسبند و از واژگان پیش و پس از خود فاصله داشته باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این نوشتار، شیوه‌ی نگارش و ویژگی‌های بخش گوناگون یک دست‌نوشته‌ی علمی- پژوهشی در نشریه‌ی «مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی» بیان شد. با توجه به ابزارهای موجود در نرم‌افزار *Microsoft-Word 2010* تمامی تنظیم‌های مورد نیاز برای نگارش یک دست‌نوشته‌ی جدید به آسانی قابل پیاده‌سازی است. نویسنده می‌تواند با وارد کردن متن دست‌نوشته در این فایل و استفاده از ابزار *Styles* نوشتار خود را ویرایش نماید.

۵- سپاس‌گزاری

اگر در انجام پژوهش از کمک‌های علمی، ویراستاری، مالی و ... شخص، یک سازمان، پژوهشگاه یا نهاد استفاده شده است، در این بخش باید به آن اشاره شود.

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
σ	Pa	تنش
F	N	نیرو
A	m^2	سطح اعمال نیرو

۷- پیوست‌ها

موضوع‌های مرتبط با دست‌نوشته که در یکی از گروه‌های زیر قرار می‌گیرد، در بخش پیوست آورده شود:
الف- فرآیندها یا اثبات‌های ریاضی طولانی
ب- الگوریتم برنامه‌ها
پ- داده‌های نمونه‌ی مورد مطالعه
ت- نتیجه‌ی پژوهش دیگران

- [1] Jalali, S. E., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines. *Modern Management of Mine Prouducting, Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). Albena: International Scientific GeoConference. ISBN: 9549181812 & 9789549181814.

- [2] Jalali, S. E., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. *Safety Science*, 49(5), 664-669. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>.
- [3] Singh, B., & Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V. ISBN-13:978-0-08-044987-6.

Instructions to Authors: Writing an English Extended Abstract for Submission to the Journal of Tunneling and Underground Space Engineering (TUSE)

S. E. Jalali¹; A. Ramezanzadeh²; M. Davoodabadi³

1- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology

2- Assistant Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology

3- TUSE's Coordinator; M.Sc. in Mining Engineering

Received: 22 Aug 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Final Extended Abstract

Styles

Keywords

Tunnel

Underground space

Shahrood University of Technology

Iranian Tunneling Association (IRTA)

Final English Extended Abstract

Any submitted manuscript to the Journal should accompany an English extended abstract, which also needs to be uploaded in the website. In the following, the preparation process for an English extended abstract is explained. Any English extended abstract should be maximum 400 words in length (maximum one page) and should contain **four** sections of **Summary, Introduction, Methodology and Approaches, and Results and Conclusions**. The abstract should contain no figures, tables, or equations as well as no citations to references. Please use the font Times New Roman for writing the English abstract. Furthermore, type the title by 14-pt Bold, for the authors by 9-pt Bold, the affiliations by 9-pt, the body of the abstract by 10-pt, and the keywords by 9-pt Bold. The body of the abstract should be aligned as justified and typed with single line spacing.

Summary

In this section, a concise and comprehensive summary of the process of research should be presented. It should concisely describe the content, subject, objectives, scientific logic or method(s), and the most important findings and conclusions of the research.

Introduction

The introduction of the English extended abstract should comprehensively present the basics of the research in short length and clear statements, so that the reader can obtain a general scope and sufficient information from the research. The necessities, general objectives and future perspectives, in addition to the challenges and extents, of the research should briefly be presented in this section.

Methodology and Approaches

The details, approaches, tools, software, computational or statistical methods and algorithms of the research should clearly and briefly be explained in this section.

Results and Conclusions

The observations, obtained experiences, findings, results, conclusions, and practical recommendations to continue the research should be presented in this section. If necessary, the stated points in this section can be classified and numbered.

Energy-Based Optimized Design of Polymer Fiber-Reinforced Tunnel Lining

M. Safi

Assistant Professor; Faculty of Water and Environmental Eng.; Power and Water University of Technology

Received: 28 Aug 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Tunnel Lining
Energy Absorption
Fiber Reinforced Composite
Panel Test
Mix Design

Extended Abstract

This research aims to introduce an optimized design with minimum possible fiber content while having the maximum possible energy absorption capacity. A series of laboratory tests were conducted with various additive and fiber contents to reach this goal. General recommendations for achieving the optimized results were proposed based on the experimental results. Beam

and panel tests were used to account for energy absorption capacity.

Introduction

Due to the relevance of the energy absorption capacity of fibrous concrete, several entities have been proposed for evaluating this property that include the toughness indices, the equivalent flexural strength and the fracture energy. Among these entities, the fracture energy is the most used in the constitutive models for characterizing the concrete tensile post-cracking behavior. The other entities have not been widely used in numerical simulation of the behavior of Fiber-Reinforced Concrete (FRC) structures. The generic mechanical response contains a linear regime, in which very little permanent micro-structural changes and deformation take place, and a nonlinear regime, in which permanent micro-structural changes occur in a stable manner.

Methodology and Approaches

In order to obtain the most appropriate mix characteristics with the highest energy absorption, an experimental study using 33 beam and rectangular panels was performed by the author. Tests were conducted for various fiber contents and the maximum specific absorbed energy was measured. The small amount of energy absorbed by plain concrete panel was ignored.

Results and Conclusions

The experimental study performed for finding optimized mix design of fiber reinforced concrete showed that applying some changes to the mix design, we can reduce the amount of fiber while keeping the energy absorption capacity constant. This totally results in a high performance of self-compacting fiber reinforced concrete with rather high strength and high energy absorption capacity. Such composite shows high resistance and ductility and can be excellent for both normal and special structural applications. Higher energy absorption levels may also be obtained by following a similar procedure as was performed in this study. Note that, although more fibers result in more energy absorption up to a certain level, the failure mechanism and structural behavior do not change, and thus, the same objectives can be met by using minimum amounts of fibers.

Analysis of Underwater Tunnels Considering Strain-Softening Behavior in Plastic Zone

A. Fahimifar¹; H. Ghadami²; M. Ahmadvand³; A. Abdolmaleki⁴

1- Professor; Faculty of Civil and Environmental Eng.; Amirkabir University of Technology

2- MSc; Geotechnical Eng.; Department of Civil Eng.; Tafresh University; Alborz Regional Water Company

3- MSc; Geotechnical Eng.; Department of Civil Eng.; Tafresh University; Taha Consultant Engineers Company

4- PhD Candidate; Department of Civil Eng.; Tabriz University

Received: 21 Oct 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Underwater tunnels
Strain-Softening behavior
Groundwater
Pore pressure
Seepage

Extended Abstract

In this paper, an elasto-plastic analytical-numerical method for the analysis of underwater tunnels is proposed. Seepage flow and secondary permeability of the rock mass due to the mechanical-hydraulic coupling are taken into accounts for plastic zone. Meanwhile, a modified accurate seepage model is used for elastic zone. As the analytical equations do not have

closed form solutions, a computer program has been presented to obtain the solutions.

Introduction

When a tunnel is excavated below groundwater table, groundwater flows into the tunnel and seepage forces act on the tunnel walls. Any element of rock mass is loaded on all sides by the seepage forces as body forces. Fractures and pores cause the permeability of the rock mass to be deformed by these forces. Therefore, the permeability of the rock mass around the pressure tunnels will be modified by the excavation and installation of lining. This change in permeability in turn affects the seepage flow and forces. This mechanical-hydraulic coupling is rarely considered in the analysis of underwater tunnels.

Methodology and Approaches

A new numerical procedure, using the finite difference method, is proposed for calculating the distribution of stresses, radial displacements and pore pressures around a circular tunnel excavated in a rock mass with strain-softening behavior. For estimation of rock mass strength, the Hoek-Brown model is applied. The stepwise procedure proposed by Brown & Bray (1982) is modified by including the effects of elastic strain increments. For the strain-softening behavior, it is assumed that all the strength parameters are a linear function of deviatoric plastic strain, which is different from the function used by Brown-Bray. The accuracy and practical application of proposed procedure have been shown through some examples.

Results and Conclusions

The results and findings have indicated the effects of dilatancy angle, deviatoric plastic strain as the factor of strain-softening, elastic strain increments and condition of groundwater. It can be observed that both elasto-plastic radius and convergence of the tunnel before installation of lining have been increased by raising the groundwater level. Meanwhile, variations of dilatancy angle have also a significant effect on ground response curve and elasto-plastic radius.

The Effect of Operational Parameters on Penetration Rate of a TBM Using Artificial Neural Networks- A Case Study: Zagros Tunnel

M. Eftekhari¹; A. Baghbanan²; R. Bagherpour³

1- PhD Candidate; Department of Mining Engineering; Isfahan University of Technology

2 & 3- Assistant Professor; Department of Mining Engineering; Isfahan University of Technology

Received: 23 Oct 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Tunnel Boring Machine (TBM)
Penetration Rate (PR)
Artificial Neural Networks (ANNs)
Thrust
Torque

Extended Abstract

The ANNs are a form of artificial intelligence which attempt to mimic the function of the human brain and nervous system. ANNs could take into account the impact of all important parameters for predicting a phenomenon. In this study, the obtained data from an excavated tunnel with a length of 10 km in Zagros region in Iran were analyzed, and the penetration rate

of a TBM was predicted by taking the ANNs approach in a MATLAB program used for this purpose.

Introduction

Performance analysis and accurate prediction of Penetration Rate (PR) of a tunnel boring machine have been the ultimate goals of many research works. A reliable prediction of a TBM performance is necessary in budget control and also time schedule planning in underground excavation projects. Evaluating the optimum operational parameters of machine using artificial neural networks method is the main objective of this research work which has not been estimated and reported in previous studies in this field of study.

Methodology and Approaches

For predicting the PR of a TBM, mechanical properties of intact rock and rock masses and also operational parameters such as recorded values of torque and thrust are required in ANN modeling. The obtained simulation results of the tested sets show that the network with 8 neurons in its hidden layer is the most appropriate network structure for predicting the PR in this study. The correlation coefficient (R-value) between the outputs of the network and the actual PR is 83%. The designed ANN model was then applied for the next excavated 0.5 km of the tunnel that had not been previously considered by the ANN model. The calculated correlation coefficient between the outputs of the network and actual PR for the new set of data was 79% indicating that the designed ANN in this study worked quite well. A sensitivity analysis on the effect of two important operational parameters of TBM namely thrust and torque was conducted. Based on the results, the optimum ranges for both operational parameters were determined.

Results and Conclusions

The results of this study show that the developed ANN method is very efficient for predicting the PR in the investigated tunnel. The maximum PR is achieved when optimum values of thrust and torque of TBM are applied.

Segment Lining Design of the Long Tunnel for Transferring Water at Sardasht Dam Considering Segment Joints Effects

H. Bakhshandeh Amnieh¹; S. Taei Semiromi²; M. Rahimi Dizadji³

1- Assistant Professor; Department of Mining Engineering; Faculty of Engineering; University of Kashan

2- MSc Student; Department of Mining Engineering; Faculty of Engineering; University of Kashan

3- PhD Candidate; Faculty of Mining & Metallurgy; Amirkabir University of Technology; Sepasad Engineering Co.

Received: 27 Aug 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Water Transfer Tunnel
Segment lining design
Joint
Internal load

Extended Abstract

In this research, the axial and shear force and bending moments in the segment lining of Sardasht dam water transfer tunnel are studied using both analytical and an explicit finite difference method, aiming to design a safe and stable lining. Segment joints and their characteristics such as stiffness and distribution pattern

were considered as the principal modeling factors. The results indicate that the existing thickness of the tunnel lining is safe and provides the appropriate load and moment bearing capacity.

Introduction

Segment joints of the lining should be capable of withstanding a certain amount of bending moment, and axial and shear forces. Considering that the force-displacement correlation may behave linearly within a certain range of the applied loads, the bending moment applied on the lining might be reduced. Hence, the lining thickness could be reduced once smaller internal forces are involved. In the structural analysis of the lining segment, joints could be modeled as elastic tubes and their stiffness could be expressed in terms of rigidity.

Methodology and Approaches

In this article, considering the rigidity of the lining segments, the lining joints are modeled as elastic tubes with constant rigidity. Analytical methods for analysis of the lining joints are based on the ratio of horizontal to vertical stresses, soil strength coefficient, the influence of joint stiffness, number and distribution of joints. Bending moment, axial force and the lining displacements due to the internal forces applied on the lining are calculated. Axial force and bending moment applied on the lining have been evaluated using the FLAC software program. Hence the graph of axial force versus bending moment of the lining is plotted considering that the bending moment and axial forces applied on the lining are evaluated using both analytical and numerical methods.

Results and Conclusions

In the numerical method, all combinations of bending moments and axial forces applied to the lining segment at Sardasht long tunnel were transferred to the reciprocating effect diagram, to evaluate its safe application. The safety factor for both continuous and segmental lining was found to be 2.22 and 3.14, respectively. Hence all selected linings were found to be safe. In the numerical method, the axial force and bending moments applied to the tunnel lining were determined at three different ratios of (horizontal stress/vertical stress) and they were found to be 0.7, 1.0 and 1.3. Their combinations were found to be within the acceptable regions in the reciprocating effect diagram. Hence, one can conclude that a 30cm thickness for the segment lining is stable and safe within the limits considered.

Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling- A Case Study: Tehran Metro Line 7

R. Heidari Sheibani¹; S. Zare²; H. Mirzaei Nasir-Abad³; M. Foroughi⁴

1- M.Sc. in Mining Engineering; Shahrood University of Technology

2 & 3- Assistant Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics; Shahrood University of Technology

4- M.Sc.; Sahel Consulting Engineers

Received: 19 Sep 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Settlement
EPB
Tehran Subway Tunnel
Instruments' Data
Numerical Modeling

Extended Abstract

Tehran's metro line 7 project has been excavated by an Earth Pressure Balance (EPB) machine. Four sections of the line 7 tunnel have been selected in this study, and the influence of face and backfill grout pressures on surface settlement has been numerically investigated. The obtained numerical results have been confirmed by the monitoring data using the installed instruments on site. Then, the results of various numerical models for different amounts of face pressure and backfill grouting pressure have been discussed. In this research, the influence of backfill grouting pressure is found to be significant.

Introduction

Various underground spaces such as tunnels are constructed in urban areas for different purposes. These spaces are often located in soil media near the ground surface. Therefore surface settlement control is a critical task in the construction of these spaces. In EPB mechanized tunneling, the face pressure and backfill grouting pressure are the most important factors to prevent surface settlement.

Methodology and Approaches

In this study, the PLAXIS3D software has been employed for carrying out 3D numerical modeling of face pressure influence on the surface settlement. In addition, the Mohr-Coulomb criterion has been considered for geo-mechanical behavior of soil material surrounding the tunnel. In two sections of the tunnel, the results of numerical models have been verified by the data obtained from monitoring instruments installed in the site. In the other two sections of tunnel, four states of face pressure: $P=P_0$ (estimated initial pressure), $P=1.5P_0$, $P=2P_0$ and $P=4P_0$ and for each state, five states of backfill grouting pressure: $G=0$, $G=P$, $G=P+0.5$ bar, $G=P+1$ bar and $G=P+2$ bar have been considered and surface settlement in each case has been analyzed.

Results and Conclusions

The obtained numerical results show that a %400 increase of face pressure, leads to a decrease of maximum 5 mm in the surface settlement. Thus, the influence of face pressure seems to be trivial but the influence of backfill grouting pressure appears to be significant.

Sustainable Urban Development Using Underground Space Development Approach-A Case Study: Tajrish Square, Tehran

A. Molaei

M.Sc. in Urban Design; Faculty of Architecture and Urban development; Iran University of Science and Technology

Received: 24 Oct 2012; Accepted: 16 Jan 2013

Keywords

Urban Design
Underground Development
Tajrish Square
SWOT Analysis
Underground Transportation
Intervention Levels

Extended Abstract

Using underground spaces is one of the new approaches in sustainable urban developments. This approach is intended to solve some urban problems such as shortage of spaces, traffic and environmental issues. This research aims to introduce various underground spaces, their aspects and benefits in the context of urban underground development. In this paper, after defining the problem and explaining its importance, the

concepts of sustainable development and underground spaces are described. Underground spaces are then analyzed from climatic, traffic and environmental viewpoints. As a case study, the underground development of Tajrish Square is proposed.

Introduction

In the past ages, underground spaces have been used due to traditional needs and reasons; but in the contemporary age, extensive construction and use of underground spaces are a new approach in urban development in the world and especially in Iran. Studying the history of the subject indicates that today with the advent of technical inventions and modern evolutions, the development of such spaces especially urban infrastructure are essential due to increasing unfavorable climatic conditions, transportation problems, lack of space on the surface, and environmental pollutions, in addition for the purpose of safety and security improvement. A new approach is introduced in this paper to solve urban problems and supply urban needs such as urban infrastructure, tunnels, underground parking, storages and refineries.

Methodology and Approaches

Underground development approach has been used in this research considering historical, descriptive and analytical methods in a case study. The methods and software programs used in this research include GIS, AutoCAD, and other software programs for analyzing, designing and rendering.

Results and Conclusions

The results of this paper show that underground spaces have basic and positive potentials in the sustainability context. These potentials consist of having a constant temperature, sustainability in harsh climates, stability in critical conditions and accidents, source of space, energy, etc. Urban underground development approach can be used for solving urban problems and upgrade sustainability. In Tajrish Square, transportation problems, unfavorable climate, lack of space, in addition to distinctive natural, historical and cultural features are observed. Using people-oriented qualities of urban design and alternatives of underground development from minimum intervention to maximum intervention are presented. After the assessment of the above-mentioned influencing factors the best alternative is selected. Ultimately urban underground space design framework and guideline with emphasis on Tajrish Square are presented in this research.



**JOURNAL OF
TUNNELING & UNDERGROUND SPACE ENGINEERING
(TUSE)**

Volume 1-Issue 1\Winter 2013

Editor in Chief: Seyed-Mohammad Esmail Jalali
Director in Chief: Ahmad Ramezanzadeh
Associate Editor: Siamak Hashemi
English Literary Editor: Abolghasem Kamkar Rohani
Technical Editor & Coordinator: Maliheh Davoodabadi
License Holders: Shahrood University of Technology & Iranian Tunneling Association (IRTA)

Editorial Board

Mohammad Javad Jafari (Shahid Beheshti University)	Mostafa Sharifzadeh (Amirkabir University of Tech.)
Seyed-Mohammad Esmail Jalali (Shahrood University of Tech.)	Korosh Shahriar (Amirkabir University of Tech.)
Hosein Jalalifar (Shahid Bahonar University of Kerman)	Mohammad Fatehi Marji (Yazd University)
Ahmad Ramezanzadeh (Shahrood University of Tech.)	Ahmad Fahimifar (Amirkabir University of Tech.)
Jian Jhao (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne-Switzerland)	Morteza Gharooni Nik (Iran University of Science & Tech.)
Farhang Sereshki (Shahrood University of Tech.)	Siamak Hashemi (Iranian Tunneling Association)

Reviewers of This Issue

Seyed-Mohammad Esmail Jalali (Shahrood University of Tech.)	Farhang Sereshki (Shahrood University of Tech.)
Hosein Jalalifar (Shahid Bahonar University of Kerman)	Mostafa Sharifzadeh (Amirkabir University of Tech.)
Mohammad Farough Hoseini (Tehran University)	Hamid Reza Shoaee (Islamic Azad University of Shahrood)
Ahmad Ramezanzadeh (Shahrood University of Tech.)	Omid Forough (Sahel Engineering Company)
Shokrollah Zare (Shahrood University of Tech.)	Abolghasem Kamkar Rohani (Shahrood University of Tech.)
Masoud Zare Naghadehi (Hamedan University of Tech.)	Siamak Hashemi (Iranian Tunneling Association)

ISSN: 2322-3111

Address: Journal of Tunneling & Underground Space Engineering Office, Faculty of Mining Eng., Petroleum & Geophysics, Shahrood University of Technology, University Boulevard, Shahrood, Iran

Zip Code: 3619995161 - **P.O.Box:** 316

Tel-fax: (+98)273- 339 35 07

Web Site: <http://tuse.shahroodut.ac.ir>

Email: tuse@shahroodut.ac.ir

**JOURNAL OF
TUNNELING & UNDERGROUND
SPACE ENGINEERING (TUSE)**

TUSE

ISSN: 2322-3111

Volume: 1- Issue: 1\ Winter 2013

Energy-Based Optimized Design of Polymer Fiber-Reinforced Tunnel Lining

Mohammad Safi

Analysis of Underwater Tunnels Considering Strain-Softening Behavior in Plastic Zone

Ahmad Fahimifar; Hamed Ghadami; Masoud Ahmadvand; Arvin Abdolmaleki

**The Effect of Operational Parameters on Penetration Rate of a TBM Using Artificial Neural Networks-
A Case Study: Zagros Tunnel**

Seyed Mosleh Eftekhari; Ali Reza Baghbanan; Raheb Bagherpour

**Segment Lining Design of the Long Tunnel for Transferring Water at Sardasht Dam Considering
Segment Joints Effects**

Hasan Bakhshandeh Amnieh; Saeed Taei Semiromi; Morteza Rahimi Dizadji

**Numerical Study of Face Pressure Effect on Surface Settlement in Soft Ground Mechanized Tunneling-
A Case Study: Tehran Metro Line 7**

Reza Heidari Sheibani; Shokroullah Zare; Hosein Mirzaei Nasir-Abad; Mohammad Foroughi

**Sustainable Urban Development Using Underground Space Development Approach- A Case Study:
Tajrish Square, Tehran**

Asghar Molaei

