

بررسی عددی تأثیر تراز آب زیرزمینی بر نیروی برشی و ممان خمشی پوشش تونل‌های دایره‌ای در شرایط استاتیکی و دینامیکی (مطالعه موردی: تونل مترو اصفهان)

مقاله علمی - پژوهشی

*مسعود خواهانی پور (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال،

دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمدرضا رسولی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: masoud.khahanipour@iaiu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۳۷۴-۳۵۵

چکیده

پایداری لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی به‌ویژه تونل‌ها، یکی از چالش‌برانگیزترین حوزه‌های مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای به‌شمار می‌رود. در این میان، وجود آب زیرزمینی با تأثیر بر فشار منفذی، تنش مؤثر و سختی محیط، نقشی کلیدی در تغییر الگوی توزیع نیروهای داخلی پوشش تونل ایفا می‌کند. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف تراز آب زیرزمینی بر نیروی برشی و ممان خمشی در پوشش تونل‌های دایره‌ای، در هر دو شرایط استاتیکی و دینامیکی، انجام شده است. بدین منظور، مدل‌سازی عددی به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار *PLAXIS 2D* صورت گرفت و اندرکنش سه‌گانه خاک، سازه و سیال در پنج تراز متفاوت آب زیرزمینی و چهار عمق قرارگیری تونل تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تراز آب زیرزمینی منجر به کاهش محسوس نیروی برشی و ممان خمشی در پوشش تونل می‌شود، به‌گونه‌ای که در حالت دینامیکی، نیروی برشی در تاج تونل تا ۵۵٪ و ممان خمشی تا ۴۰٪ نسبت به شرایط خشک کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که در شرایط استاتیکی، تغییرات تراز آب تأثیر چندانی بر نیروهای داخلی ندارد، درحالی‌که در تحلیل دینامیکی، کاهش سطح آب زیرزمینی با افزایش نیروی برشی همراه است. حساسترین نقاط پوشش تونل در برابر تغییرات نیروهای داخلی، بخش‌های جانبی (راست و چپ) تونل تشخیص داده شد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی لرزه‌ای تونل‌های واقع در مناطق با سطح آب بالا و خاک‌های اشباع، مورد استفاده مهندسان و طراحان قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تونل، آب زیرزمینی، تحلیل لرزه‌ای، روش المان محدود، پایداری ژئوتکنیکی

۱- مقدمه

دغدغه‌های اصلی مهندسی ژئوتکنیک تبدیل نموده است. رفتار تونل‌ها در برابر بارگذاری لرزه‌ای به‌دلیل اندرکنش پیچیده میان توده خاک، سازه پوشش و سیال منفذی، تفاوت ماهوی با سازه‌های سطحی دارد. درحالی‌که سازه‌های سطحی عمدتاً تحت تأثیر نیروهای ایرسی ناشی از شتاب زلزله قرار می‌گیرند، پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها بیشتر متأثر از تغییرشکل‌های تحمیلی محیط پیرامونی است. در چنین شرایطی، حضور آب زیرزمینی از دو

رشد شتابان شهرنشینی و کمبود فضای سطحی، بهره‌گیری از فضاهای زیرزمینی را برای توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل، تأسیسات شهری و ذخیره‌سازی به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. در این میان، تونل‌ها به‌عنوان شریان‌های حیاتی شهرها، نقشی اساسی در پایداری و کارایی شبکه‌های شهری ایفا می‌کنند. بااین‌حال، قرارگیری بسیاری از این سازه‌ها در مناطق لرزه‌خیز، ارزیابی دقیق پایداری لرزه‌ای آن‌ها را به یکی از

مسیر اصلی بر پاسخ دینامیکی تونل تأثیر می‌گذارد: نخست از طریق افزایش فشار منفذی و کاهش تنش مؤثر که منجر به افت سختی و مقاومت برشی خاک می‌شود، و دوم از طریق ایجاد نیروی شناوری که می‌تواند توزیع تنش‌ها را در اطراف تونل دستخوش تغییر سازد. مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات بین‌المللی گسترده‌ای به بررسی تأثیر هم‌زمان بارهای دینامیکی و هیدرولیکی بر رفتار تونل‌ها پرداخته‌اند. برای نمونه، Wang و همکاران (۲۰۲۵) و Yang و همکاران (۲۰۲۵) با مدلسازی عددی نشان دادند که افزایش سختی پوشش و طراحی مناسب زهکشی می‌تواند ممان خمشی را در شرایط دینامیکی تا ۳۰ درصد کاهش دهد. همچنین، (Liu و Zhu, ۲۰۲۲) تأثیر فشار داخلی آب بر نیروهای داخلی پوشش تونل‌های هیدرولیکی را بررسی کرده و گزارش نمودند که افزایش فشار آب از صفر تا ۲ مگاپاسکال، ممان خمشی را در تاج تونل به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

در مطالعه‌ای دیگر، (Oreste, Han, 2023) نقش نیروی شناوری ناشی از محیط اشباع را بر تنش‌های خمشی و برشی ارزیابی کرده و دریافتند که چگالی بالای محیط اشباع، موجب افزایش قابل توجه ممان خمشی مثبت و نیروی برشی در پوشش می‌شود. به‌طور مشابه، Feng و همکاران (۲۰۲۴) با تلفیق داده‌های میدانی و تحلیل عددی نشان دادند که افزایش تراز آب زیرزمینی می‌تواند نیروی برشی داخلی را تا ۱/۵ برابر مقدار طراحی افزایش دهد. همچنین، Min و همکاران (۲۰۲۵) به این نتیجه دست یافتند که فشارهای هیدرواستاتیکی بالا علاوه بر افزایش تغییرشکل‌ها، موجب بروز ترک‌های خمشی در تاج تونل می‌شود. در ایران نیز پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است. احمدی و حسامی در سال ۲۰۱۳، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS نشان دادند که بالا آمدن سطح آب زیرزمینی موجب افزایش نشست سطح زمین و تمرکز تنش‌های فشاری در پوشش می‌شود. (فهیمی، حیدری و زارعی، ۲۰۱۹) با روش نیمه‌تحلیلی مبتنی بر معیار Hoek-Brown، به کاهش تنش‌های مؤثر و افزایش ممان خمشی در تاج تونل در حضور آب زیرزمینی اشاره کردند. همچنین Rajayi و همکاران (۲۰۲۴) با تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مقاومتی خاک، نشان دادند که تغییرپذیری طبیعی این پارامترها می‌تواند تا ۲۰ درصد در برآورد نیروی برشی تأثیرگذار باشد. باوجود تلاش‌های یادشده، بررسی‌های داخلی کمتر به تحلیل تلفیقی اثرات هم‌زمان شرایط استاتیکی، دینامیکی و فشار آب زیرزمینی بر نیروهای خمشی و برشی در نقاط مختلف پوشش تونل پرداخته‌اند و بیشتر بر

پایداری کلی یا نشست سطحی متمرکز بوده‌اند. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام مطالعات عددی جامع‌تر با در نظر گرفتن ترازهای مختلف آب زیرزمینی و عمق‌های گوناگون قرارگیری تونل را آشکار می‌سازد. از این رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش المان محدود در نرم‌افزار PLAXIS 2D، به منظور بررسی کمی و کیفی تأثیر پنج تراز متفاوت آب زیرزمینی بر نیروی برشی و ممان خمشی در چهار نقطه کلیدی پوشش تونل (تاج، کف، راست و چپ) در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی و در چهار عمق مختلف انجام شده است. نوآوری این تحقیق در بررسی هم‌زمان اثرات تغییرات تراز آب زیرزمینی و عمق قرارگیری تونل بر توزیع نیروهای داخلی، با تأکید بر شناسایی حساسترین نقاط پوشش در برابر بارهای لرزه‌ای و هیدرواستاتیکی است که می‌تواند راهگشای طراحان در بهینه‌سازی پوشش تونل‌های واقع در مناطق با سطح آب بالا باشد. با وجود تلاش‌ها، پژوهش‌های داخلی کمتر به بررسی تلفیقی اثرات استاتیکی، دینامیکی و فشار آب زیرزمینی بر رفتار خمشی و برشی تونل‌ها پرداخته‌اند و عمدتاً بر پایداری کلی یا نشست تمرکز داشته‌اند. این خلأ پژوهشی لزوم انجام مطالعات عددی دقیق‌تر را آشکار می‌سازد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش المان محدود در نرم‌افزار PLAXIS، اثر سطح آب زیرزمینی بر رفتار دینامیکی تونل‌ها بررسی شده است. نوآوری تحقیق حاضر در ترکیب دو جنبه کلیدی است: نخست، بررسی تغییرات فشار منفذی و سطح آب در پایداری لرزه‌ای؛ و دوم، تحلیل عددی دینامیکی با رویکردی دقیق نسبت به اندرکنش خاک و سازه. پژوهش‌های داخلی کمتر به بررسی تلفیقی اثرات استاتیکی، دینامیکی و فشار آب زیرزمینی بر رفتار خمشی و برشی تونل‌ها پرداخته‌اند و عمدتاً بر پایداری کلی یا نشست تمرکز داشته‌اند. این خلأ پژوهشی لزوم انجام مطالعات عددی دقیق‌تر را آشکار می‌سازد.

۲- پیشینه تحقیق

طراحی سازه‌های زیرزمینی، به‌ویژه تونل‌ها، مستلزم درک دقیق رفتار پوشش بتنی تحت اثرات هم‌زمان بارهای استاتیکی، دینامیکی و فشارهای آب زیرزمینی است. ممان خمشی و نیروی برشی از مهم‌ترین شاخص‌های مکانیکی در ارزیابی عملکرد سازه‌ای تونل‌ها محسوب می‌شوند و تعیین دقیق آن‌ها در تحلیل پایداری، خستگی مصالح و طراحی بهینه‌ی پوشش نقش تعیین‌کننده دارد. وجود آب زیرزمینی می‌تواند با تغییر در فشار منفذی و تنش‌های مؤثر پیرامون تونل، الگوی توزیع نیروها و

تراز آب زیرزمینی می‌تواند نیروی برشی داخلی را تا ۱,۵ برابر مقدار طراحی افزایش دهد (Zhongju Feng et al., 2024). در مطالعه‌ی جدید (Min, X et al 2025)، عملکرد پوشش تونل‌ها در محیط‌های دارای آب زیاد بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که فشارهای هیدرواستاتیکی بالا علاوه بر افزایش تغییرشکل‌ها، موجب بروز ترک‌های خمشی در تاج تونل می‌شود. ممان خمشی مثبت در این شرایط تا حدود ۲۵۱ کیلونیوتن بر متر گزارش شد.

پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۲ نیز نشان داد که در سنگ‌های ضعیف و نیمه‌اشباع، تغییر تدریجی فشار آب زیرزمینی موجب افزایش ممان خمشی در ناحیه‌ی spring-line و کاهش مقاومت مؤثر سنگ در برابر خمش می‌شود (Tarifard, A., Görög, P. & Török 2022).

در مجموع، مطالعات جهانی تأکید دارند که اثر هم‌زمان فشار آب و بار دینامیکی سبب تمرکز تنش‌ها و افزایش چشمگیر نیروهای خمشی و برشی در پوشش تونل‌ها می‌شود و طراحی بهینه باید بر اساس مدل‌های عددی هیدرومکانیکی صورت گیرد. در ایران نیز مطالعاتی در زمینه‌ی تحلیل عددی تونل‌ها با لحاظ اثر آب زیرزمینی انجام شده است.

Hesami & Ahmadi (2013) با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS نشان دادند که بالا آمدن سطح آب زیرزمینی موجب افزایش نشست سطح زمین و تمرکز تنش‌های فشاری در پوشش می‌شود. (Fahimi-Heidari & Zarei (2019) با روش نیمه‌تحلیلی و معیار Hoek-Brown نشان دادند که در حضور آب زیرزمینی، تنش‌های مؤثر کاهش یافته و ممان خمشی در تاج تونل افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ی (Rajayi et al. (2024 اثر عدم قطعیت در پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک) بر پاسخ عددی پوشش بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییرپذیری طبیعی پارامترهای خاک می‌تواند تا ۲۰ درصد در برآورد نیروی برشی تأثیرگذار باشد.

با وجود این تلاش‌ها، پژوهش‌های داخلی کمتر به بررسی تلفیقی اثرات استاتیکی، دینامیکی و فشار آب زیرزمینی بر رفتار خمشی و برشی تونل‌ها پرداخته‌اند و عمدتاً بر پایداری کلی یا نشست تمرکز داشته‌اند. این خلأ پژوهشی لزوم انجام مطالعات عددی دقیق‌تر را آشکار می‌سازد.

تنش‌های خمشی-برشی را به‌طور چشمگیری دگرگون سازد. از این رو، مطالعات عددی اخیر در سطح بین‌المللی عمدتاً بر بررسی اثر هم‌زمان نیروهای مکانیکی و هیدرولیکی بر رفتار تونل‌ها متمرکز بوده‌اند.

در ایران، پژوهش‌های اندکی اثر هم‌زمان بارگذاری دینامیکی و فشار منفذی را تحلیل کرده‌اند. بر این اساس، ضرورت دارد در پژوهش‌های آینده، تحلیل‌های عددی دوبعدی یا سه‌بعدی با مدل‌سازی کوپله‌ی جریان سیال-جامد و شرایط واقعی زمین‌شناسی انجام شود تا روابط دقیق میان ضخامت پوشش، فشار آب و نیروهای خمشی-برشی استخراج گردد.

در دهه‌ی اخیر، بررسی رفتار تونل‌ها در محیط‌های اشباع یا دارای سطح بالای آب زیرزمینی مورد توجه ویژه قرار گرفته است.

(Wang et al., 2025) و (Yang et al., 2025) با مدل‌سازی عددی دینامیکی تونل‌های سگمتی تحت بارگذاری قطار نشان دادند که افزایش سختی پوشش و طراحی زهکشی مناسب می‌تواند ممان خمشی را در شرایط دینامیکی تا ۳۰ درصد کاهش دهد. همچنین، تمرکز تنش در محل اتصالات سگمت‌ها بیشترین سهم را در ایجاد نیروی برشی دارد. (مطالعه‌ی Yueyue and Cheng 2022) تأثیر فشار آب داخلی بر نیروی داخلی پوشش تونل هیدرولیکی دایره‌ای تأثیر فشار داخلی آب بر نیروهای داخلی لاینینگ را تحلیل کرده است. نتایج نشان داد افزایش فشار آب از صفر تا ۲ مگاپاسکال، باعث افزایش دو برابری ممان خمشی و افزایش محسوس نیروی برشی در پایه تونل می‌شود. این اثر در تاج تونل شدیدتر بوده و بیانگر ضرورت طراحی پوشش مقاوم‌تر در نواحی با فشار آب بالا است. در پژوهش (Xin Han, Pierpaolo Oreste & Fei Ye (2023 نقش نیروی شناوری محیط اشباع بر تنش‌های خمشی و برشی بررسی شد. نتایج عددی نشان داد که محیط اشباع با چگالی بالا موجب افزایش ممان خمشی مثبت تا حدود ۱۰,۹۵ کیلونیوتن بر متر و نیروی برشی تا حدود ۳ MN می‌شود.

همچنین در مطالعه‌ی (Dengke Wang et al., 2022)، اندرکنش هیدرومکانیکی (Hydro-Mechanical Coupling) در کف تونل بررسی شد. این پژوهش نشان داد که افزایش فشار منفذی در دوره‌های بارگذاری دینامیکی منجر به افزایش ممان خمشی در کف و کاهش عمر مفید سازه می‌شود. با ترکیب داده‌های میدانی و تحلیل عددی نشان داد که بیشترین تغییرمکان جانبی و ممان خمشی در بخش «inverted arch» و نواحی تماس با محیط اشباع رخ می‌دهد. طبق یافته‌ها، افزایش

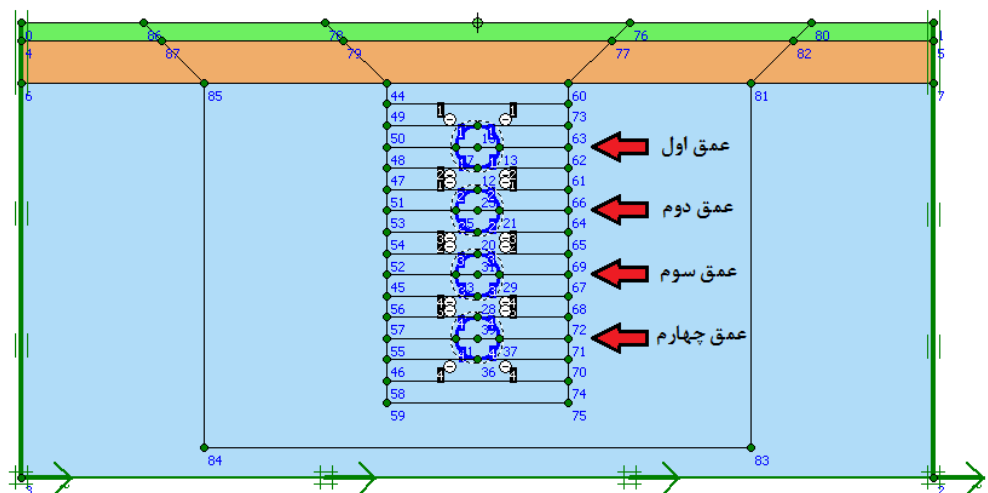
۳- روش تحقیق

در این مطالعه به بررسی عددی ممان خمشی و نیروی برشی در دو حالت استاتیکی و دینامیکی با تغییرات تراز آب زیرزمینی تحت اثر نیروی زلزله در تونل متروی شیراز پرداخته شده است. برای این منظور از مدل سازی عددی به روش اجزای محدود استفاده شد. مقدار حاصل از رفتارشناسی مهندسی تونل در ۴ نقطه ی تاج تونل، کف تونل و سمت راست و چپ تونل در حالت لرزه ای زمین لرزه ی منجیل و حالت غیرلرزه ای، تحت اثر هر یک از تغییرات عمق مدفون و تغییرات تراز آب زیرزمینی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. محل قرارگیری تونل در ۴ عمق و تراز آب در ۵ سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. اعماق در نظر گرفته شده برای مرکز تونل از سطح زمین به ترتیب برابر با ۲۰/۵، ۳۱، ۴۱/۵ و ۵۲ متری می باشد. در هر کدام از اعماق مورد بررسی، ۵ سطح متفاوت برای تراز آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است که عبارت اند از؛ تراز آب در فاصله ی ۲ برابر شعاع تونل بالای مرکز تونل، تراز آب در فاصله ی یک برابر شعاع تونل بالای مرکز تونل، تراز آب در مرکز تونل، تراز آب در فاصله ی یک برابر شعاع تونل پایین مرکز تونل و تراز آب در فاصله ی ۲ برابر شعاع تونل پایین مرکز تونل. برای مدل سازی، از نرم افزار اجزاء محدود پلکسیس استفاده شد و تئوری کرنش صفحه ای و مدل رفتاری موهر-کلمب برای محیط خاکی منظور گردید و برای حصول دقت کافی در مدل سازی المان های مثلثی ۱۵ گره ای و شبکه بندی مناسب برای آنالیز صحیح مدنظر قرار گرفته شد. برای مدل سازی از پروفیل خاک مشخص با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) برای پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های مختلف خاک استفاده شد. همچنین بمنظور مدل سازی پوشش تونل از خصوصیت های ذکر شده در جدول (۲) استفاده شد و پس از آن با تغییر در پارامترهای مورد مطالعه، تاثیر هر کدام از پارامترها، در تغییرات رفتاری مهندسی تونل در فضای سنگی، مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدل سازی دقیق متناسب با فضای طبیعی تحت اثر انتشار امواج زلزله، مرزهای جانبی مدل به صورت جاذب انرژی زلزله در نظر گرفته شد که از انعکاس مجدد امواج پس از برخورد با مرزهای مدل، جلوگیری شود و به مرز پایینی مدل برای مدل سازی فضای لرزه ای در راستای افق به میزان ۱۰ سانتی متر جابجایی افقی اعمال شد. با توجه به جدول (۱)، ضریب درگیری سطح تماسی بین دو

سطح مختلف که در این جا سطح تماس بین خاک و بتن (پوشش تونل) را مدنظر قرار می دهد، در نظر گرفته شده است؛ مقدار این ضریب بستگی مستقیم به نوع خاک و نحوه ی اجرای سازه ی در تماس با خاک دارد. از آنجا که در این مطالعه ضریب درگیری سطح تماسی در تمامی حالات تاثیر یکسانی را ایفا می کند، لذا در نتیجه ی نهایی، تاثیر قابل توجهی ندارد.

۳-۱- معرفی پروژه

خط یک متروی اصفهان به عنوان نخستین خط فعال شبکه ریلی زیرزمینی این شهر، از شمال (ایستگاه قدس) تا جنوب (ایستگاه صفه) به طول تقریبی ۲۴ کیلومتر و با ۲۰ ایستگاه زیرزمینی در حال بهره برداری است. این مسیر از مناطق مرکزی و پرتراکم شهر عبور کرده و بخشی از آن در مجاورت رودخانه زاینده رود قرار دارد که این موضوع باعث پیچیدگی های ژئوتکنیکی ویژه ای در طراحی و اجرای تونل شده است، مطالعات زمین شناسی نشان می دهد که بستر زمین در محدوده ی مسیر مترو عمدتاً شامل لایه های آبرفتی جوان با ترکیبی از ماسه، سیلت و رس بوده و سطح آب زیرزمینی در برخی نقاط در عمق کمتر از ۵ متر از سطح زمین قرار دارد. مقاومت برشی پایین و احتمال روانگرایی در نواحی نزدیک به زاینده رود از جمله چالش های مهم ژئوتکنیکی این پروژه است. روش اجرای حفاری تونل در بخش عمده ای از مسیر با استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع (TBM) با قطر ۶٫۸ متر و پوشش سگمنت بتنی پیش ساخته انجام شده است. در نواحی محدود با خاک های سست تر و در مجاورت سازه های سطحی حساس، روش NATM (روش تونل سازی جدید اتریشی) به کار گرفته شده تا کنترل دقیق تری بر تغییر شکل ها صورت گیرد. برای تحلیل و بررسی پژوهش حاضر، از نرم افزار PLAXIS 2D استفاده شد. مدل سازی بر اساس شرایط واقعی خاک و پارامترهای به دست آمده از آزمایش های صحرایی و آزمایش سه محوره در آزمایشگاه انجام شد. مدل رفتاری خاک از نوع Mohr-Coulomb در نظر گرفته شد. عملیات اجرایی خط ۲ متروی اصفهان از ابتدای سال ۱۳۹۸ آغاز و حفاری تونل ها از شمال شرق توسط دو دستگاه به قطر ۵/۶ متری و از غرب توسط یک دستگاه با قطر ۵/۹ متری انجام خواهد شد.



شکل ۱. قرارگیری تونل در عمق‌های مختلف

جدول ۱. مولفه‌های ژئوتکنیکی برای لایه‌های مختلف خاک در پروژه مورد نظر (تونل متروی اصفهان)

R_{inter}	ν	γt	E_m	Φ	C	عمق لایه	لایه بندی خاک
		(kN/m^3)	(kN/m^2)	(درجه)	(kN/m^2)	(متر)	
۰/۰۱	۰/۳	۲۰	۲×10^4	۲۵	۱۵	۳	خاک دستی (لایه اول)
۰/۳	۰/۳	۲۱	$۶/۵ \times 10^4$	۳۵	۵۰	۷	بخش آبرفتی (لایه دوم)
۰/۷	۰/۳	۲۶	۱۲۵×10^4	۴۰	۱۱۰	۶۵	بخش سنگی (لایه سوم)

Φ , C , E_m , γt و R_{inter} به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول شکل پذیری، وزن مخصوص، نسبت پواسون و ضریب اندرکنش توده خاک می باشند.

جدول ۲. مشخصات پوشش تونل برای مدلسازی پژوهش.

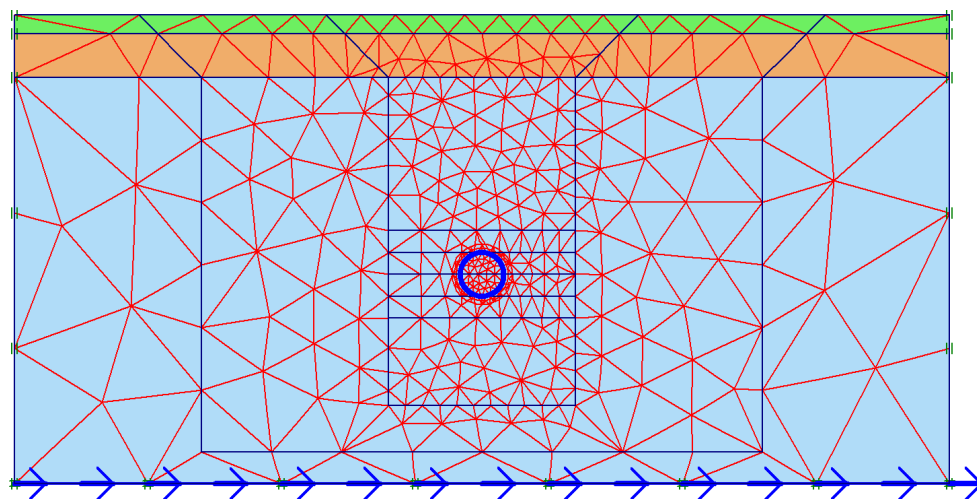
ν	D	W	EA	EI	E	عضو سازه ای
	(m)	($kN/m/m$)	(kN/m)	(kNm^2/m)	(MPa)	
۰/۱۵	۰/۳۵	۸/۴	$۱/۲۰۷ \times 10^7$	$۱/۲۴۲ \times 10^9$	۳۴۵۰۰	پوشش تونل

E مدول الاستیک، EA سختی فشاری-کششی، EI سختی خمشی، w وزن در واحد طول، d ضخامت، ν نسبت پواسون

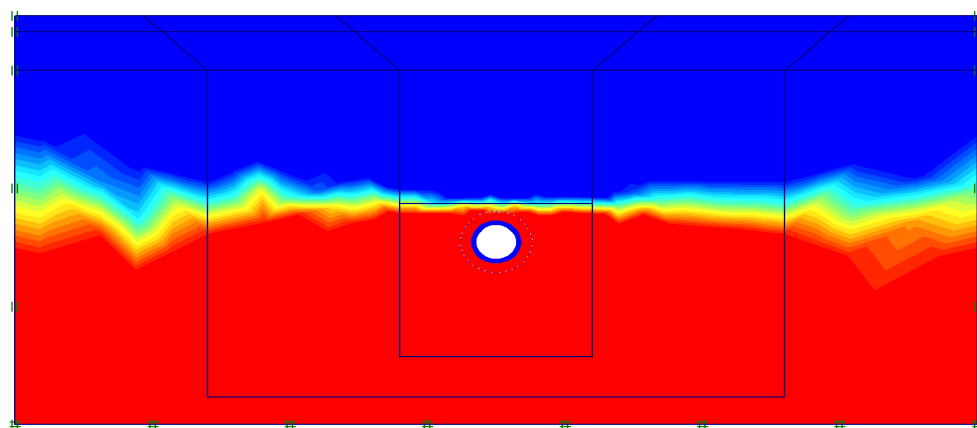
دورتر می باشد. دلیل این نوع شبکه بندی، تمرکز دقت تحلیل نرم افزار پلکسیس در نواحی نزد یک به الحان های تونل می باشد. در مدلسازی های انجام شده تعداد الحان ها و تعداد نقاط در نظر گرفته شده برای مدلسازی به ترتیب در حدود ۷۰۰ الحان و ۱۴۰۰ نقطه می باشد.

همچنین اندازه ی متوسط هر کدام از الحان ها در فضای مدلسازی در حدود ۴ متر در نظر گرفته شده است.

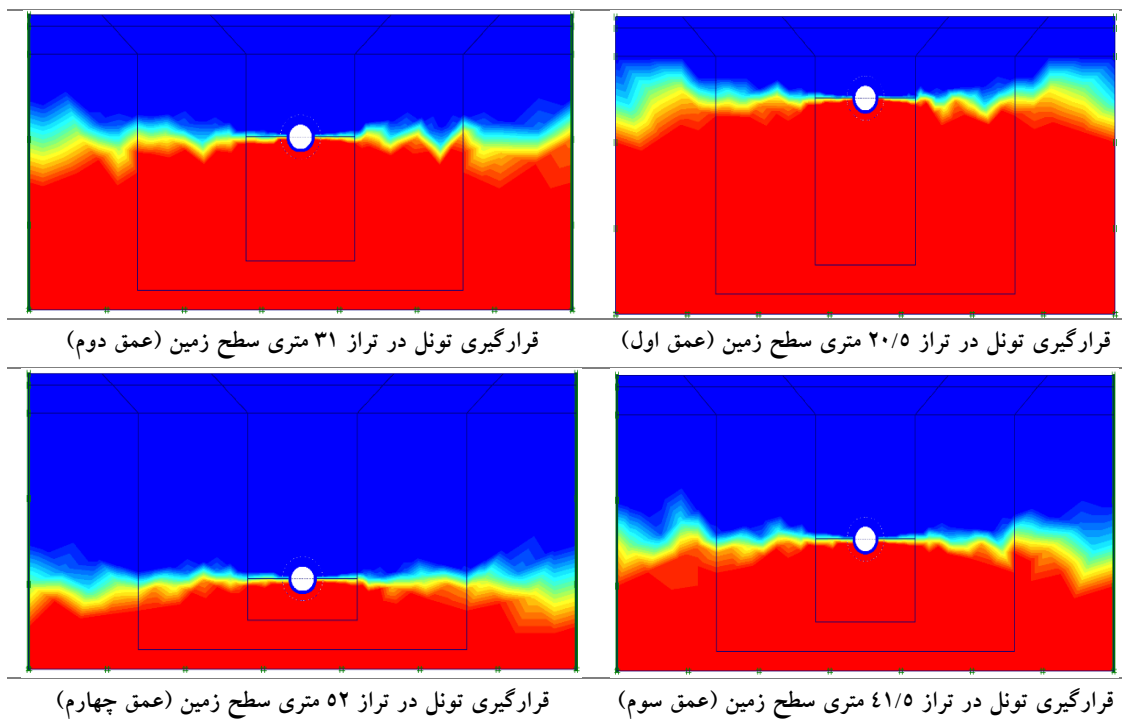
از آنجا که یکی از مهمترین عوامل در مسائل اجزای محدود نحوه ی شبکه بندی محیط مورد بررسی می باشد، ایجاد یک شبکه بندی مناسب نقش موثری در حل مسأله دارد. باید توجه داشت که الزاماً با ریزتر کردن شبکه بندی، جواب دقیق تری حاصل نمی شود و گاهی در این حالت خطاهای بسیار مشهودی مشاهده می شود. در این مطالعه برای افزایش دقت مدل سازی، محیط اطراف تونل دارای شبکه بندی ریزتری نسبت به نواحی



شکل ۲. مش بندی محیط مدل شده در نرم افزار Plaxis



شکل ۳. درجه ی اشباع در مدل مورد بررسی در حالت هیدرواستاتیک



قرارگیری تونل در تراز ۳۱ متری سطح زمین (عمق دوم)

قرارگیری تونل در تراز ۲۰/۵ متری سطح زمین (عمق اول)

قرارگیری تونل در تراز ۵۲ متری سطح زمین (عمق چهارم)

قرارگیری تونل در تراز ۴۱/۵ متری سطح زمین (عمق سوم)

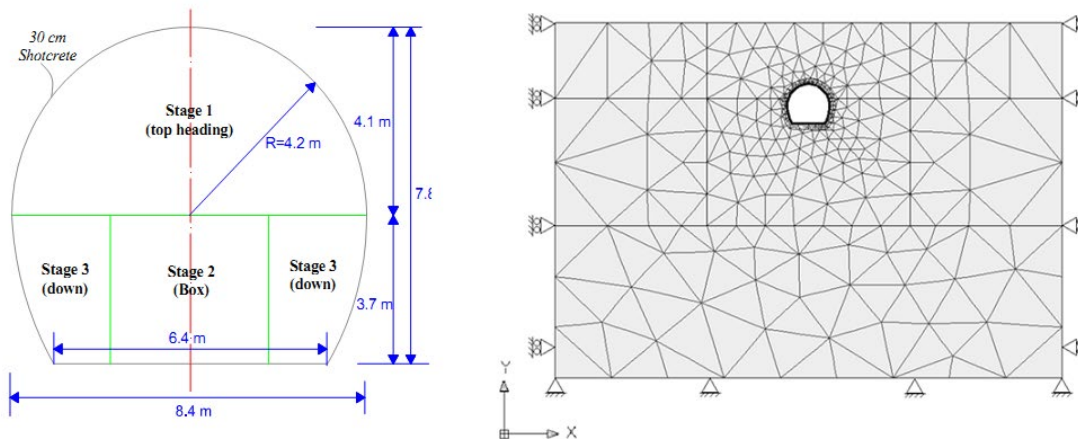
شکل ۴. درجه ی اشباع زمین در قرارگیری تونل در ترازهای متفاوت با تراز آب زیرزمینی در مرکز تونل

۲-۳- صحت‌سنجی نرم‌افزار

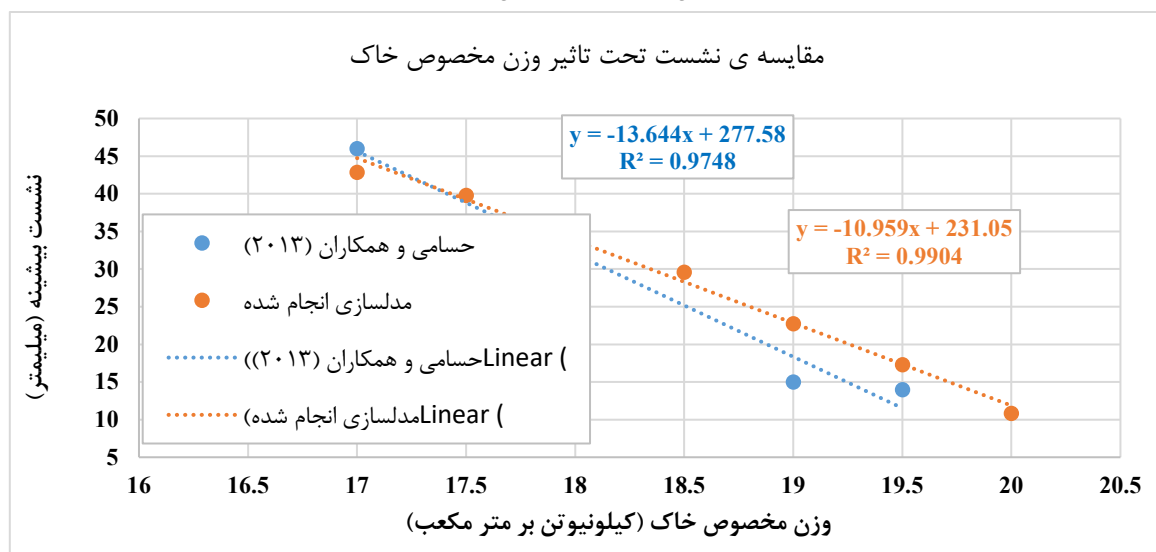
آنچه مشخص است، داده‌های حاصل از یک تحلیل عددی باید مورد اعتبارسنجی قرار گیرند. برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته‌شده با داده‌های مطالعات (Hesami, et al., 2013) استفاده شد.

هندسه مدل تحلیل شده توسط این محقق در شکل (۷) ارائه شده است. این محققان در پژوهش خود به بررسی نشست سطح زمین

ناشی از تونل‌زنی پرداختند. نتایج بدست آمده از این پژوهش و مدلسازی شده توسط پلکسیس مورد استفاده در پژوهش حاضر در نمودار (۱) آورده شده است. در این بخش مدل موجود در مرجع (Hesami et al., 2013) مجدداً توسط نرم افزار پلکسیس دوبعدی مدل سازی شد. با مقایسه نتایج مشخص شد که حداکثر اختلاف بین نتایج از ۲۰ میلی‌متر تجاوز نمی‌کند، پس مدل مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند مورد اعتماد باشد.



شکل ۵. هندسه مدل تحلیل شده



نمودار ۱. مقایسه نشست سطح زمین تحت تاثیر تغییرات چسبندگی خاک

۴- بحث

۴-۱- بررسی نیروی برشی در پوشش تونل

همانطور که داده‌های مربوطه در جدول (۳) آمده است، با توجه به مطالعات انجام شده، مشاهده می‌شود که نیروی برشی در تاج

تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می‌یابد. نیروی برشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

جدول ۳. مقادیر نیروی برشی ی نقاط مورد بررسی در اعماق و ترازهای متفاوت آب زیرزمینی (کیلونیوتن)

عمق قرارگیری تونل		۲ برابر شعاع پایین مرکز تونل		۱ برابر شعاع پایین مرکز تونل		بر روی مرکز تونل		۱ برابر شعاع بالای مرکز تونل		۲ برابر شعاع بالای مرکز تونل	
استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی
تاج تونل											
عمق اول	-۲۰/۵	۰/۵	۶/۵	۰/۵	۶/۰	۰/۶	۶/۲	۰/۴	۴/۷	۰/۷	۱/۱
سطح											
عمق دوم	-۳۱	۲/۹	۴۷/۱	۳/۰	۴۷/۲	۲/۵	۳۸/۴	۲/۲	۳۶/۸	۲/۵	۳۵/۱
سطح											
عمق سوم	-۴۱/۵	۳/۷	۳۴/۲	۳/۶	۲۶/۷	۳/۶	۳۳/۰	۲/۶	۳۰/۳	۳/۹	۲۹/۹
سطح											
عمق چهارم	-۵۲	۳/۷	۲۴/۳	۳/۴	۱۷/۵	۳/۶	۳۳/۷	۳/۹	۳۴/۴	۳/۸	۲۶/۳
سطح											
راست تونل											
عمق اول	-۲۰/۵	۱۲/۳	۳۸/۹	۱۱/۲	۳۸/۳	۱۲/۷	۴۲/۷	۱۱/۸	۴۲/۱	۱۲/۶	۴۱/۸
سطح											
عمق دوم	-۳۱	۱۰/۶	۲۳/۲	۱۱/۳	۳۳/۰	۱۰/۷	۳۸/۴	۱۱/۵	۳۲/۰	۱۰/۹	۲۱/۸
سطح											
عمق سوم	-۴۱/۵	۲۸/۱	۳۷/۹	۲۸/۱	۳۱/۴	۲۶/۳	۲۹/۷	۲۶/۲	۲۶/۶	۲۳/۶	۲۴/۱
سطح											
عمق چهارم	-۵۲	۳۶/۲	۵۸/۶	۳۶/۴	۳۹/۰	۳۵/۲	۳۵/۳	۳۶/۷	۲۴/۶	۳۶/۵	۲۹/۷
سطح											
کف تونل											
عمق اول	-۲۰/۵	۰/۴	۳/۳	۱/۵	۶/۳	۰/۲	۶/۵	۰/۲	۴/۸	۰/۱	۶/۷
سطح											
عمق دوم	-۳۱	۲/۶	۷/۹	۳/۵	۱۷/۵	۲/۷	۱/۲	۲/۸	۸/۱	۲/۴	۲/۱
سطح											
عمق سوم	-۴۱/۵	۲/۷	۵/۶	۳/۷	۲۷/۲	۲/۸	۱۷/۴	۳/۱	۲۹/۶	۳/۰	۳۰/۰
سطح											
عمق چهارم	-۵۲	۲/۸	۵۱/۸	۳/۴	۷۳/۵	۲/۸	۳۸/۶	۲/۹	۴۹/۷	۲/۸	۵۹/۵
سطح											
چپ تونل											
عمق اول	-۲۰/۵	۱۲/۰	۳۱/۲	۱۲/۳	۲۵/۰	۱۲/۱	۲۰/۳	۱۲/۵	۲۱/۳	۱۲/۴	۲۴/۷
سطح											
عمق دوم	-۳۱	۹/۸	۲۱/۳	۱۲/۱	۲۹/۸	۱۰/۷	۴۳/۹	۱۲/۳	۲۲/۱	۹/۸	۱۲/۸
سطح											
عمق سوم	-۴۱/۵	۲۸/۷	۳۱/۲	۲۷/۰	۳۱/۴	۲۵/۷	۲۵/۳	۲۸/۷	۳۰/۹	۲۴/۴	۲۲/۰
سطح											
عمق چهارم	-۵۲	۳۵/۸	۳۸/۱	۳۷/۷	۳۹/۹	۳۶/۸	۴۲/۲	۳۷/۹	۴۰/۲	۳۷/۱	۳۸/۷
سطح											

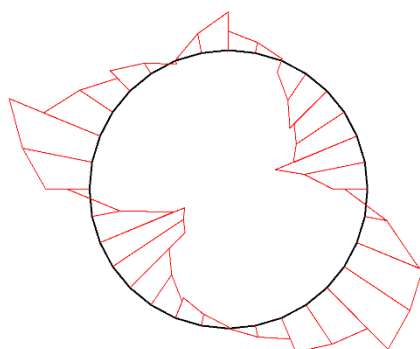
تمامی اعداد بیان شده در جدول بر حسب کیلونیوتن می‌باشند.

ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص نیروی برشی در شرایط استاتیکی مشاهده نمی‌شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر دینامیکی در عمق سوم و چهارم با کاهش تراز آب زیرزمینی، افزایش می‌یابد. بعلاوه نیروی برشی در کف تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می‌یابد. نیروی برشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است

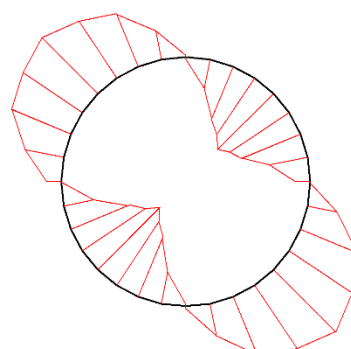
لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص نیروی برشی در شرایط استاتیکی مشاهده نمی‌شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر در حالت دینامیکی با کاهش تراز آب، نیروی برشی افزایش می‌یابد. همچنین نیروی برشی در سمت راست تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می‌یابد. نیروی برشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد. لازم به

تغییرات عمق قرارگیری تونل در شرایط استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. نمودارهای مربوط به تغییرات بیان شده در مورد نیروی برشی در نمودار ۲ تا نمودار ۵ نشان داده شده است. همانطور که از داده های ترسیم شده در نمودار مشخص می شود، با افزایش عمق مدفون تونل، نرخ تغییرات در حالت استاتیکی و دینامیکی روند یکنواختی را نشان نمی‌دهد. در بررسی نیروی برشی بیشترین نرخ تغییرات مربوط کف تونل و در عمق اول می‌باشد که در حدود ۲۷۰۰ درصد محاسبه شده است. همانطور که در شکل مربوطه نیز آمده است، به دلیل مقدار عددی بسیار پایین در این حالت، نرخ تغییرات محاسباتی تحت تاثیر اختلاف ایجاد شده در مقادیر نیروی برشی، مقدار بسیار زیادی را نشان می‌دهد.

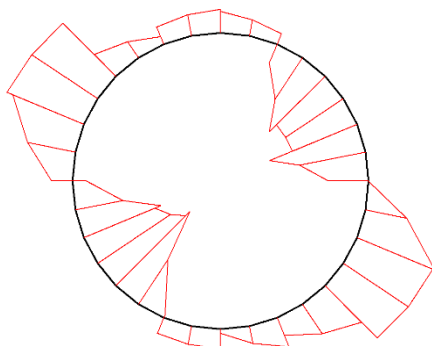
در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص نیروی برشی در شرایط استاتیکی مشاهده نمی شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر در حالت دینامیکی بیشتر و به صورت نامنظم می‌باشد. مشابه سایر نقاط مذکور، نیروی برشی در سمت چپ تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می‌یابد. نیروی برشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر نسبتاً بیشتری را از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص نیروی برشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مشاهده نمی‌شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر در حالت دینامیکی بیشتر می‌باشد. از بین نقاط مورد بررسی در پوشش تونل، نقاط طرفین تونل حساس ترین نقاط در برابر تغییرات نیروی برشی تحت اثر



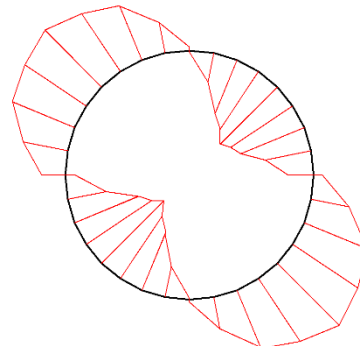
نیروی برشی (دینامیکی) در تراز ۳۱ متری سطح زمین



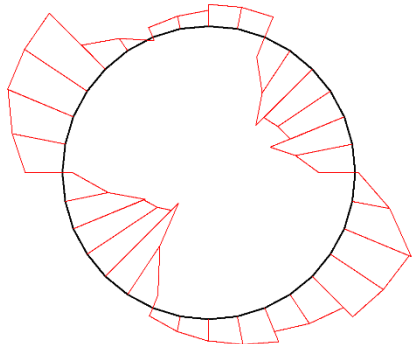
نیروی برشی (استاتیکی) در تراز ۳۱ متری سطح زمین



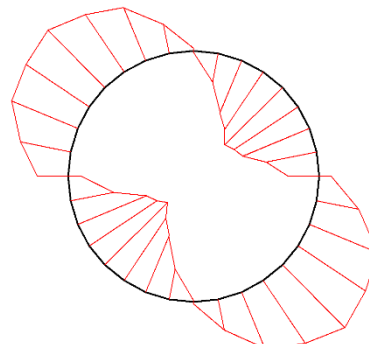
نیروی برشی (دینامیکی) در تراز ۴۱/۵ متری سطح زمین



نیروی برشی (استاتیکی) در تراز ۴۱/۵ متری سطح زمین

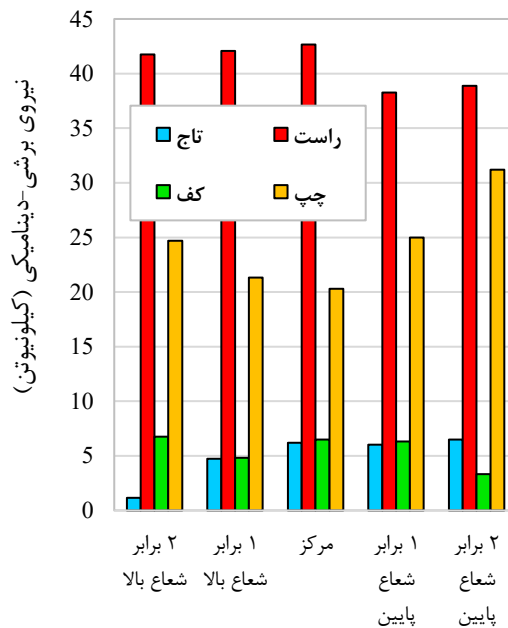
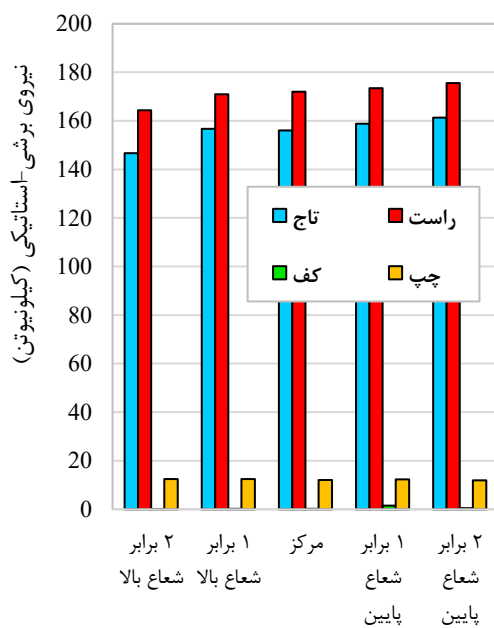


نیروی برشی (دینامیکی) در تراز ۵۲ متری سطح زمین



نیروی برشی (استاتیکی) در تراز ۵۲ متری سطح زمین

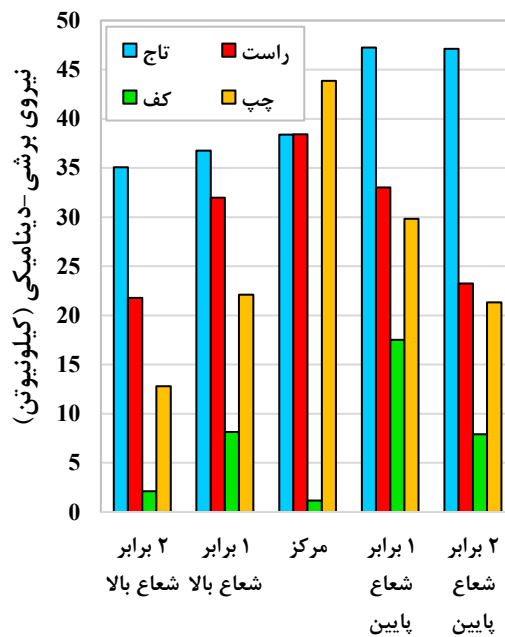
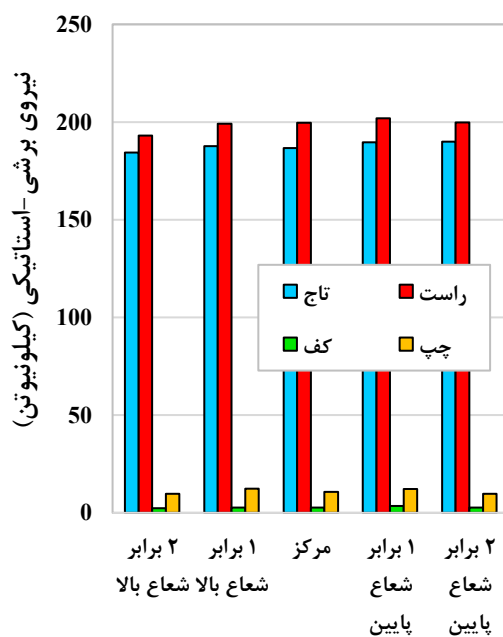
شکل ۶. نیروی برشی تونل با قرارگیری در ترازهای متفاوت و استقرار تراز آب زیرزمینی در مرکز تونل



تراز آب نسبت به مرکز تونل

تراز آب نسبت به مرکز تونل

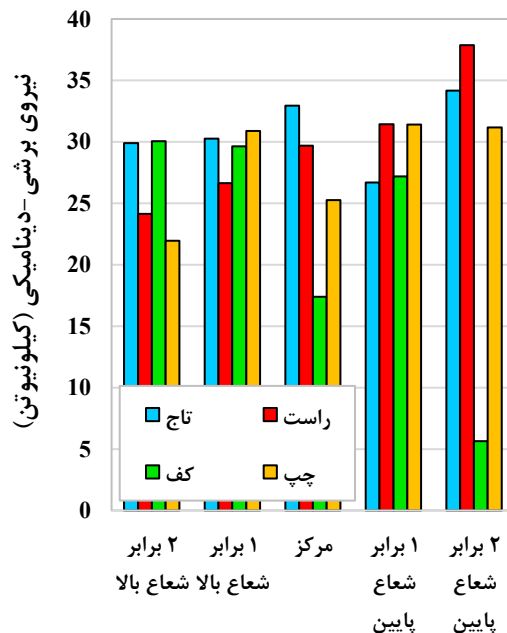
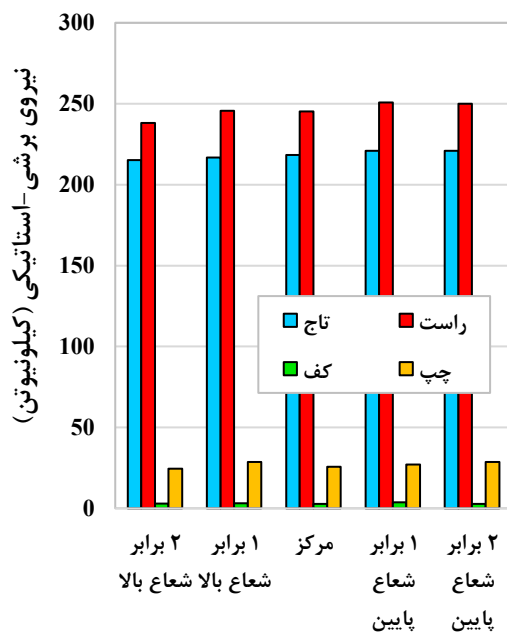
نمودار ۲. نیروی برشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق اول



تراز آب نسبت به مرکز تونل

تراز آب نسبت به مرکز تونل

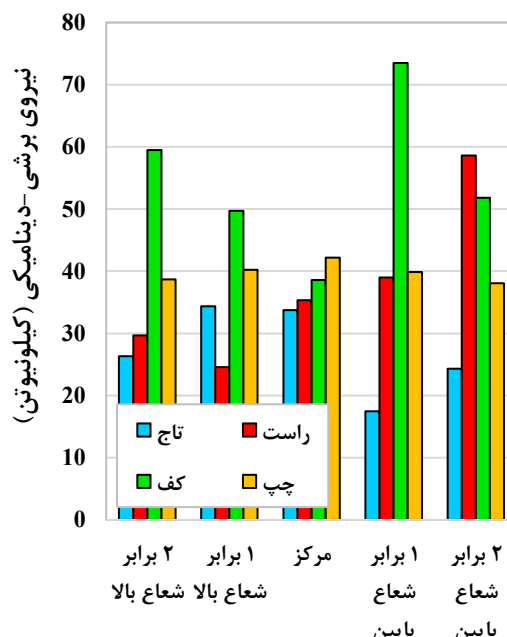
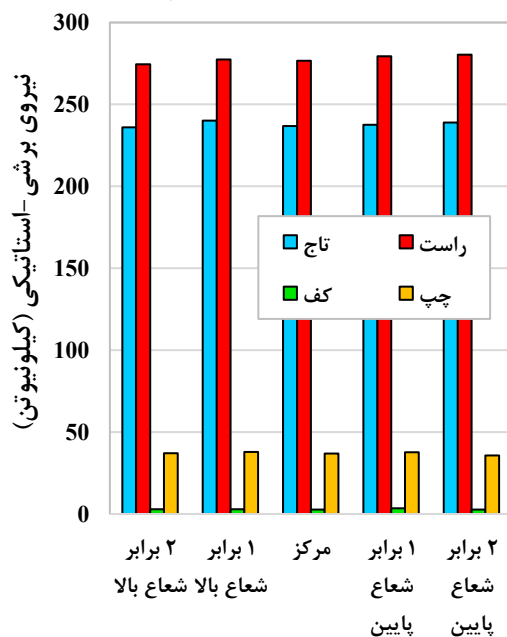
نمودار ۳. نیروی برشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق دوم



تراز آب نسبت به مرکز تونل

تراز آب نسبت به مرکز تونل

نمودار ۴. نیروی برشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق سوم



تراز آب نسبت به مرکز تونل

تراز آب نسبت به مرکز تونل

نمودار ۵. نیروی برشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق چهارم

این نتایج بیانگر آن است که آب زیرزمینی با ایجاد نیروی شناوری، بخشی از تنش‌های جانبی را خنثی کرده و موجب تعدیل پاسخ برشی می‌شود.

در حالت دینامیکی، نیروی برشی در پوشش تونل نسبت به حالت استاتیکی افزایش نشان داد، ولی در حضور آب زیرزمینی شدت آن کاهش یافت. بیشترین نیروی برشی در تاج تونل در حالت خشک حدود $(1,05 \times 10^3, \text{kN/m})$ بود که در حالت اشباع به $(6,4 \times 10^2, \text{kN/m})$ رسید.

۲-۴ بررسی ممان خمشی در پوشش تونل

همانطور که داده های مربوطه در جدول (۴) آمده است، با توجه به مطالعات انجام شده، مشاهده می شود که ممان خمشی در تاج تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می یابد.

جدول ۴. مقادیر ممان خمشی نقاط مورد بررسی در اعماق و ترازهای متفاوت آب زیرزمینی (کیلونیوتن متر)

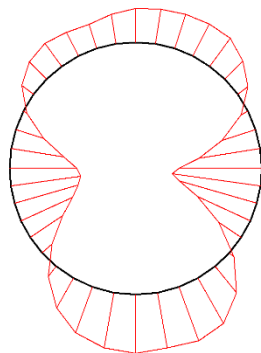
عمق قرارگیری تونل		۲ برابر شعاع پایین مرکز تونل		۱ برابر شعاع پایین مرکز تونل		بر روی مرکز تونل		۱ برابر شعاع بالای مرکز تونل		۲ برابر شعاع بالای مرکز تونل	
استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی	استاتیکی	دینامیکی
تاج تونل											
عمق اول	۲۰/۵- سطح	۱۶۱	۵۵	۱۵۹	۵۲	۱۵۶	۴۷	۱۵۷	۴۲	۱۴۷	۴۰
عمق دوم	۳۱- سطح	۱۹۰	۸۹	۱۹۰	۸۹	۱۸۷	۸۹	۱۸۸	۸۲	۱۸۴	۸۹
عمق سوم	۴۱/۵- سطح	۲۲۱	۱۲۵	۲۲۱	۱۲۵	۲۱۸	۱۲۴	۲۱۷	۱۱۹	۲۱۵	۱۴۰
عمق چهارم	۵۲- سطح	۲۳۹	۱۳۳	۲۳۸	۱۲۹	۲۳۷	۱۲۸	۲۴۰	۱۲۹	۲۳۶	۱۵۳
راست تونل											
عمق اول	۲۰/۵- سطح	۱۷۶	۱۲۶	۱۷۳	۱۲۵	۱۷۲	۱۱۴	۱۷۱	۱۱۰	۱۶۴	۹۸
عمق دوم	۳۱- سطح	۲۰۰	۱۷۶	۲۰۲	۱۸۰	۲۰۰	۱۶۸	۱۹۹	۱۶۹	۱۹۳	۱۶۳
عمق سوم	۴۱/۵- سطح	۲۵۰	۲۲۴	۲۵۱	۲۳۱	۲۴۵	۲۲۰	۲۴۶	۲۲۳	۲۳۸	۲۱۵
عمق چهارم	۵۲- سطح	۲۸۰	۲۳۴	۲۷۹	۲۴۷	۲۷۷	۲۳۹	۲۷۸	۲۳۱	۲۷۵	۲۲۱
کف تونل											
عمق اول	۲۰/۵- سطح	۱۷۹	۹۴	۱۷۸	۸۴	۱۷۵	۸۱	۱۷۴	۷۶	۱۶۷	۷۳
عمق دوم	۳۱- سطح	۲۰۱	۱۴۳	۲۰۵	۱۳۸	۱۹۹	۱۲۵	۲۰۱	۱۳۱	۱۹۶	۱۲۹
عمق سوم	۴۱/۵- سطح	۲۳۱	۱۵۳	۲۳۵	۱۴۳	۲۲۸	۱۲۹	۲۳۰	۱۴۰	۲۲۳	۱۳۴
عمق چهارم	۵۲- سطح	۲۵۰	۱۹۴	۲۵۳	۱۶۶	۲۴۷	۱۶۵	۲۵۰	۱۷۲	۲۴۵	۱۶۹
چپ تونل											
عمق اول	۲۰/۵- سطح	۱۷۵	۱۱۰	۱۷۳	۱۰۵	۱۷۲	۹۳	۱۷۱	۹۹	۱۶۵	۹۰
عمق دوم	۳۱- سطح	۲۰۱	۱۶۰	۲۰۰	۱۶۵	۲۰۰	۱۷۲	۲۰۵	۱۷۷	۱۹۳	۱۵۷
عمق سوم	۴۱/۵- سطح	۲۴۹	۲۲۹	۲۴۹	۲۳۷	۲۴۴	۲۱۷	۲۵۰	۲۴۴	۲۳۸	۲۱۹
عمق چهارم	۵۲- سطح	۲۷۹	۲۵۹	۲۸۰	۲۶۳	۲۷۷	۲۵۷	۲۸۲	۲۷۸	۲۷۵	۲۵۹

ممان خمشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر کمتری را از خود نشان می دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص ممان خمشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مشاهده نمی شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر دینامیکی تغییرات بیشتری را از خود نشان می دهد. همچنین ممان خمشی در سمت راست تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می یابد. ممان خمشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر

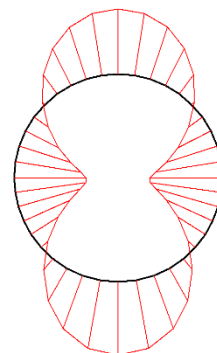
کمتری را از خود نشان می دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص ممان خمشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مشاهده نمی شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر دینامیکی بیشتر می باشد. بعلاوه ممان خمشی در کف تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می یابد. ممان خمشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر کمتری را از خود نشان می دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد

شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص ممان خمشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مشاهده نمی‌شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر در حالت دینامیکی با کاهش تراز آب زیرزمینی نسبتاً افزایش می‌یابد. مشابه سایر نقاط مذکور، ممان خمشی در سمت چپ تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می‌یابد. ممان خمشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر نسبتاً کمتری را از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص ممان خمشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مشاهده نمی‌شود ولیکن این تغییرات در مورد مقادیر در حالت دینامیکی بیشتر می‌باشد.

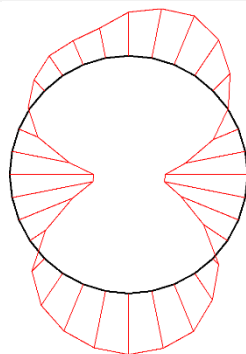
از بین نقاط مورد بررسی در پوشش تونل، نقاط طرفین تونل حساس ترین نقاط در برابر تغییرات ممان خمشی تحت اثر تغییرات عمق قرارگیری تونل در شرایط استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. نمودارهای مربوط به تغییرات بیان شده در مورد ممان خمشی در نمودار ۶ تا نمودار ۹ نشان داده شده است. همانطور که از داده‌های ترسیم شده در نمودار مشخص می‌شود، با افزایش عمق مدفون تونل، نرخ تغییرات در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی کاهش می‌یابد. به طوری که در بیشترین حالت که در تاج تونل و در عمق مدفون اول مشاهده می‌شود، نرخ تغییرات در حالت استاتیکی برابر با ۱۰ درصد و در حالت دینامیکی برابر با ۳۷ درصد می‌باشد.



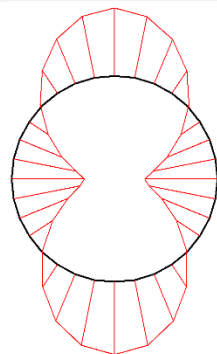
ممان خمشی (دینامیکی) در تراز ۲۰/۵ متری سطح زمین



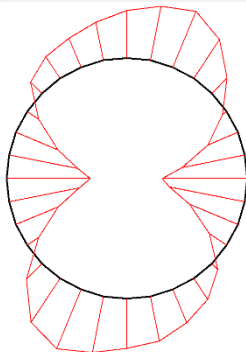
ممان خمشی (استاتیکی) در تراز ۲۰/۵ متری سطح زمین



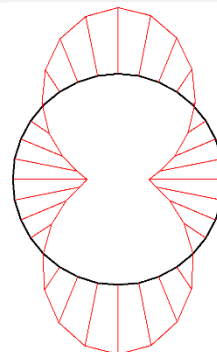
ممان خمشی (دینامیکی) در تراز ۳۱ متری سطح زمین



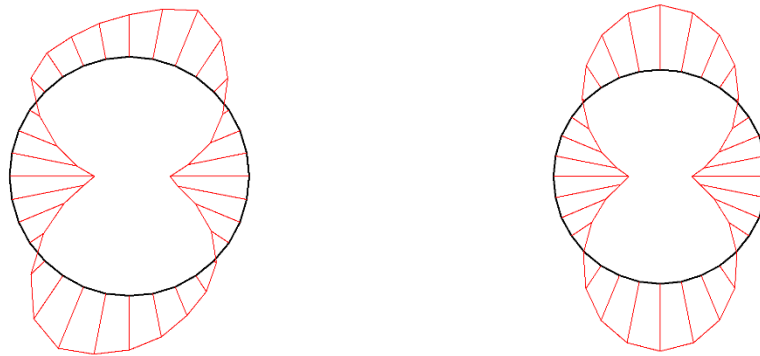
ممان خمشی (استاتیکی) در تراز ۳۱ متری سطح زمین



ممان خمشی (دینامیکی) در تراز ۴۱/۵ متری سطح زمین



ممان خمشی (استاتیکی) در تراز ۴۱/۵ متری سطح زمین

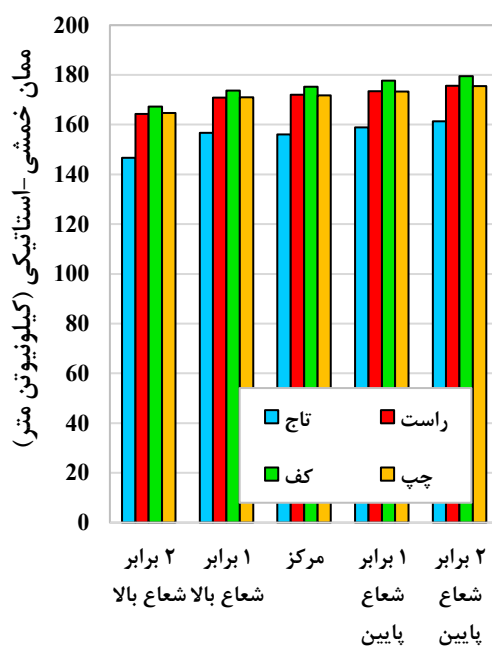


ممان خمشی (استاتیکی) در تراز ۵۲ متری سطح زمین ممان خمشی (دینامیکی) در تراز ۵۲ متری سطح زمین

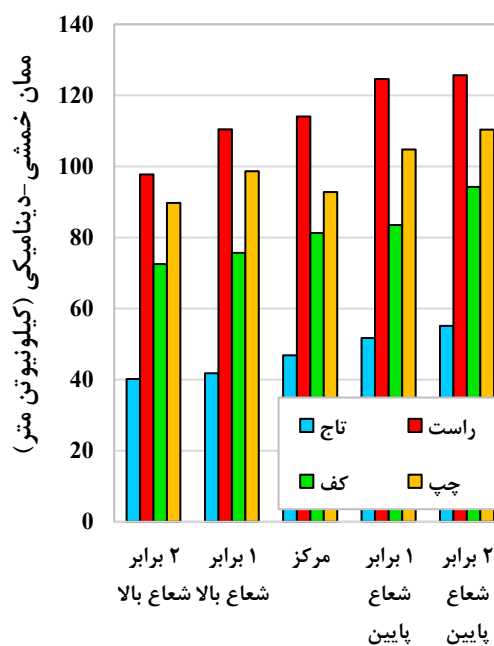
شکل ۷. ممان خمشی تونل با قرارگیری در ترازهای متفاوت و استقرار تراز آب زیرزمینی در مرکز تونل

این نتیجه مؤید آن است که حضور آب زیرزمینی باعث کاهش تمرکز تنش و افزایش انعطاف پذیری تونل می‌گردد. در عین حال، افزایش فشار منفذی منجر به توزیع یکنواخت‌تر نیروهای خمشی در پوشش شده است.

در بررسی ممان خمشی پوشش تونل نیز روند مشابهی مشاهده گردید. در حالت خشک، بیشترین مقدار ممان خمشی در تاج تونل به حدود $(8.5 \times 10^2, \text{kN} \cdot \text{m/m})$ رسید، در حالی که با افزایش سطح آب زیرزمینی، مقدار آن به $(5.2 \times 10^2, \text{kN} \cdot \text{m/m})$ کاهش یافت؛ یعنی حدود ۴۰ درصد افت نسبت به شرایط خشک.

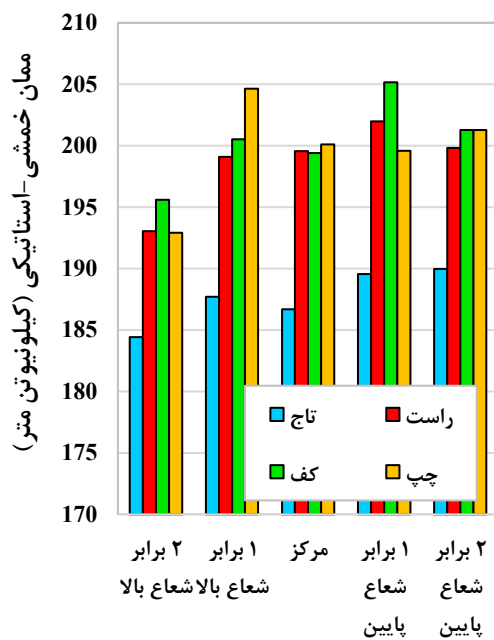


تراز آب نسبت به مرکز تونل

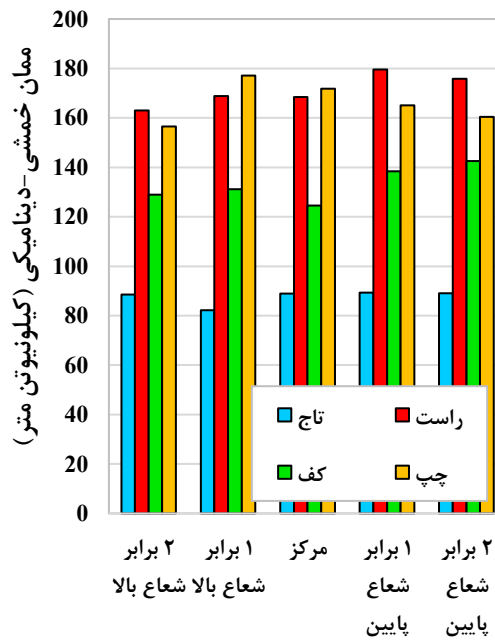


تراز آب نسبت به مرکز تونل

نمودار ۶. ممان خمشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداره ی تونل در عمق اول

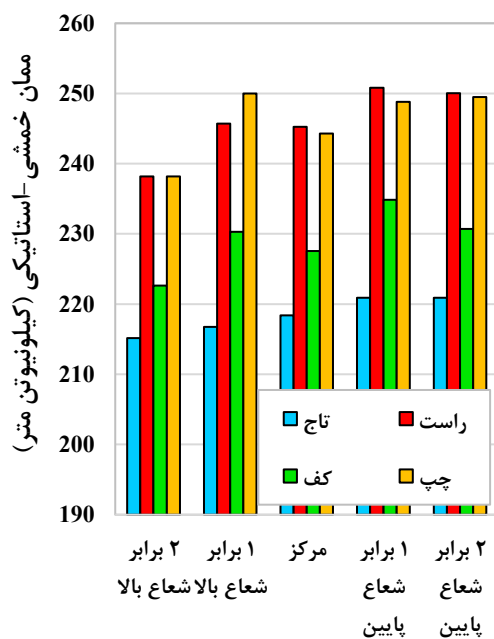


تراز آب نسبت به مرکز تونل

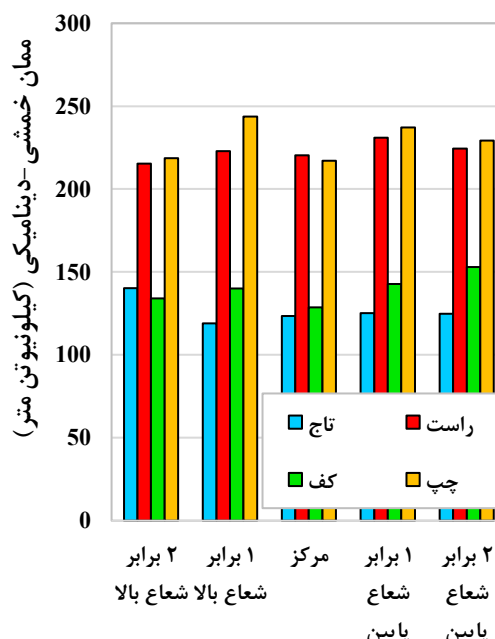


تراز آب نسبت به مرکز تونل

نمودار ۷. ممان خمشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق دوم

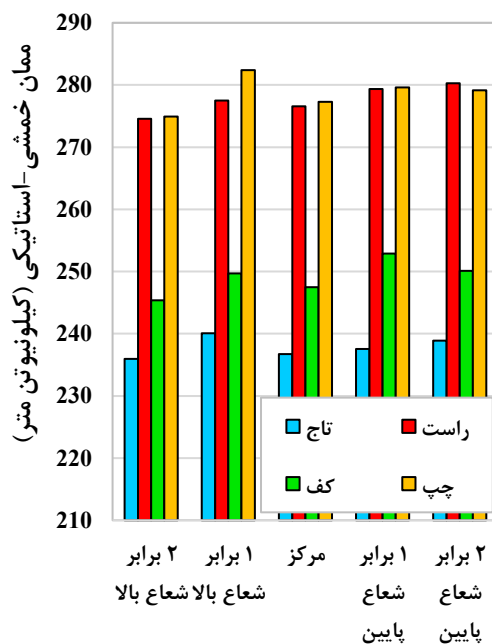


تراز آب نسبت به مرکز تونل

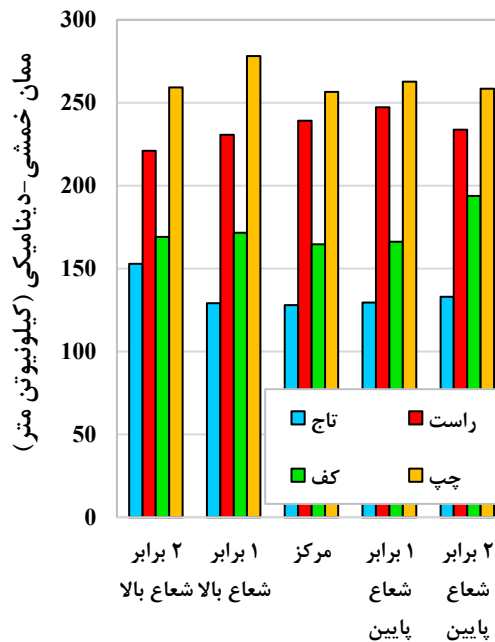


تراز آب نسبت به مرکز تونل

نمودار ۸. ممان خمشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق سوم



تراز آب نسبت به مرکز تونل



تراز آب نسبت به مرکز تونل

نمودار ۹. ممان خمشی در حالت استاتیکی و دینامیکی در جداری تونل در عمق چهارم

۳-۴- بحث بروی تحلیل ها و نمودارها

کوچک در پارامترهای مکانیکی خاک، به ویژه زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته، می تواند پاسخ لرزه ای را به میزان قابل توجهی تغییر دهد. بنابراین، استفاده از داده های دقیق آزمایشگاهی در مطالعات ژئوتکنیکی، شرط لازم برای تحلیل های عددی قابل اعتماد است.

شکل مفهومی تحلیل ها نشان می دهد که رفتار تونل از حالت خشک تا اشباع کامل تغییر چشمگیری دارد.

- در حالت خشک، تمرکز تنش در تاج و کف تونل بیشتر است.
- در حالت نیمه اشباع، توزیع تنش یکنواخت تر شده و دامنه تغییر شکل کاهش می یابد.

- در حالت اشباع کامل، فشار منفذی نقش میرایی طبیعی را ایفا می کند و موجب کاهش قابل توجه نیروهای درونی می شود.

به طور کلی، رفتار تونل در محیط اشباع را می توان به صورت رفتار انعطاف پذیر با میرایی بالا توصیف کرد، در حالی که تونل در محیط خشک، رفتاری سخت و ترد دارد که ممکن است تحت ارتعاشات شدید دچار ترک خوردگی موضعی شود.

افزایش فشار آب زیرزمینی باعث افزایش محسوس ممان خمشی و نیروی برشی در پوشش تونل می شود و نواحی تاج و کف بیشترین آسیب پذیری را دارند.

اندركش هیدرومکانیکی و حضور آب زیرزمینی می تواند پاسخ دینامیکی تونل را تغییر داده و موجب خستگی مصالح لاینیگ شود.

پس از انجام تحلیل های عددی در سه حالت مختلف تراز آب زیرزمینی، پاسخ های لرزه ای تونل در قالب نیروهای محوری، ممان خمشی، نیروی برشی و تغییر مکان های قائم و افقی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارائه شده در این بخش حاصل بیش از ۲۰ مرحله تحلیل عددی بوده و بیانگر رفتار تونل تحت اندركش پیچیده خاک، سازه و آب زیرزمینی در شرایط دینامیکی است. هدف از این تحلیل ها، درک چگونگی تأثیر سطح آب و فشار منفذی بر توزیع تنش ها و شکل پذیری لرزه ای پوشش تونل است. تحلیل نتایج عددی نشان می دهد که وجود آب زیرزمینی تأثیر دوگانه ای بر رفتار لرزه ای تونل ها دارد. از یک سو، حضور آب موجب کاهش تنش مؤثر و در نتیجه کاهش سختی محیط خاک می شود؛ از سوی دیگر، فشار منفذی ایجاد شده در توده خاک باعث تعدیل تنش ها و میرایی بخشی از انرژی لرزه ای می گردد. در محیط های نیمه اشباع، این دو اثر به صورت هم زمان وجود دارند و پاسخ تونل به شکل غیرفرزاینده تغییر می کند. کاهش نیروی محوری و ممان خمشی در شرایط اشباع نشان می دهد که آب زیرزمینی در واقع نقش ضربه گیر طبیعی را ایفا می کند. این ویژگی در خاک های ماسه ای متراکم بارزتر از خاک های رسی مشاهده شد. از دیدگاه مهندسی، می توان نتیجه گرفت که طراحی لرزه ای تونل ها باید با در نظر گرفتن تراز واقعی آب زیرزمینی صورت گیرد. در صورتی که تراز آب در محدوده تاج یا بالاتر از آن باشد، کنترل زهکشی و طراحی سیستم تخلیه فشار منفذی الزامی است تا از تغییر شکل های موضعی در کف تونل جلوگیری شود. تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات

۵- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش بر مبنای تحلیل عددی دینامیکی در نرم افزار PLAXIS و بررسی سه تراز مختلف آب زیرزمینی به دست آمده است. بر اساس یافته ها، نکات اصلی زیر قابل استنتاج است: نیروی برشی ایجاد شده در نقاط متفاوت تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می یابد. نیروی برشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر بیشتری را از خود نشان می دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص نیروی برشی در شرایط استاتیکی مشاهده نمی شود. از بین نقاط مورد بررسی در پوشش تونل، نقاط طرفین تونل حساس ترین نقاط در برابر تغییرات نیروی برشی تحت اثر تغییرات عمق قرارگیری تونل در شرایط استاتیکی و دینامیکی می باشد. همانطور که از داده های این مطالعه مشخص می شود، با افزایش عمق مدفون تونل، نرخ تغییرات در حالت استاتیکی و دینامیکی روند یکنواختی را نشان نمی دهد. در بررسی نیروی برشی بیشترین نرخ تغییرات مربوط کف تونل و در عمق اول می باشد. ممان خمشی ایجاد شده در نقاط متفاوت تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل افزایش می یابد. ممان خمشی ایجاد شده در شرایط دینامیکی نسبت به شرایط استاتیکی مقادیر نسبتاً کمتری را از خود نشان می دهد. لازم به ذکر است در اعماق متفاوت قرارگیری تونل، با تغییرات ایجاد شده در تراز آب زیرزمینی، تغییرات محسوسی در خصوص ممان خمشی در شرایط استاتیکی و دینامیکی مشاهده نمی شود. از بین نقاط مورد بررسی در پوشش تونل، نقاط طرفین تونل حساس ترین نقاط در برابر تغییرات ممان خمشی تحت اثر تغییرات عمق قرارگیری تونل در شرایط استاتیکی و دینامیکی می باشد. همانطور که از داده های پژوهش حاضر مشخص می شود، با افزایش عمق مدفون تونل، نرخ تغییرات در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی کاهش می یابد. به طوری که در بیشترین حالت که در تاج تونل و در عمق مدفون اول مشاهده می شود، نرخ تغییرات در حالت استاتیکی برابر با ۱۰ درصد و در حالت دینامیکی برابر با ۳۷ درصد می باشد. با افزایش عمق قرارگیری تونل، در تمامی ترازهای آب زیرزمینی، نشست سطحی افزایش می یابد. از سوی دیگر با تغییرات بعمل آمده در سطح آب زیرزمینی مشاهده می شود که در اعماق اول و دوم قرارگیری تونل، بیشترین میزان نشست در محلی اتفاق افتاده است که تراز آب زیرزمینی بر روی

تاج تونل قرار گرفته است و در اعماق سوم و چهارم قرارگیری تونل، بیشترین میزان نشست در محلی اتفاق افتاده است که تراز آب زیرزمینی در مرکز تونل قرار گرفته است.

افزایش تراز آب زیرزمینی موجب کاهش قابل توجه نیروی محوری و ممان خمشی در پوشش تونل می شود؛ این کاهش به ترتیب حدود ۵۵٪ و ۴۰٪ نسبت به حالت خشک برآورد گردید.

حضور آب زیرزمینی با افزایش فشار منفذی، باعث کاهش دامنه جابه جایی های قائم و افقی تونل شده و در نتیجه، میرایی طبیعی سیستم افزایش می یابد.

رفتار دینامیکی تونل در محیط اشباع به دلیل افزایش میرایی هیدرودینامیکی پایدارتر از محیط خشک است، اما خطر ناپایداری در کف تونل در صورت فقدان زهکشی همچنان وجود دارد.

تغییرات پارامترهای مکانیکی خاک (به ویژه زاویه اصطکاک داخلی) بیشترین اثر را بر پاسخ لرزه ای تونل دارند و باید با دقت تعیین شوند.

تحلیل لرزه ای بدون لحاظ کردن شرایط آب زیرزمینی می تواند به برآورد غیرواقعی از تنش ها و تغییر شکل ها منجر شود.

به طور کلی، می توان گفت که در طراحی لرزه ای تونل های واقع در مناطق با سطح بالای آب زیرزمینی، کنترل فشار منفذی و تحلیل اندرکنش سه گانه ُ خاک-سازه-آب، پیش شرط اصلی پایداری لرزه ای است.

پیشنهاد برای تحقیقات آینده

با توجه به یافته های این پژوهش در بررسی مدل عددی، پیشنهاد های زیر برای تحقیقات آینده ارائه می شود:

- توسعه مدل عددی به صورت سه بعدی برای بررسی اثرات پیچش و تغییر شکل های غیرمحوری در تونل ها.

- بررسی تأثیر نوع مصالح پوشش تونل (بتنی، فولادی، ترکیبی) بر پاسخ لرزه ای در حضور آب زیرزمینی.

- استفاده از مدل های رفتاری پیشرفته تر برای خاک، مانند Hardening Soil و Hypoplastic، جهت افزایش دقت در پیش بینی پاسخ دینامیکی.

- بررسی تأثیر توالی رخدادهای لرزه ای (زلزله های پس لرزه) بر تونل های اشباع و نیمه اشباع.

۶- مراجع

- Journal of Geotechnical Engineering*, 18(2), 75–89.
- Sun, H., Li, Y., & Zhang, P. (2021). Numerical modeling of cable-reinforced tunnels under lateral pressure. *Engineering Geology*, 290, 106–130.
- Tarifard, A., Görög, P. & Török, Á. (2022). Long-term assessment of creep and water effects on tunnel lining loads in weak rocks using displacement-based direct back analysis: an example from northwest of Iran. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 8, 31. **doi.org/10.1007/s40948-022-00342-0**
- Wang, R., Zhang, D., Guo, C., & Yan, J. (2025). Development of urban rail tunnels under cyclic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 139, 105–118.
- Xin Han, Pierpaolo Oreste & Fei Ye (2023). The Buoyancy of the Tunnel Segmental Lining in the Surrounding Filling Material and its Effects on the Concrete Stress State *Geotechnical and Geological Engineering* Published: 10 October 2022 Vol. 41, 741–758. **doi.org/10.1007/s10706-022-02299-z**
- Yang, L., Linlin, Y., & Zhao, W. (2025). Dynamic response of segmental tunnel linings under train-induced loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173, 108–122.
- Yueyue Zhu and Cheng Liu (2022). Study on the Influence of Internal Water Pressure on the Internal Force of Circular Hydraulic Tunnel Lining, *Applied Sciences Appl. Sci.* 12(21), 11271. **doi.org/10.3390/app122111271**
- Zhongju Feng, De Li, Fuchun Wang, Liang Zhang, Siqi Wang (2024). Field Test and Numerical Simulation Study on Water Pressure Distribution and Lining Deformation Law in Water-Rich Tunnel Crossing Fault Zones. *Applied Sciences Appl. Sci.* 14(16), 7110. **doi.org/10.3390/app14167110**
- Dengke Wang, Jianjun Luo , Feilong Li, Guanqing Wang, Lei Wang, Jie Su, ZhenGao and Kunyao Yin (2022). Dynamic Response and Service Life of Tunnel Bottom Structure Considering Hydro-Mechanical Coupling Effect under the Condition of Bedrock Softening Materials 2022, 15(18), 6496 **doi.org/10.3390/ma15186496**
- Dimitrios Kolymbas (2005). Tunnelling and tunnel mechanics—a rational approach to tunnelling by Dimitrios Kolymbas. *Acta Geotech.* 1, 75–76 (2006). **doi.org/10.1007/s11440-006-0007-7**
- Fahimi-Heidari, H., & Zarei, A. (2019). Semi-analytical analysis of tunnel stability based on Hoek–Brown criterion. *Iranian Geotechnical Conference Proceedings*, Tehran.
- Futai, M., & Cacciari, C. (2020). Stability analysis of tunnels under cyclic loading. *Computers and Geotechnics*, 127, 103–141.
- Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I. C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, V.16, Issue 4, October, Pages 247-29. **doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00051-7**
- Hesami, S., & Ahmadi, S. (2013). Numerical analysis of ground settlement due to tunneling using PLAXIS. *Journal of Geotechnical Studies*, 7(2), 45–58.
- Leca, E. (2007). Settlement control in urban tunneling. *Geotechnique*, 57(9), 769–782.
- Min, X., Wang, J., Liu, Z. et al. (2025) Detection of structural diseases in tunnels under water-rich environments and performance evaluation of lining drainage structures. *Discov Appl Sci* 7, 709. **doi.org/10.1007/s42452-025-07379-2**
- Rajayi, M., et al. (2024). Probabilistic analysis of soil parameters in urban excavation. *Iranian*

Numerical Investigation of Bending Moment and Shear Force in a Tunnel in Static and Dynamic States with the Presence of Groundwater

Using the Finite Element Method

Masoud Khahanipour, Department of Civil Engineering, TN.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mohammadreza Rasoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, TN.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: masoud.khahanipour@iau.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

The seismic stability of underground structures is one of the most complex aspects of geotechnical earthquake engineering. Among various factors influencing tunnel behavior, groundwater plays a crucial role in altering stress distribution, displacement, and internal forces. In this study, the influence of groundwater level on the seismic behavior of circular tunnels located in seismic regions is analyzed using the finite element method through PLAXIS 2D software. The interaction between soil, structure, and pore pressure under dynamic conditions is modeled for three groundwater levels: below the invert, along the tunnel axis, and above the crown. The results indicate that increasing groundwater level reduces axial force and bending moment within the tunnel lining, with up to 55% and 40% reductions at the crown under dynamic loading, respectively. Pore pressure variations were found to significantly affect effective stress distribution, and uncontrolled groundwater levels could lead to instability under seismic excitation. The outcomes of this research provide practical guidance for seismic design of tunnels in saturated and high-water-table regions.

Keywords: Tunnel, Groundwater, Seismic Analysis, Finite Element Method, Geotechnical Stability