

ارزیابی تأثیر بهسازی لایه‌های خاک به روش تزریق بر مقدار جابجایی‌ها و خسارات وارده بر سازه مدفون تحت تأثیر انتشار امواج حاصل از انفجار (مطالعه موردی تونل مترو اصفهان مسیر صفه-آزادی)

پژوهشی

محمد امیری^{۱*}؛ حسین دوستی^۲

۱- دانشیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، amirii@hormozgan.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان، Hosseyndusti@yahoo.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۴/۰۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

شماره صفحات: ۷۱ تا ۸۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.12034.1459

واژگان کلیدی	چکیده
بررسی عددی انفجار بهسازی خاک مدول برشی سازه‌های مدفون	شناخت رفتار خاک‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی به‌منظور توانایی در پیش‌بینی پاسخ خاک و اندرکنش بین سازه و خاک اطراف آن بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر شناخت میزان توان انواع خاک در مستهلک کردن انرژی حاصل از بار دینامیکی بسیار مهم است. در این بین مدول برشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای خاک در بحث میرایی است. در این مقاله به بررسی تأثیر بهسازی لایه‌های خاک به روش تزریق بر مقدار جابجایی‌ها و خسارات وارده بر سازه مدفون تحت تأثیر انتشار امواج حاصل از انفجار به صورت موردی در پروژه تونل مترو اصفهان در مسیر صفه-آزادی پرداخته شده است. مدل‌سازی و تحلیل این موضوع به وسیله نرم‌افزار المان محدود FLAC انجام گرفته شده است. در این پژوهش بحرانی‌ترین حالت ممکن با توجه به فاصله ماده منفجره از پوشش تونل و مقدار بار انفجاری TNT مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش سعی شده با استفاده از تزریق مقادیر مختلف دوغاب سیمان به هر یک از لایه‌های خاک و تقویت ساختار خاک و تغییر مدول برشی، ایمن‌ترین حالت ممکن برای تونل‌های مدفون ارایه شود. از تزریق دوغاب سیمان به لایه‌های خاک و افزایش مدول الاستیسیته و مدول برشی خاک این نتیجه دریافت شد که با افزایش مدول برشی جابجایی‌ها روند کاهشی پیدا کرد. نتایج حاکی از آن است که تقویت لایه‌ی ماسه‌سنگ جابجایی‌ها در پوشش بتنی تاج تونل مدفون را ۷۴٪ کاهش می‌دهد، این مقدار در صورت تقویت لایه‌ی آبرفتی حداکثر ۴۰٪ است. در واقع تقویت لایه آبرفتی در بهترین حالت، سازه مدفون را تنها در برابر انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT ایمن نگه می‌دارد ولی لایه ماسه‌سنگ تقویت شده سازه مدفون را تحت بار ۵۰۲ کیلوگرم TNT هم محفوظ نگه می‌دارد.

۱- مقدمه

مقاومت این لایه‌ها در برابر بارهای استاتیکی است (Zheng, et al. 2022). به دلیل فرآیندهای زمین‌شناسی پیچیده و طولانی، مانند رسوب، دگرگونی، هوازدگی و اثرات بیولوژیکی، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک و توده سنگ از مکانی به مکان دیگر به طور قابل توجهی متفاوت است.

نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی متعدد، نشان‌دهنده تفاوت رفتار خاک در مواجهه با بارهای دینامیکی و استاتیکی است. در واقع مقاومت لایه‌های خاک و سنگ در برابر گسیختگی تحت بارهای دینامیکی به مراتب کمتر از

است. ارزیابی دقیق این خصوصیات و تغییرات آن‌ها بر اثر کرنش‌های برشی در تحلیل مسائل زیادی از جمله اندرکنش خاک- سازه حائز اهمیت است. در بحث دینامیک خاک، پاسخ خاک به حرکات برشی همچون انفجار و زلزله بسیار مهم است (Qutoumlar, et al. 2018).

برای بررسی مقاومت حاصل از عملیات بهسازی لایه‌های خاک و سنگ بهترین پارامتر برای بررسی تغییرات مدول برشی (G) است. از مزایای استفاده از مدول برشی تعیین در آزمایشگاه است. اگر رابطه‌ای برای مدول برشی در آزمایشگاه به دست آید، این رابطه در محل نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Kordnaei, et al. 2020).

در واقع مدول برشی برای کرنش‌های کوچک ثابت در نظر گرفته می‌شود اما در کرنش‌های بزرگ‌تر امکان کاهش سختی برشی وجود دارد و مدول برشی کاهش پیدا می‌کند. از این‌رو برای افزایش مقاومت خاک‌ها در مقابل کرنش‌ها نیاز به در نظر گرفتن تمهیداتی برای بهسازی خاک است. پایداریسازی ساختار خاک با استفاده افزودنی‌هایی که واکنش شیمیایی با خاک دارند این پتانسیل را دارند که به عنوان روشی جهت بهسازی خاک به کار گرفته شوند (Amiri, et al. 2022).

امروزه کاربرد روش تزریق در تقویت کردن بافت خاک بسیار رایج است. عملیات تزریق تکنیکی برای اصلاح مقاومت و تحکیم تشکیلات سنگی و خاکی است. تزریق دوغاب با فشار معمولی در خاک‌های با اندازه ذرات متوسط و با چسبندگی خیلی پایین مانند خاک ماسه‌ای و خاک لای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در خاک‌های با چسبندگی و تراکم بالاتر از روش تزریق با فشار بالا استفاده می‌شود (Hashemi hafdani. 2002).

افزودن سیمان به خاک، واکنش‌های شیمیایی مختلفی را به دنبال دارد که باعث تغییرات بلندمدت و کوتاه‌مدت در خاک می‌شود. مهم‌ترین واکنش‌ها، واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی هستند. ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-H-S) اصلی‌ترین فرآورده حاصل از هیدراسیون سیمان است که از هیدراسیون ترکیبات سیلیسی سیمان حاصل می‌شود. محصولات فرایند هیدراسیون باعث تشکیل فاز جامد سخت می‌شوند (Amiri, et al. 2020).

همین امر سبب پیچیدگی در رفتار دینامیکی خاک‌ها و توده‌های سنگ می‌شود (Zhang, et al. 2020). امروزه استفاده از تونل با کاربری‌های مختلف به طور قابل توجهی رو به افزایش است. تونل‌ها با هر کاربری که دارند به عنوان یک سازه‌ی امن زیرزمینی به حساب می‌آیند و از این‌رو مورد توجه هستند. به دلیل توانایی استهلاک خوب خاک و ایجاد یک پوشش ایمن، این سازه‌ها در مواجهه با انفجار از امنیت قابل توجهی برخوردارند. این مزیت منجر به توجه بیشتر حملات و تلاش برای تخریب این سازه‌ها شده است (Javadanian, et al. 2016).

هرگونه تغییر در ساختار خاک مانند عملیات حفاری و خاکبرداری باعث تغییر در رفتار ذرات خاک در برابر بارهای دینامیکی وارده می‌شود. حفاری تونل در خاک به طور دستی، مکانیکی یا به طور خودکار و به کمک ماشین‌های حفاری تونل انجام می‌شود. مهم‌ترین مسئله‌ای که به هنگام حفر تونل در خاک به وجود می‌آید، آزادشدگی تنش در محیط پیرامونی ناحیه حفاری است (Amiri et al. 2018). ایجاد تنش در لایه‌های خاک و سنگ به دلیل عملیات حفاری موجب بروز برهم‌خوردگی ساختار خاک و همچنین ایجاد ترک و ناحیه خردشدگی در لایه‌های سنگی می‌شود که باعث کاهش مقاومت لایه‌های خاک و سنگ در برابر فشار و کشش حاصل از بارهای دینامیکی و استاتیکی می‌شود. ساختار لایه‌های خاک از مرز ناحیه حفاری تا شعاع ۱ متری دچار بیشترین سطح آسیب می‌شود. برای افزایش مقاومت نواحی از لایه‌های خاک و سنگ که در آن کرنش و به دنبال آن ترک و درزه‌هایی ایجاد شده است می‌توان از روش‌های تزریق دوغاب برای بهبود شرایط خاک و توده سنگ استفاده کرد (Doroodian et al., 2022).

هر چقدر ساختار خاک سست‌تر و نرم‌تر باشد سرعت عبور موج کمتر است که همین امر موجب بزرگنمایی قدرت موج و به دنبال آن باعث افزایش تخریب حاصله می‌شود. این در حالتی است که در لایه‌های سنگی و متراکم‌تر سرعت عبور موج بیشتر است و باعث استهلاک سریع‌تر انرژی موج شده و مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند (Naraghi, et al. 2003).

در رابطه با خصوصیات دینامیکی مصالح ژئوتکنیکی از مهم‌ترین مسائل بررسی پارامترهای مدول برشی و میرایی

نمونه‌ها با درصد‌های مختلف سیمان و نانوسیلیس تثبیت شدند. نتایج حاصله حاکی از آن بوده است که حضور نانوسیلیس در فرایند تثبیت خاک مازنی به وسیله سیمان، منجر به افزایش فعالیت‌های پوزولانی و رشد نانو ساختارهای هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) و به دنبال آن باعث افزایش ۳۰ برابری مقاومت فشاری نمونه‌ها و مدول برشی شده است (Amiri, et al. 2019).

کردنائیج و همکاران (۲۰۲۰) به مقایسه‌ی تثبیت ماسه به وسیله دوغاب سیمان و دوغاب زئولیت پرداختند. آن‌ها مقاومت نمونه‌ها را با ثبت تغییرات مدول برشی (G) بررسی کردند. در این تحقیق آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های تزریق شده انجام شد. بر اساس نتایج حاصل شده مدول برشی نمونه‌های تزریق شده با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با زئولیت تا ۳۰ درصد افزایش می‌باید. این در حالی بود که پس از رسیدن به این مقدار مدول برشی، افزایش در میزان زئولیت باعث روند کاهشی در مقدار مدول برشی می‌شود (Kordnaeij, et al. 2020).

گنستانتینیو و همکاران (۲۰۲۱) به تثبیت و بهسازی لایه‌های ماسه‌سنگ پرداختند. ماسه‌سنگ‌ها از تخلخل بالایی برخوردارند. ماسه‌سنگ‌ها در مواجهه با فشار و نیروهای برشی تمایل زیادی به تخریب ساختار دارند. در این مطالعه به روش رسوب کربناته میکروبی (*Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation*) (MICP) به سیمانته کردن ماسه‌سنگ پرداخته شد که در نتایج حاصله به مقادیر مناسبی از مقاومت فشاری محصور نشده و تخلخل دست یافته شد (Konstantinou, et al. 2021).

قیاسی و همکاران (۲۰۲۱) اثر پارامترهای خاک از جمله مدول برشی، مدول یانگ، میرایی و سرعت موج برشی را در تحلیل دینامیکی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست آمده ساختار خاک تأثیر مستقیمی بر روی خواص دینامیکی خاک دارد و هر چه مقدار سرعت موج برشی بیشتر باشد، نشان‌دهنده این است که خاک ساختاری سخت‌تر و کیفیت بالاتری دارد (Qiyasi, et al. 2021).

مومیوند و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر ناهمسانگردی در آرایش بافت توده سنگ، وجود شیب‌توزیته و سطوح ضعیف مانند ترک‌ها و درزه‌ها بر سرعت موج (P) پرداخته‌اند. نتایج حاکی از آن بوده است که ناهمسانگردی

اسیماکی و همکاران (۲۰۰۰) یک مدل ساده چهار پارامتری ارائه دادند که می‌تواند عوامل مدول برشی و ضریب میرایی را برای یک خاک دانه‌ای تحت تنش‌های برشی افقی که توسط امواج برشی حاصل می‌شود را نشان دهد. بر اساس نتایج ارائه‌شده، تقویت و بهسازی خاک، در میرایی امواج با فرکانس‌های بالا تأثیر زیادی ندارند (Assimaki, et al. 2000).

دلفس‌ریبی و همکاران (۲۰۰۴) به مطالعه مقایسه‌ای در مورد سه نوع تزریق دوغاب در خاک ماسه‌ای و تأثیرشان بر خواص دینامیکی خاک از جمله مدول برشی و ضریب میرایی پرداختند. مقادیر مدول برشی و ضریب میرایی را به وسیله آزمایش‌های ستون تشدید و آزمایش سه محوری سیکی تعیین کردند. در این مطالعه برای تقویت خاک ماسه‌ای از سه نوع دوغاب سیلیکاتی، سیمانی رقیق و معدنی استفاده شده است. نتایج نشان داد که تزریق سختی ماسه به ویژه برای کرنش‌های کوچک را بهبود می‌بخشد. هر سه نوع دوغاب، اثر مثبتی در مقدار مدول برشی و مقاومت در برابر تنش‌های اعمال شده داشتند و اثر ناچیزی بر نسبت میرایی از خود نشان دادند (Delfosse-Ribay, et al. 2004).

یانگ و همکاران (۲۰۱۰) به ارزیابی اثرات احتمالی انفجار زمین بر روی یک تونل مترو مدفون کم عمق پرداختند. آن‌ها برای به دست آوردن پاسخ‌های دینامیکی عملکرد تونل در خاک از نرم‌افزارهای ANSYS/LS-DYNA استفاده کرده‌اند. نتایج نشان داد که برای انفجار ناشی از ۵۰۰ کیلوگرم TNT سطح مقطع بالای پوشش تونل با جهت‌های بین ۰ تا ۲۲/۵ درجه و فواصل افقی ۰ تا ۷ متر از مرکز انفجار، مناطق آسیب‌پذیر هستند و تونل مترو در عمق بیش از ۷ متر ایمن است (Yang, et al. 2010).

احمدی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی امکان تزریق دوغاب سیمان در توده سنگ سد رودبار لرستان با توجه به تخلخل و وجود درزه در بافت سنگ‌ها پرداخته‌اند. در این تحقیق برای تحلیل قابلیت نفوذ از نرم‌افزار 3DEC استفاده شده است. نتایج حاکی از آن بود که تزریق دوغاب با بازدهی مناسب امکان‌پذیر است. همچنین عمق نفوذ دوغاب ۱/۲۹۵ متر برآورد شده است (Ahmadi, et al. 2018).

امیری و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تثبیت خاک‌های مازنی به وسیله سیمان در حضور نانوسیلیس پرداختند.

اتساع (ψ)، زاویه اصطکاک (ϕ)، مقاومت پیوند کششی (T) و نسبت مقاومت پیوند برشی (S) است.

۲-۴- تعیین پارامترهای انفجار و ساخت مدل در نرم‌افزار AUTODYN

با توجه به اینکه که نرم‌افزار FLAC 2D قادر به شبیه‌سازی انفجار نیست، شبیه‌سازی انفجار در نرم‌افزار AUTODYN انجام شده است. با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN انفجار را مدل‌سازی کرده و تاریخچه این انفجار را استخراج کرده و به صورت کدهایی به نرم‌افزار FLAC 2D اعمال شده است.

جهت شبیه‌سازی انفجار باید در ابتدا اجزای تشکیل دهنده محیط را تعریف کرد، که در این گام باید هوا و ماده منفجره TNT را در نظر گرفت. از آنجا که مدل‌سازی هوا و ماده منفجره TNT مدنظر بود، از تحلیل اویلری استفاده شده است، زیرا تحلیل اویلری برای مصالحی انتخاب می‌شود که تغییر شکل‌های بسیار زیادی دارند.

در نرم‌افزار دو شعاع تعریف شده است، اولی تحت عنوان کمترین شعاع است که به منظور ایجاد فاصله‌ای بین مرکز گوه تا نقطه انتهایی گوه که در زمان دوران به حجم کره‌ای در مرکز انفجار بتواند ایجاد کند که عموماً مقدار ۱ میلی‌متر برای آن تعریف شد؛ و اما شعاع بیشینه که بستگی دارد چه ابعادی از هوا هدف مدل‌سازی باشد؛ که برای این منظور ابتدا شعاع تأثیر ماده منفجره از رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

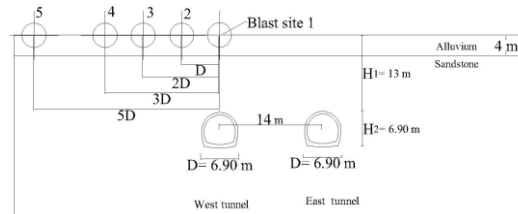
ρ = چگالی ماده منفجره TNT برابر با $\frac{1630 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ می‌باشد.

m = جرم ماده منفجره بر حسب kg

$$V = \text{حجم کره} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

به صورت موردی برای شعاع تأثیر ماده منفجره برای ۵۶ کیلوگرم TNT برابر ۲۰۵ میلی‌متر و شعاع بیشینه ۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در گام بعدی به تعریف مش‌بندی مدل پرداخته شده که بسته به شعاع بیشینه تعداد مش‌ها اعمال می‌شود. برای شعاع بیشینه ۵۰۰ میلی‌متر، تعداد ۲۵۰ مش در راستای R برای مدل در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، شعاع تأثیر برای مقادیر مختلف ماده منفجره که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده، ارائه شده است.

مدل ۳۴ متر و طول مدل ۱۰۰ متر بدست آمده است. در شکل ۲، طرح کلی مدل بعد از حفر تونل‌ها و تعریف لایه‌های خاک که قطر تونل‌ها، عمق قرارگیری تونل‌ها و محل انفجار در سطح را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شمای کلی مدل در حالت تونل دوقلو

در این مقاله روند مدل‌سازی به گونه‌ای است که مطالعه بر اساس تعریف فشار بر چاله انفجار، انجام می‌شود که ابعاد این چاله بر اساس آیین‌نامه ارتش آمریکا (UFC 3-02) بدست آمده است. مدل رفتاری مورد استفاده برای خاک در این پژوهش، مورکلمب است.

در اولین مرحله تحلیل، مدل از لحاظ استاتیکی به تعادل رسید و تمام تنش‌های درجا و نیروهای نامتعادل کننده که به وسیله اعمال نیروی گرانشی در مدل وجود داشت به صفر میل کردند. در مرحله بعد سازه زیرزمینی در مدل طراحی می‌شود. در مرحله تحلیل استاتیکی مدل در ابتدا تحت شرایط مرزی اولیه و بار ثقلی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

اندرکنش بین خاک و تونل در نرم‌افزار به صورت سطح به سطح، بین سطح خارجی تونل و سطح داخلی خاک مدل شده است. سطح تماس دو سطح به روش تماس سخت (Hard Connection) در نظر گرفته می‌شود، تا از ادغام شدن سطوح در یکدیگر جلوگیری شود.

پارامترهای اندرکنش به دو صورت پیوند خورده (Bonded) و بدون پیوند (Unbonded) برای مدل تعریف شده است؛ به صورتی که حالت پیوند خورده به منظور تعریف اندرکنش خاک و سازه است و اتصال بدون پیوند به منظور تعریف اندرکنش سگمنت‌های پوششی تونل با یکدیگر است. شایان ذکر است در این تحقیق از اثر نرخ کرنش بر رفتار مصالح خاک و بتن در تحلیل‌ها صرف‌نظر شده است.

پارامترهای اعمالی به نرم‌افزار ضریب سختی نرمال (K_N)، ضریب سختی برشی (K_S)، چسبندگی (C)، زاویه

سطح گودال اعمال و سپس خاصیت میرایی به مدل اعمال شد. با توجه به MANUAL نرم‌افزار Flac 2D بهترین نوع میرایی برای انفجار و بارهای دینامیکی، میرایی مصنوعی است که a_l و a_n دو پارامتر ثابتی هستند که در این میرایی، مقادیرشان برای نیروی انفجار برابر یک در نظر گرفته می‌شود (FLAC 2D User Manual).

$$D = \frac{4}{5} W^{1/3} \quad (2)$$

D: قطر گودال ناشی از انفجار بر حسب متر

W: وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم

در جدول ۲، اندازه قطر گودال که برای وزن‌های مختلف TNT، ارائه شده است.

جدول ۲- قطر گودال انفجار برای مقادیر مختلف ماده

منفجره (kg)	۲۵	۵۶	۱۲۰	۱۶۵	۲۴۹	۵۰۲
وزن ماده منفجره (kg)	۲۵	۵۶	۱۲۰	۱۶۵	۲۴۹	۵۰۲
قطر گودال (m)	۲/۳۴	۳/۰۶	۳/۹۵	۴/۳۹	۵	۶/۳۶

زمانی که شرایط برای اعمال فشار انفجار به مدل مهیا شد، تاریخچه انفجار استخراج شده از نرم‌افزار AUTODYN در نرم‌افزار FLAC 2D فراخوان شده و به صورت پالس فشار به صورت شعاعی به سطح گودال وارد شد.

۲-۵- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح در مسیر صاف-آزادی

لایه‌های خاک در مسیر صاف-آزادی شامل قطعه سنگ‌ها و خاک‌هایی با جنس‌های متفاوت است. با این وجود جنس غالب سنگ‌های مسیر از نوع تناوب ماسه‌سنگ (Sandstone) و آبرفت (Alluvium) است. لایه آبرفتی به ضخامت تقریباً ۴ متر بر روی ماسه‌سنگ قرار دارد (Amiri et al., 2019). مدل رفتاری استفاده شده برای خاک منطقه مدل رفتاری موهرکولمب است. برای تعیین مشخصات مکانیکی خاک از محل تونل نمونه‌گیری انجام شده و با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی، مشخصات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک تعیین شده است. بخش اعظم آزمایش‌های انجام شده در این مقاله بر اساس استاندارد ASTM صورت گرفته است (ASTM, 2004).

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) خاک بر اساس استاندارد ASTM, D3080 و دانسیته (γ) بر اساس

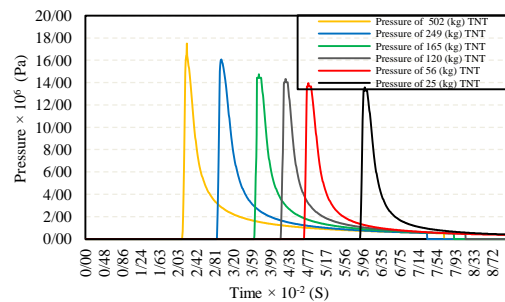
جدول ۱- شعاع تأثیر انفجار مقیاس شده در نرم‌افزار

AUTODYN برای مقادیر مختلف ماده منفجره (kg)

وزن ماده منفجره (kg)	۲۵	۵۶	۱۲۰	۱۶۵	۲۴۹	۵۰۲
شعاع تأثیر (mm)	۱۵۵	۲۰۵	۲۶۰	۳۰۰	۳۳۵	۴۲۰

قدم بعدی در ادامه مدل‌سازی در نرم‌افزار AUTODYN، ابعاد محاسبه شده شعاع تأثیر مواد منفجره در مدل تعریف شده است. چگالی ماده منفجره TNT که مقدار آن برابر $(\frac{kg}{m^3})$ ۱۶۳۰ است و انرژی داخلی TNT نیز به طور پیش‌فرض برای ماده منفجره در نرم‌افزار (Pa) $3/68 \times 10^6$ در نظر گرفته شده است.

در انتها پس از شبیه‌سازی فرایند انفجار مقادیر مختلف TNT، نرم‌افزار نتایج حاصل از انفجار را به صورت نموداری (شکل ۳) به عنوان خروجی تحویل داد؛ که البته اعداد این نمودار را به صورت کد از نرم‌افزار AUTODYN استخراج و به نرم‌افزار FLAC 2D اعمال شده است.



شکل ۳- تاریخچه انفجار مقادیر مختلف TNT

در آخرین مرحله مدل مورد تحلیل دینامیکی قرار داده شده است، بدین منظور ابتدا شرایط مرزی برای تحلیل دینامیکی تغییر داده شد. به این صورت که در تمامی مدل‌ها مرزهای چپ و راست مدل به مرزی آزاد و مرز تحتانی مدل در جهات x و y به صورت ویسکوز در نظر گرفته شد. در این مرحله تمامی جابجایی‌ها و سرعت‌هایی که ناشی از بار استاتیکی بود صفر در نظر گرفته شد.

در مرحله بعدی بر اساس MANUAL نرم‌افزار FLAC 2D، رابطه (۲) استخراج شد و با استفاده از آن قطر گودال ناشی از انفجار محاسبه شد و خاکبرداری گودال انجام شد. مرزهای آرام نرمال (N quiet) و برشی (S quiet) به

شده به هر گره با کمک معادلات حرکت حاصل می‌شود. سپس نرخ کرنش از سرعت‌های گرهی جدید در هر جز بدست می‌آید. در واقع مشخصات مصالح و شرایط مرزی و اندرکنشی خاک و بتن به صورت دستی در نرم‌افزار اعمال می‌شود و سپس با توجه به پالس‌های فشار دینامیکی نرم‌افزار نرخ کرنش و جابجایی‌ها و تغییرشکل‌های حاصله را بدست می‌آورد.

جدول ۵- انواع بمب‌ها و وزن معادل TNT (Rajabi, 2013)

نوع بمب	وزن بمب (kg)	قدرت انفجار معادل TNT (kg)
GP100	۵۰	۲۵
GP250	۱۱۸	۵۶
GP500	۲۳۵	۱۲۰
GP750	۳۷۶	۱۶۵
GP1000	۴۶۲	۲۴۹
GP2000	۹۴۷	۵۰۲

۲-۶- حداکثر جابجایی مجاز پوشش بتنی

با توجه به نحوه و سرعت انتقال موج ناشی از انفجار و همچنین مقدار تنش‌ی که در محیط ایجاد می‌کند، امکان بروز خسارت در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای متفاوتی برای محاسبه حد مجاز خسارت و جابجایی در تونل‌ها تحت بار دینامیکی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در این پژوهش به منظور بدست آوردن جابجایی مجاز از معیار ساکورایی (رابطه (۵)) استفاده شده است (Sakurai, 1997):

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (5)$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوری و E مدول یانگ برحسب kg/cm^2 است. باید توجه داشت که کرنش بحرانی همیشه کوچک‌تر از کرنش در لحظه شکست است. مقدار حداکثر کرنش مجاز با استفاده از رابطه (۶) توسط ساکورایی معرفی شد.

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (6)$$

پس از این مقدار حداکثر جابجایی مجاز در تونل‌ها با استفاده از رابطه (۷) محاسبه شده است:

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (7)$$

u_c جابجایی مجاز و پارامتر a شعاع تونل است. با

استاندارد $ASTM, D854$ تعیین شده است ($ASTM D854$,) برخی از پارامترهای مقاومتی خاک منطقه مورد مطالعه در جدول ۳، ارائه شده است.

جدول ۳- برخی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطقه مورد مطالعه (تونل مترو اصفهان مسیر صفا-آزادی)

مصالح	$\gamma (kN/m^3)$	ν	$E (Pa)$	$C (Pa)$	ϕ
آبرفتی	۱۷	۰/۴	5×10^8	6×10^4	۲۵
ماسه‌سنگ	۲۷	۰/۳۲	$2/7 \times 10^9$	$1/77 \times 10^5$	۴۱

مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن پوشش بتنی که به صورت ۸ تکه (Segmental) اجرا شده است. مدل رفتاری که برای پوشش بتنی تعریف شده است مدل رفتاری الاستیک است. خواص مصالح به کار رفته در سازه تونل در جدول ۴، ارائه شده است.

جدول ۴- خصوصیات بتن مورد استفاده در پوشش تونل‌ها

ضخامت مؤثر پوشش بتنی (mm)	$\gamma_{بتن} (kN/m^3)$	$\nu_{بتن}$	$E_{بتن} (Pa)$
۵۰۰	۲۵	۰/۲	3×10^{10}

پارامترهای وزن مخصوص (γ)، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) از جدول (۳) و پارامترهای مدول بالک (K) و مدول برشی (G) با استفاده از پارامترهای مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) و با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه شده‌اند (Landau & Lifshitz, 1970).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$

بر اساس نتایج آزمایشگاهی حاصل شده، برخی از مشخصات ژئوتکنیکی خاک منطقه موقعیت قرارگیری تونل‌ها که در پروژه انجام شده و نوع بمب نفوذگر و وزن معادل TNT آن که در جدول ۵، ارائه شده، مدل‌سازی انجام شده است. در مطالعه حاضر سعی شد شرایط مختلف خاک پس از بهسازی در بحرانی‌ترین حالت انفجار و اثر آن بر تونل‌ها بررسی شود؛ که در ادامه به تفکیک ذکر خواهد شد. در روند محاسبات نرم‌افزار، سرعت‌ها و تغییرمکان‌های جدید در هر جز به وسیله تنش‌ها و پالس‌های فشاری اعمال

در پژوهش حاضر، تزریق پرفشار است. دلیل انتخاب این روش وجود تراکم بالا در لایه‌های خاک و همچنین حضور لایه‌های ماسه‌سنگ با تخلخل پایین است.

جدول ۶- پارامترهای مقاومتی لایه آبرفتی تحت سطوح

نوع خاک	E (GPa)	ν	$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ (GPa)	$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ (GPa)
بهسازی نشده	۰/۵	۰/۴	۰/۱۷۸۶	۰/۸۳۳
بهسازی شده حالت (I)	۰/۹۳	۰/۳	۰/۳۵۷	۰/۷۷۴
بهسازی شده حالت (II)	۲/۳۲	۰/۳	۰/۸۹۳	۱/۹۳۵
بهسازی شده حالت (III)	۴/۶۴	۰/۲۸	۱/۷۸۶	۳/۵۲

جدول ۷- پارامترهای مقاومتی لایه ماسه‌سنگ تحت

نوع خاک	E (GPa)	ν	$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ (GPa)	$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ (GPa)
بهسازی نشده	۲/۷	۰/۳۲	۱/۰۲۳	۲/۵
بهسازی شده حالت (I)	۵/۲۳۶	۰/۲۸	۲/۰۴۵	۳/۹۷
بهسازی شده حالت (II)	۱۳/۱	۰/۲۵	۵/۱۱۴	۸/۷۳
بهسازی شده حالت (III)	۲۶/۲	۰/۲	۱۰/۲۳	۱۴/۵۴

با توجه به جدول ۶ و جدول ۷، در ادامه به بررسی سطوح مختلف بهسازی در هر یک از لایه‌های خاک و تأثیر آن بر مقدار جابجایی پوشش تونل تحت تأثیر انفجار سطحی، در بحرانی‌ترین حالت ممکن (Amiri & Dousti, 2022) پرداخته شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این تحقیق به بررسی تأثیر بهسازی و تزریق دوغاب به لایه‌های آبرفتی و ماسه‌سنگی به طور جداگانه پرداخته شده است. هدف از این کار در مرحله اول بررسی تأثیر تزریق دوغاب سیمان در ایجاد سربار امن برای پوشش بتنی تونل در مقابل بار انفجاری و خسارات وارده، در نواحی که جنس خاک آبرفت و یا ماسه‌سنگ است. در مرحله دوم هدف شناسایی بهترین و مؤثرترین لایه برای تزریق دوغاب سیمان است. بررسی بارهای انفجاری در این بخش در بحرانی‌ترین نقطه در سطح زمین نسبت به تونل مدفون انجام شده است.

توجه به ضخامت ۵۰۰ میلی‌متری پوشش بتنی تونل با عیار سیمان (kg/cm^3) ۲۵۰ و با در نظر گرفتن مدول یانگ پوشش بتنی، همچنین شعاع تونل‌های مورد نظر، کرنش بحرانی برابر ۰/۱۱ و جابجایی مجاز پوشش بتنی ۳۹ میلی‌متر تعیین شد.

۲-۷- بهسازی خاک (تزریق دوغاب سیمان)

در تثبیت خاک با استفاده از تزریق دوغاب و با توجه به خاصیت متراکم‌سازی و سخت‌کنندگی این روش، تغییرات قابل توجهی در پارامترهای خاک مشاهده خواهد شد. از جمله پارامترهای مهم خاک که به طور خاص در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، مدول برشی خاک است. در واقع این پارامتر با توجه به رابطه (۳) تحت تأثیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون است. افزودن سیمان به بافت خاک باعث بالا رفتن مدول الاستیسیته و کاهش نسبی ضریب پواسون می‌شود. با توجه به تغییرات ذکر شده در خواص مکانیکی خاک، با تزریق درصدی متفاوت از دوغاب سیمان به خاک مقادیر مختلفی برای مدول یانگ و ضریب پواسون خاک حاصل می‌شود که به دنبال آن مدول برشی و مدول بالک خاک نیز تغییر می‌کند. هیچر و دانو (۲۰۰۳) تغییرات مدول برشی را تحت تأثیر تزریق دوغاب سیمان به لایه‌های خاک بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش مدول برشی در نمونه‌های تزریق شده حداکثر مقدار ۱۰ برابری را حاصل کرد. بر این اساس در مطالعه حاضر مقادیر مدول برشی تا محتمل‌ترین حالت ممکن (۱۰ برابری) به مدل اعمال شد.

مقادیر افزایشی مدول برشی در سه حالت ۲، ۵ و ۱۰ برابری به مدل اعمال شده است. نتایج عددی در هر سه حالت به ترتیب I، II و III نام‌گذاری شد و به همراه مقادیر پارامترهای مورد نظر در حالت تزریق نشده به صورت جداگانه برای هر نوع خاک در جدول ۶ و جدول ۷، ارائه شده است. جهت تزریق دوغاب، نسبت آب به سیمان مصرفی (W/C) با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته توسط (Hicher & Dano, 2003) و (Derache & Danot, 2001) برای حالت I، به ازای ۵ واحد آب؛ ۰/۸۵ واحد سیمان، برای حالت II ۳ واحد آب؛ ۱/۰۵ واحد سیمان و در حالت III به ازای ۲ واحد آب؛ ۱/۷ واحد سیمان در نظر گرفته شده است. شیوه تزریق

۳-۱- بررسی بحرانی‌ترین فاصله انفجار سطحی تا تاج تونل مدفون

به‌منظور بررسی تأثیر موقعیت اعمال بار انفجاری بر رفتار تونل مدفون و آگاهی از بحرانی‌ترین مکان وقوع انفجار، بارهای انفجاری در سطح زمین در فواصل ۰، D، 2D، 3D و 5D (=D قطر تونل) نسبت به محور تونل غربی در نظر گرفته شده است.

محل وقوع انفجار به دلیل زاویه برخورد امواج به هدف از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرف دیگر مسافت طی شده موج باعث استهلاک بخشی از انرژی و یا تمام انرژی حاصل از انفجار می‌شود. از این نظر در این بخش، پس از شبیه‌سازی بارهای انفجاری مختلف، مقادیر جابجایی تاج تونل در جدول ۸، ارائه شده است.

جدول ۸- جابجایی تاج تونل با توجه به تغییرات فاصله افقی محل انفجار نسبت به محور تونل غربی برای مقادیر مختلف ماده منفجره TNT (mm)

فاصله تا تونل غربی وزن ماده منفجره (Kg)	بالای محور اصلی تونل	D	2D	3D	5D
۲۵	-۲۵/۵	-۱۴/۳۳	-۱/۶۷	-۰/۱۱۸	-۰/۱۲۷
۵۶	-۳۵/۲	-۱۸/۸۱۷	-۲/۸۴۶	-۰/۲	-۰/۱۶۵
۱۲۰	-۵۱/۳	-۲۹/۱	-۵/۸۴	-۰/۳۷۳	-۰/۱۸
۱۶۵	-۶۴/۲	-۳۵/۱	-۱۷/۸	-۳/۱۲	-۱/۳۵
۲۴۹	-۸۷/۵	-۴۵/۸۴	-۳۳/۴	-۵/۹۶	-۳/۶۶
۵۰۲	-۱۰۷	-۷۷/۵۶	-۵۲/۴	-۱۵/۸۸۲	-۸/۳۳

بر اساس نتایج حاصل شده هر چقدر فاصله منبع انفجار از تونل مدفون (تونل غربی) بیشتر شود، مقادیر جابجایی تاج تونل به شدت کاهش پیدا می‌کند.

انفجار در فاصله‌ای به اندازه قطر تونل از محور مرکزی تونل غربی باعث کاهش ۲۷ الی ۴۷ درصدی مقادیر جابجایی می‌شود. به طوری که در انفجارهای حاصل از ۱۲۰ و ۱۶۵ کیلوگرم TNT، مقادیر جابجایی تاج تونل از مقدار مجاز (۳۹ میلی‌متر) کمتر شده که نشان‌دهنده عدم تخریب سازه مدفون است. اما با وجود افزایش فاصله، جابجایی تاج تونل تحت تأثیر بارهای انفجاری ۲۴۹ و ۵۰۲ کیلوگرم TNT در محدوده مجاز جابجایی قرار نگرفته است و تخریب صورت

گرفته است.

اعمال بارهای انفجاری در فاصله 2D (قطر تونل=D) سبب کاهش ۵۱ الی ۹۳ درصدی جابجایی‌ها شده است. نظر به اینکه میزان درصد کاهش جابجایی‌ها با افزایش مقدار بار انفجاری کمتر شده است. با توجه به جدول ۸، در این حالت تنها جابجایی حاصل از انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT، باعث تخریب در تاج تونل می‌شود، زیرا با وجود کاهش ۵۱ درصدی در مقدار جابجایی‌ها، ۵۲/۴ میلی‌متر جابجایی رخ داده است که از مقدار مجاز جابجایی (۳۹ میلی‌متر) بیشتر است.

با افزایش فاصله انفجار به اندازه‌ی 3D و 5D نسبت به محور اصلی تونل غربی، میزان جابجایی‌ها ۸۵ الی ۹۹ درصد کاهش یافته است. این میزان جابجایی حاکی از آن است که در فواصل ذکر شده تقریباً در پوشش بتنی تاج تونل جابجایی رخ نمی‌دهد.

در واقع با توجه به خاصیت میرایی هر کدام از خاک‌های موجود در منطقه و تنش ایجاد شده حاصل از انفجار، هر چقدر از محور مرکزی تونل فاصله بیشتر می‌شود، مقدار جابجایی‌ها به شدت کاهش پیدا می‌کند و تقریباً جابجایی‌ها در تاج تونل به صفر میل می‌کنند. بنابراین با توجه به مقادیر جابجایی و فاصله منبع انفجار از محور مرکزی تونل، بحرانی‌ترین نقطه انفجار در سطح زمین، انفجار درست در بالای محور مرکزی تونل است.

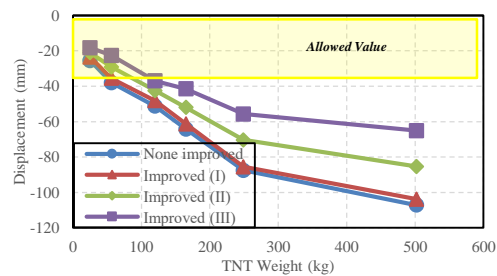
۳-۲- بررسی تأثیر بهسازی خاک ناحیه بحرانی در لایه آبرفتی

بیشترین جابجایی و خسارت وارده بر پوشش تونل هنگامی اتفاق می‌افتد که انفجار سطحی درست در بالای محور قرارگیری یکی از تونل‌ها رخ دهد.

با توجه به مقادیر مختلف مدول برشی بدست آمده از تزریق سیمان که در جدول ۶، ارائه شد، نتایج جابجایی تاج تونل تحت بارهای مختلفی از ماده منفجره در شکل ۴، ارائه شده است. با بررسی نتایج حاصله، انجام بهسازی لایه آبرفتی در حالت (I) با افزایش ۲ برابری مدول برشی همراه بوده است. در این حالت نسبت به وضعیت طبیعی، ۳ تا ۸ درصد مقادیر جابجایی تاج تونل برای مقادیر مختلف TNT کاهش یافته است.

جابجایی تاج تونل تحت بار انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT

در حالت طبیعی ۳۸ میلی‌متر بدست آمده است، اما این مقدار پس از بهسازی خاک در حالت (I) ۲/۵ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است (۶/۵ درصد کاهش). با انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT در حالت طبیعی مقدار جابجایی در پوشش بتنی در ناحیه تاج تونل ۵۱/۳ میلی‌متر است و پس از بهسازی خاک در حالت (I) این مقدار جابجایی به ۴۸/۲ میلی‌متر تقلیل پیدا کرده است که البته این مقدار جابجایی پوشش تونل از حد مجاز بیشتر است و باعث تخریب می‌شود. میزان جابجایی تاج تونل پس از انفجار ۱۶۵ کیلوگرم TNT در حالت خاک تقویت شده (I)، ۶۱/۳ میلی‌متر شده است که نسبت به حالت طبیعی ۴/۵ درصد کاهش جابجایی اتفاق افتاده است. با توجه به مقدار مجاز جابجایی (۳۹ میلی‌متر) حداکثر بار انفجاری مورد تحمل پوشش بتنی، بار حاصل از انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT است.



شکل ۴- روند تغییرات جابجایی تاج تونل غربی تحت مقدار بارهای انفجاری مختلف TNT

در شرایط بهسازی شده حالت (II) که باعث افزایش ۵ برابری مدول برشی لایه خاک می‌شود، مقدار جابجایی تاج تونل حدود ۱۷ تا ۲۴ درصد یافته است. به طوری که انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT باعث ۲۹/۱ میلی‌متر جابجایی در تاج تونل شده است که نشان‌دهنده کاهش ۲۳ درصدی مقدار جابجایی نسبت به حالت طبیعی خاک است. جابجایی تاج تونل پس از انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT، ۴۲/۵ میلی‌متر بدست آمده است که نسبت به حالت طبیعی خاک (۵۱/۳ میلی‌متر) ۸/۸ میلی‌متر کاهش یافته است. در این حالت با وجود بهبود شرایط خاک و کاهش مقدار جابجایی‌ها نسبت به حالت (I)، حداکثر بار قابل تحمل برای تونل، بار حاصل از انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT است و تأثیر قابل توجهی در افزایش سطح ایمنی سازه تحت بارهای انفجاری مورد نظر

ندارد.

در بهسازی حالت (III) مقدار مدول برشی افزایشی ۱۰ برابری را تجربه کرده و خاک به طور کامل تقویت می‌شود. در این شرایط حدود ۲۸ تا ۴۰ درصد از جابجایی تاج تونل کاسته شده است. در حالت طبیعی خاک جابجایی تاج تونل در مواجهه با بار انفجاری ۱۲۰ کیلوگرم TNT، ۵۱/۳ میلی‌متر جابجا است. در شرایط بهسازی شده خاک (حالت (III))، این مقدار برابر ۳۷ میلی‌متر است که در بازه مجاز جابجایی قرار دارد. تاج تونل تحت بار انفجار ۱۶۵ کیلوگرم TNT در حالت طبیعی ۶/۴۲ میلی‌متر شده است و این در صورتی است که پس از بهسازی خاک در حالت (III)، جابجایی پوشش بتنی با ۳۵/۳ درصد کاهش به مقدار ۴۱/۵ میلی‌متر رسیده است. با این وجود در بازه مجاز جابجایی قرار نگرفته است و تخریب صورت می‌گیرد.

با توجه به مقدار مجاز جابجایی (۳۹ میلی‌متر)، با تزریق بیشترین درصد دوغاب سیمان (حالت (III))، تاج تونل تنها تا انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT را می‌تواند تحمل کند.

در واقع بهسازی خاک به روش تزریق باعث تغییر در رفتار استاتیکی و دینامیکی خاک شده است ولی با این وجود با توجه به جنس لایه آبرفتی که دارای ساختار سست، نرم و متخلخل است، با توجه به شکل ۴، انجام بهسازی در لایه آبرفتی تأثیر چندانی در افزایش ایمنی تونل مدفون تحت بارهای انفجاری مختلف ندارد.

۳-۳- بررسی تأثیر بهسازی خاک ناحیه بحرانی در لایه ماسه‌سنگ

ماسه‌سنگ از سری سنگ‌های با درصد تخلخل زیاد است که متخلخل بودن این سنگ‌ها موجب پایین بودن مقاومت فشاری تک محوره، مدول‌های یانگ، برشی و حجمی می‌شود (Badagh abadi, et al. 2008). همچنین ماسه‌سنگ‌ها در مواجهه با فشار و نیروهای برشی تمایل زیادی به تخریب ساختار دارند (Konstantinou, et al. 2021)، به همین دلیل در اثر بار ماشین‌آلات، انفجار و حفاری تونل‌ها، به دنبال آن نشست لایه‌های خاک (Amiri, et al. 2018) امکان بروز درزه و ترک‌های متعدد در نقاط مختلف وجود دارد. همچنین محیط خاک، یک محیط ناپیوسته است پس به‌منظور ترمیم بافت توده سنگ و افزایش مقاومت، با استفاده از روش تزریق پرفشار (Jet

انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT، ۲۳ میلی‌متر شده است که نشان‌دهنده کاهش ۵۵ درصدی میزان جابجایی است. مقدار جابجایی تاج تونل پس از انفجار ۱۶۵ کیلوگرم TNT در حالت بهسازی شده (II)، ۳۲/۰۲ میلی‌متر بدست آمده است، این در حالی است که این مقدار در حالت طبیعی ۶۴/۲ میلی‌متر بوده است. اعمال بار انفجار ۲۴۹ کیلوگرم TNT در سطح و تأثیر آن بر مقدار جابجایی تاج تونل مدفون نشان داد که در حالت طبیعی، تاج تونل ۸۷/۵ میلی‌متر جابجایی داشت، اما پس از بهسازی لایه‌ی ماسه‌سنگ (حالت (II)) مقدار جابجایی تاج تونل به ۳۳/۵ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. در تاج تونل تحت تأثیر انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT پس از بهسازی لایه‌ی ماسه‌سنگ (حالت (II))، ۴۳/۵ میلی‌متر جابجایی رخ داد که با وجود کاهش ۶۰ درصدی، در محدوده مجاز جابجایی قرار ندارد.

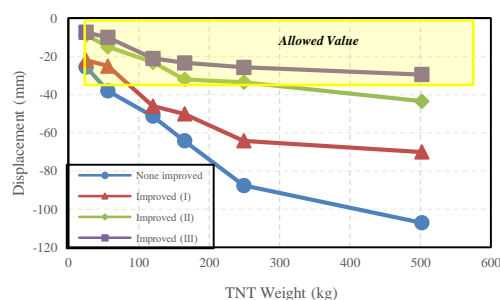
پس از بهسازی لایه ماسه‌سنگ (حالت (III))، بیشترین مقدار جابجایی ۲۹/۵ میلی‌متر است که تحت بار انفجاری ۵۰۲ کیلوگرم TNT رخ داده است. جابجایی تاج تونل تحت انفجارهای ۲۵، ۵۶، ۱۲۰، ۱۶۵ و ۲۴۹ کیلوگرم TNT به ترتیب ۷/۳۵، ۱۰، ۲۱، ۲۳/۴ و ۲۵/۷ میلی‌متر بدست آمده است که حدود ۶۰ تا ۷۴ درصد جابجایی تاج تونل کاهش یافته است. بهسازی لایه ماسه‌سنگ در حالت (III) شرایط مقاومتی بسیار خوبی در خاک منطقه ایجاد کرده است که قادر به ایجاد لایه‌ای امن در بالای تونل در مقابل بارهای انفجاری وارد بر سطح خاک است.

با افزایش مدول الاستیسیته لایه ماسه‌سنگ و به دنبال آن با افزایش مدول برشی لایه ماسه‌سنگ، مقاومت برشی و سختی لایه ماسه‌سنگ نیز زیاد می‌شود، همین امر باعث افزایش خاصیت استهلاک انرژی در لایه ماسه‌سنگ می‌شود. در واقع بالا بودن سختی لایه ماسه‌سنگ باعث مقاومت بیشتر لایه‌ها در برابر تنش‌های ایجاد شده در خاک می‌شود. پارامترهای مقاومتی خاک در لایه ماسه‌سنگ مقادیر بیشتری نسبت به لایه آبرفتی دارد، بنابراین با درصدهای مشابه تزریق دوغاب سیمان این لایه نتایج مقاومتی قابل توجه‌تری نسبت به لایه آبرفتی بدست آمد. با توجه به مقادیر جابجایی در بهترین شرایط تقویت شده لایه دوم می‌توان مشاهده کرد که دامنه جابجایی‌ها تقریباً در یک محدوده مشخص اتفاق می‌افتد که می‌توان این نتیجه را

grouting) در نواحی آسیب‌دیده عملیات تزریق دوغاب انجام می‌شود تا ضمن پر کردن درزه‌ها و ترک‌ها، لایه‌ای تقویت شده در سطح لایه ماسه‌سنگ ایجاد شود.

شکل ۵، روند تغییرات جابجایی تاج تونل غربی تحت تأثیر انفجار مقادیر مختلف TNT در حالت‌های مختلف خاک (شرایط طبیعی خاک و حالت‌های مختلف خاک تقویت شده) است که در حالات (II) و (III) مقادیر جابجایی تقریباً در محدوده مجاز قرار می‌گیرند.

در بهسازی حالت (I) مقدار مدول برشی لایه ماسه‌سنگ، دو برابر حالت طبیعی است. جابجایی در تاج تونل نسبت به وضعیت طبیعی خاک ۱۰ تا ۳۴ درصد کاهش یافته که به صورت موردی در انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT مقدار جابجایی از ۳۸ میلی‌متر به ۲۵ میلی‌متر تقلیل می‌یابد. تاج تونل تحت تأثیر بار انفجاری ۱۲۰ کیلوگرم TNT در حالت طبیعی ۵۱/۳ میلی‌متر جابجایی متحمل شده است این در حالی است که با بهسازی لایه ماسه‌سنگ در حالت (I) این مقدار ۴۶ میلی‌متر بدست آمده است. جابجایی حاصل از انفجارهای ۱۶۵، ۲۴۹ و ۵۰۲ کیلوگرم TNT پس از بهسازی حالت (I) نسبت به حالت طبیعی به ترتیب ۱۴/۱، ۲۳/۳ و ۳۷ میلی‌متر کاهش یافته است با این وجود مقادیر جابجایی در بازه مجاز (۳۹ میلی‌متر) قرار نگرفته است. در بهسازی حالت (I) به دلیل غلظت پایین دوغاب سیمان، مقاومت لایه ماسه‌سنگی در برابر جابجایی‌ها بهبود چشمگیری پیدا نکرده است. تاج تونل در این وضعیت تنها تا انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT را می‌تواند تحمل کند.



شکل ۵- روند تغییرات جابجایی تاج تونل غربی تحت مقدار بارهای انفجاری مختلف TNT

مقادیر جابجایی تاج تونل تحت تأثیر بارهای انفجاری پس از انجام بهسازی حالت (II) در لایه ماسه‌سنگ، برای

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر بهسازی لایه‌های خاک به روش تزریق بر مقدار جابجایی‌ها و خسارات پوشش بتنی تونل مدفون تحت انفجار مقادیر مختلف TNT در سطح زمین بررسی شده است. به صورت موردی تونل مترو اصفهان در مسیر صفه-آزادی مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این پژوهش به شرح ذیل است:

۱. مدول برشی همواره با کاهش نسبت آب به مصالح سیمانی (W/C) افزایش می‌یابد. با کاهش W/C یا افزایش مصالح سیمانی در دوغاب، منافذ بیشتری از توده ماسه‌سنگ و لایه آبرفتی اشغال می‌شود و متعاقباً باندهای قوی‌تری بین ذرات در لایه‌های خاک تشکیل می‌شود. به عبارتی دیگر، با کاهش W/C در دوغاب، نانوساختارهای C-S-H و C-A-H بیشتری در نمونه‌های تزریق شده تشکیل می‌شود که باعث افزایش مقاومت برشی خاک و همچنین بهبود رفتار خاک در برابر بارهای دینامیکی می‌شود.

۲. نتایج بهسازی لایه‌های خاک نشان داد که تزریق دوغاب سیمان به لایه ماسه‌سنگ مؤثر است و مقادیر مطلوب‌تری از استهلاک انرژی و کاهش جابجایی حاصل می‌شود.

۳. با توجه به مقادیر جابجایی پس از افزایش مدول برشی در لایه‌های آبرفتی، برای هر سه حالت I، II و III میزان کاهش جابجایی‌ها به ترتیب ۸، ۲۴ و ۴۰ درصد است.

۴. پس از بهسازی لایه آبرفتی در حالت I و II تونل مدفون حداکثر تا انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT ایمن است. اما در بهسازی لایه آبرفتی در حالت III تاج تونل تا انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT را تحمل می‌کند.

۵. پس از بهسازی لایه ماسه‌سنگ و افزایش مدول برشی آن، در هر سه حالت بهسازی میزان جابجایی‌ها بین ۳۴ تا ۷۴ درصد کاهش داشته است؛ به طوریکه در بهسازی حالت I حداکثر بار قابل تحمل، حاصل از انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT است. در بهسازی حالت II تا بار انفجار ۲۴۹ کیلوگرم TNT برای تاج تونل قابل تحمل است. در بهسازی حالت III با توجه به مقادیر مجاز جابجایی پوشش بتنی تاج تونل (۳۹ میلی‌متر)، سازه مدفون در برابر بارهای انفجاری محتمل ایمن است.

برداشت کرد که با افزایش مدول الاستیسیته و به دنبال آن مدول برشی خاک، جابجایی در تاج تونل در محدوده ثابتی قرار می‌گیرد.

با توجه به مقادیر پارامترهای مقاومتی خاک و سنگ که در جدول ۶ و جدول ۷، ارائه شده و همچنین مقادیر مدول برشی استخراج شده از مطالعات انجام شده (جدول ۹)، می‌توان شرایط ژئوتکنیکی منطقه و نتایج حاصل شده را به پروژه‌های دیگر با جنس خاک مختلف اما مقدار پارامترهای مقاومتی یکسان (G) بسط داد تا حتی‌الامکان در زمان و هزینه صرف شده در مورد کنترل‌های قبل از شروع پروژه صرفه‌جویی شود.

در پژوهش حاضر خواص مقاومتی بدست آمده از بهسازی هر یک از لایه‌های خاک در سه حالت (I)، (II) و (III) حاصل شد که در مقایسه با خواص مقاومتی سنگ‌های ارائه شده در جدول ۹، می‌توان به نتایج ذیل رسید:

- لایه آبرفتی بهسازی شده در حالت (I)، (II) و (III) مشابه مشخصات ماسه‌سنگ نرم و زغال‌سنگ است.
- لایه ماسه‌سنگ تقویت شده در حالت (I)، مشابه مشخصات ماسه‌سنگ نرم و زغال‌سنگ است.
- لایه ماسه‌سنگ تقویت شده در حالت (II)، مشابه مشخصات ماسه‌سنگ متوسط، سنگ آهک و شیل است.
- لایه ماسه‌سنگ تقویت شده در حالت (III)، مشابه مشخصات ماسه‌سنگ متوسط، کوارتزیت، سنگ آهک و شیل است.

جدول ۹- مدول الاستیسیته برخی از انواع خاک و سنگ (Zhang, 2011)

نوع خاک	مدول برشی (GPa)
زغال‌سنگ	۰/۲۶ - ۲/۳۸
ماسه سنگ نرم	۰/۲۹ - ۲/۵
شیل	۲/۷ - ۲۴/۱
سنگ آهک	۴/۸۸ - ۳۵/۳۲
ماسه سنگ متوسط	۵ - ۱۳/۸
کوارتزیت	۹/۱۹ - ۳۴/۳۷
ماسه سنگ سخت	۱۸/۸ - ۲۹/۹
دیوریت	۲۱/۴۶ - ۳۵/۹

۵- فهرست نمادها

در جدول ۱۰، سیاهه نمادها آورده شده است.

جدول ۱۰- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
γ	kN/m^2	وزن مخصوص
ν	---	ضریب پواسون
E	Pa	مدول یانگ
C	Pa	چسبندگی
ϕ	°	زاویه اصطکاک داخلی
ψ	°	زاویه اتساع خاک
G	Pa	مدول برشی
K	Pa	مدول حجمی

۶. ساختار لایه‌های خاک و سنگ هر چقدر متراکم‌تر و

دارای تخلخل و درزه‌های کمتری باشد، توانایی استهلاک انرژی بیشتر و از این رو مقاومت بیشتری را در برابر امواج انفجار از خود نشان می‌دهند.

۷. بنا بر نتایج یکی دیگر از دلایل کاهش جابجایی‌ها و

تخریب‌های صورت گرفته این است که با افزایش پارامترهای مقاومتی خاک از جمله مدول برشی و منسجم شدن ساختار خاک، سرعت موج عبوری از لایه‌های خاک افزایش پیدا می‌کند که همین امر باعث استهلاک سریع‌تر انرژی امواج و کاهش تخریب می‌شود.

۶- مراجع

- Ahmadi, E., Norouzi, M., & Jalali, M. E. (2018). Ability of grout stone injection (Case study of Rudbar storage pump design in Lorestan), *The First National Conference on Modeling in Mining Engineering, Qazvin..* (In Persian)
- Amiri, M., Dousti, H. (2022). The effect of soil layering on the propagation of waves from surface explosions on buried tunnels (Case study of Isfahan metro tunnel, Sefeh-Azadi route). *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*. (In Persian)
- Amiri, M., Sanjari, M., & Porhonor, F. (2022). Microstructural evaluation of the cement stabilization of hematite-rich red soil. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00935.
- Amiri, M., Rajabi, S., & Darabi, M. (2019). Study of the Effect of Cross-sectional Geometry of Single and Twin Tunnels on the Ground Surface Settlement (Case study: Isfahan's Metro Tunnel). *Journal of civil environmental engineering*, 49.2(95), 35-46. (In Persian)
- Amiri, M., Ameri Siahouri, M., Ghasemi, S., Salehian, R. (2021). Investigation of the effect of tunnel excavation on the surrounding structures with a superior attitude on the heights and widths of the structures (Case study: Isfahan's Metro Tunnel). *Journal of Tunneling and Underground Space Engineering*, 10 (1), 57-69. (In Persian)
- Amiri, M., Asakereh, A., Atashpoosh, H. (2020). Investigation of strength and structure of marl soils stabilized with cement and nanosilica. *Journal of Engineering Geology*, 14 (1), 29-52.
- Assimaki, D., Kausel, E., & Whittle, A. (2000). Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(10), 859-869.
- ASTM, D. (1999). Standard test method for specific gravity of soils. *Test method A Procedure for Oven-Dried Specimens*.
- ASTM, D. (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. *ASTM West Conshohocken*

- Badaghabadi, S., Fooladchi, S., Mousavi, J. (2008). Determination of strength parameters of sandstone formations using porosity, *2nd Iranian Mining Engineering Conference, Tehran*. (In Persian)
- Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R., & Gouvenot, D. (2004). Shear modulus and damping ratio of grouted sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(6), 461-471.
- Danot, C., & Derache, N. (2007, November). Grout injection in the laboratory. In *International Symposium on Earth Reinforcement* (pp. 14-16).
- Dano, C., & Hicher, P. Y. (2003). Behavior of uncemented sands and grouted sands before peak strength. *Soils and foundations*, 43(4), 13-19.
- Doroodian, B., Ahangari, K., & Noorzad, A. (2022). Damage caused by mechanized tunnel boring in high-stress hard rock. *Transportation Geotechnics*, 34, 100741.
- Du, Q., Pan, T., Lv, J., Zhou, J., Ma, Q., & Sun, Q. (2019). Mechanical properties of sandstone cement-stabilized macadam. *Applied Sciences*, 9(17), 3460.
- Hashemi Hafdani, M. (2002). Using High Pressure Injection Method for Soil Improvement in Tunneling Issues, *Fifth Iran Tunnel Conference, Tehran*
- Javadanian, H., Haddad, A., & Jafarian, Y. (2016). Estimating the shearing modulus of Bushehr calcareous sand using resonant column and cyclic triaxial experiments. *Modares Civil Engineering Journal*, 9-20. (In Persian)
- Konstantinou, C., Biscontin, G., Jiang, N. J., & Soga, K. (2021). Application of microbially induced carbonate precipitation to form bio-cemented artificial sandstone. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(3), 579-592.
- Kordnaeij, A., Ziaie Moayed, R., & Soleimani, M. (2020). Small Strain Shear Modulus of Sands Grouted with Zeolite-cement Suspension. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5), 1277-1298. (In Persian)
- Makram Qutourlar, N., Ghaffarpour Jahromi, S., Gotmiri, B. (2018). A review of the factors affecting the shear modulus and sand damping ratio in the cyclic triaxial experiment. *Third National Conference on Geotechnical Engineering of Iran, Tehran*. (In Persian)
- Moomivand, H., Moomivand, H., Nikrouz, R., & Azad, R. (2022). Development of a New Empirical Relation to Assess P-wave Velocity Anisotropy of Rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(3), 1537-1550.
- Naraghi Araghi, N., Hashemi Tabatabai, S., & Beit Elahi, A. (2003). Comparison of shear wave velocity (VS) and destruction rate in Bam city in the earthquake of January 26, 2003. *Earth*, 5 (2), 109-118.
- Qiyasi, V., et al., (2021). Investigation of the effect of modulus of elasticity, shear modulus, damping ratio and shear wave velocity in soil dynamic analysis. *Road*, 29 (108), 87-100. (In Persian)
- Rahimi, H. (2014). *Geotechnical Engineering*, Tehran, Tehran University Publishing Institute

- Rahimi, Hassan (2016). *Geotechnical Engineering (Problematic Soils)*, Tehran, University of Tehran Publishing Institute
- Sakurai, S. (1997). Lessons learned from field measurements in tunnelling. *Tunnelling and underground space technology* 12(4), 453-460.
- Seiphoori, A., & Zamanian, M. (2022). Improving mechanical behaviour of collapsible soils by grouting clay nanoparticles. *Engineering Geology*, 298, 106538.
- Yubing Yang, et al., (2010). "Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel induced by ground explosion." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2(4): 373-384.
- Zhang, W., Han, L., Gu, X., Wang, L., Chen, F., & Liu, H. (2020). Tunneling and deep excavations in spatially variable soil and rock masses: A short review. *Underground Space*.
- Zheng, D., Tang, L., Wang, Y., & Sun, Y. (2022). Dynamic stress accumulation effects on soil strength under cyclic loading. *Soils and Foundations* 62(4), 101164.
- Zhang, Y., & Huang, F. (2011). Mechanism of different coseismic water-level changes in wells with similar epicentral distances of intermediate field. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1531-1541.

Evaluation of the effects of soil improvement using injection technique on the values of displacement and damages inflicted on the buried structure subjected to the propagation of explosion waves (A case study of Isfahan subway tunnel, Soffeh-Azadi route)

M. Amiri^{1*}; H. Dousti²

1- Associate Professor; University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, amiri@hormozgan.ac.ir

2- Master Student; University of Hormozgan, Faculty of Engineering. Hosseynduosti@yahoo.com

Received: 23 jun 2022; Accepted: 26 Oct 2022

DOI: 10.22044/tuse.2022.12034.1459

Keywords

Numerical study
Explosion
Soil improvement
Shear modulus
Buried structures

Extended Abstract

Summary

Prediction of soil response and the interaction between the structure and the surrounding soil requires understanding the behavior of soils under dynamic loads. Meanwhile, soil improvement, changes in shear modulus, and understanding the power of soil types is important in consuming the energy generated by dynamic loads. As a case study for a subway tunnel in Isfahan, the present work evaluates the effect of changes in soil shear modulus on reducing displacements of a buried tunnel crown influenced by a surface explosion. Modeling and analysis of the results in this study have been carried out using FLAC finite element software. The most critical case of a tunnel coverage subjected to TNT explosive load has been investigated and an attempt has been made to provide the safest condition for buried tunnels by injecting different amounts of cement slurry into each of the soil layers, strengthening the soil structure, and changing the shear modulus. Injection of cement slurry into the soil layers and the increase of elasticity and shear modulus of the soil have led to the reduction of displacements. Reinforcement of the sandstone layer has decreased the displacements in the concrete coverage of the buried tunnel crown by 74%, and it is 40% at the most if the alluvial layer is strengthened. In fact, the reinforcement of the alluvial layer at best protects the buried structure only against the explosion of 120 kg of TNT, but the reinforced sandstone layer protects it under the explosion of 502 kg of TNT.

Introduction

In two separate studies, due to the importance of discontinuities and their angles, a study has been made on 20 groups of cylindrical specimens with different discontinuity orientation angles (0, 30, 45, 60 and 90 degrees). Based on the results, the P-wave velocity increases significantly with increasing orientation angle (θ) and decreasing discontinuity frequency (F). In the second case, cement samples have been injected into all 20 groups and after 2 months, the wave velocity has been measured again. According to the results, the wave velocity increases in all samples. In addition, the wave velocity in most samples has been close to the size of the intact rock sample (Moomivand et al., 2021).

The effects of surface explosion on underground tunnel with circular cross section have been evaluated using ABAQUS finite element software. In this paper, the finite element model is first validated in comparison with the obtained experimental results. The results show that the dimensions of the explosion hole, obtained from the ABAQUS finite element software, are consistent with the dimensions of the hole obtained from the experimental work. In addition, the values of the stresses caused by the explosion on the soil, as well as the increase in air pressure during the period, give the same results as those obtained from the experimental test (Ahmed et al., 2022).

The present study investigates the improvement and reinforcement of soil and overburdens of Isfahan subway tunnel by considering changes to the soil mechanical parameters. On the other hand, it also investigates the interaction between the structure and soil after being reinforced. The present research aims to investigate the effects of injection-

based improvement process and changes of the soil shear modulus on the extent of displacements and damages inflicted on the buried structure subjected to the propagation of explosion waves.

Methodology and Approaches

The subway in Isfahan consists of five routes. The north-south route (the first phase of the project) starts from Kaveh Terminal and ends in Soffeh Terminal. Its length is 12.5 km, of which approximately 12 km of this length is in the basement.

A two-dimensional model is used for modeling the effects of explosion. In general, the propagation of blast waves is spherical in the soil environment and the interaction between the explosion and the impact load of the blast gas leads to strains around. As the paper is to investigate the parametric effects of surface and subsurface blast waves on a tunnel buried in the soil, the tunnel has been modeled by FLAC 2D, and the explosion has been simulated by AUTODYN software.

The soil layers in the Soffeh -Azadi route consist of rock fragments of different types. The route rocks are mainly composed of shale and sandstone. However, there is alluvial soil in some parts of the route. Moreover, in certain areas, an alluvium layer with the thickness of approximately 4 m is observed on the sandstone. Mohr – Coulomb behavior model has been applied for the soil of the area under evaluation. Several boreholes have been drilled in the tunnel route to determine the mechanical characteristics of the soil. Using laboratory experiments, the mechanical and geotechnical characteristics of the soil have been identified. Experiments of the present work have mostly been carried out based on the ASTM standards.

The internal friction angle (φ) and adhesion (C) of the soil have been determined based on the ASTM standard D3080 and the density (γ) has been determined based on the ASTM standard D854.

Blast loadings of 25, 56, 120, 165, 249 and 502 kg of TNT have been applied to the soil surface of the twin tunnel just above the western tunnel, and displacement values have been checked. Using the explosion points just above the western tunnel and distances D, 2D, 3D and 5D on the ground surface relative to the western tunnel center, the effect of different surface explosion distances has also been investigated.

Shear modulus values have also been applied incrementally to the model in three states of 2, 5, and 10 times. Numerical results of all three states are respectively named I, II, and III, and then, the results have been provided separately for each type of soil, together with the values of the intended parameters under the non-injected state.

Results and Conclusions

Sandstones fall under rocks with higher rates of porosity, which causes lower uniaxial compressive strength, Young, shear, and bulk moduli (Badagh abadi et al., 2008). Sandstones also destroy the structure when subjected to compression and shear forces (Konstantinou, et al. 2021). For this, it is possible to see various cracks in different points of the structure due to the loads applied by machinery, explosion, and tunnel drilling, which will cause soil layers to deposit (Amiri, et al. 2018). Furthermore, the soil environment is an unconsolidated environment, and to restore the rock mass texture and to increase its strength, the so-called jet grouting technique is used to improve the damaged areas.

The trend of displacement changes of the western tunnel crown subjected to the various TNT amounts under different soil states (natural soil conditions and various states of reinforced soil), and the displacement values almost falling under allowable limits in the states II and III are presented in this paper.

In the I state, the shear modulus value of the sandstone layer is twice the natural state. Displacement at the tunnel crown has dropped by 10-34% relative to the soil natural conditions, which decreases from 38 mm to 25 mm in a case explosion of 56 kg of TNT. Under an explosive load of 120 kg of TNT, the tunnel crown experiences a displacement of 51.3 mm under a natural state, which reduces to 46 mm when sandstone layers are improved under the state I. Displacements from explosions of 165, 249, and 502 kg of TNT decrease by 14.1, 23.3, and 37 mm, respectively, following the improvement in the state I compared to the natural state. However, the rates do not fall under the allowable limits (i.e., 39 mm).

This paper has also investigated the effects of soil layer improvement using injection technique on the displacement values and damages on the concrete covering of the buried tunnel subjected to various TNT amounts on the ground. Some of the most important results are as follows:

1. Soil layer improvement results indicate that the injection of cement grout into the sandstone has been effective, resulting in more desirable values of energy dissipation and reduced displacement.
-

2. Considering the displacement values, when the shear modulus of the alluvial layers increases, the displacement decreases by 8, 24, and 40%, respectively, under the states I, II, and III.
 3. After improving the sandstone layers and increasing its shear modulus, the displacement decreases from 34 to 74% under all three improvement states. Under the state I, the maximum load-bearing capacity occurs at 56 kg of TNT explosion. In the state II, the maximum load-bearing capacity of the tunnel crown occurs at 249 kg of TNT explosion. Finally, it is concluded that the buried structure is safe against possible explosive loads in the state III, considering the allowable displacement value (39 mm) of the tunnel crown concrete covering.
-