

بررسی عددی تاثیر پرکننده خرده لاستیک (TDA) در کاهش نیروهای داخلی تونل کند و پوش واقع در عمق‌های مختلف تحت شرایط استاتیکی

مقاله پژوهشی

امیرحسین اقلیدس^۱، مسعود رابطی مقدم^{۲*}، هادی صیادپور^۳، ام‌البنین پیرسبزی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، eghlidos.ah80@gmail.com

۲- استادیار؛ دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، rabeti@yu.ac.ir

۳- استادیار؛ دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، hadi@yu.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک؛ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، pirsabzibanin@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

شماره صفحات: ۲۲ تا ۴۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2026.16992.1506

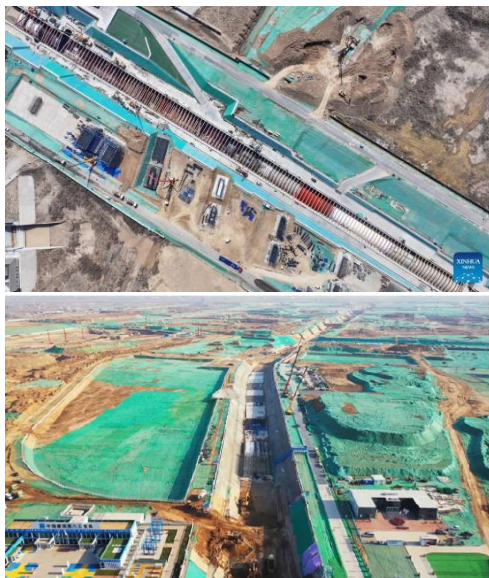
واژگان کلیدی	چکیده
تونل کند و پوش خرده‌لاستیک (TDA) تحلیل عددی مصالص پرکننده عمق قرارگیری تونل	طراحی سازه‌های زیرزمینی، به ویژه تونل‌ها، همواره نیازمند ارزیابی دقیق نیروهای داخلی ناشی از فشارهای استاتیکی سرباره وارد بر پوشش تونل است. در این راستا، استفاده از مصالح سبک و انعطاف‌پذیر همچون خرده لاستیک مشتق شده از تایرهای فرسوده (TDA) به عنوان مصالح اطراف تونل، راهکاری نوین و مؤثر در کاهش تنش‌های وارده به سازه محسوب می‌شود. این ماده با ویژگی‌هایی نظیر وزن مخصوص کم، مدول سختی پایین، و قابلیت جذب تنش، می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود رفتار مکانیکی تونل ایفا کند. در پژوهش حاضر، عملکرد خرده لاستیک TDA در کاهش نیروهای داخلی تحت شرایط بارگذاری استاتیکی به صورت عددی بررسی شده است. ابتدا مدل عددی از طریق یک تونل کند و پوش بررسی شده در چین مورد راستی آزمایی قرار گرفت. تونل در سه نسبت عمق بدون بعد $h/a=1.5, 2.5, 3.5$ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد با افزایش عمق مدفون، نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش در حالت استفاده از خرده‌لاستیک کمتر است. به‌طور متوسط، در حضور خرده لاستیک، نیروی برشی در اجزای تونل بین ۲۰ تا ۵۷ درصد و گشتاور خمشی بین ۱۵ تا ۳۵ درصد کاهش یافت و بیشترین کاهش مربوط به دیواره‌های جانبی تونل بود. همچنین، جابجایی قائم بیشینه با حضور خرده‌لاستیک افزایش یافت که بیانگر کاهش سختی مؤثر خاک اطراف تونل است. در نتیجه، خرده‌لاستیک با ایجاد رفتار نرم‌تر در توده خاک موجب توزیع مجدد تنش‌ها و کاهش نیروهای داخلی تونل می‌شود، هرچند تغییر شکل کلی اطراف سازه افزایش یافت.

مناطق شهری روزبه‌روز محدودتر شده است. این محدودیت موجب شده تا نگاه‌ها بیش از پیش به بهره‌برداری از فضاهای زیرزمینی معطوف شود. در این میان، تونل‌ها به‌عنوان یکی از

۱- پیش‌گفتار

در سال‌های اخیر، با شتاب گرفتن روند صنعتی‌سازی و توسعه اقتصادی در بسیاری از کشورهای پیشرفته، فضای سطحی در

لاستیک فرسوده در آمریکا تولید شده است. دفن این لاستیک‌ها در زباله‌دان‌ها مشکل‌ساز است و بازیافت آن‌ها بهترین راه‌حل محسوب می‌شود. این لاستیک‌ها می‌توانند به عنوان سوخت، مصالح ساختمانی یا لاستیک خرد شده مورد استفاده قرار گیرند (Mahgoub & El Naggar, 2020).



شکل ۱- تونل کند و پوش مناطق شیونگان چین

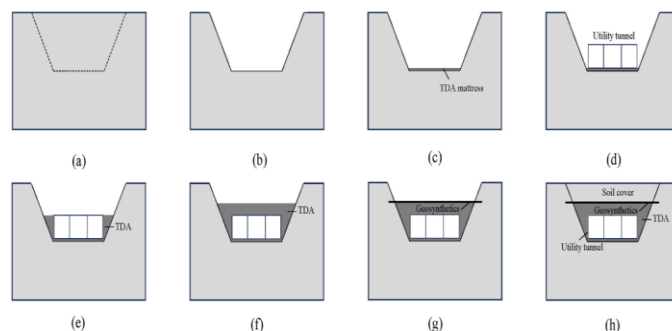
مشتقات خرده‌لاستیک یک مصالح نوین ساختمانی هست که از خرد کردن لاستیک‌های فرسوده تولید می‌شود و در پروژه‌های عمرانی به کار گرفته می‌شود و به عنوان جایگزینی پایدار برای مصالح طبیعی استفاده می‌شود. این ماده ویژگی‌های جذابی مانند وزن سبک، نفوذپذیری بالا، عایق لرزه‌ای، مدول پایین و میرایی زیاد ارائه می‌دهد. این ماده سبک‌وزن، دارای چگالی نسبی بین ۱٫۱۵ تا ۱٫۲۱ بوده و به مراتب سبک‌تر از مصالح متداول با چگالی ۲٫۵۵ تا ۲٫۷۵ است. از این رو، خرده‌لاستیک به عنوان جایگزینی مناسب برای سایر مصالح در پروژه‌های عمرانی، به صورت خالص یا ترکیب با خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌هایی چون وزن کم، خاصیت آب‌گریزی، دوام مناسب، انعطاف‌پذیری بالا، هدایت حرارتی پایین و مقاومت کششی قابل قبول، از جمله دلایلی هست که موجب استفاده گسترده از خرده‌لاستیک در کاربردهای مختلف عمرانی شده است (Aydilek et al., 2006 & Hennebert et al., 2014). چشمگیر، TDA دارای قیمت کمتری نسبت به مصالح سنتی نیز هست. این مزایا باعث می‌شود TDA برای پروژه‌های

مؤثرترین گزینه‌ها برای توسعه زیرساخت‌های شهری، به‌ویژه در حوزه حمل‌ونقل، مورد توجه قرار گرفته‌اند. در کلان‌شهرها، تونل‌های مترو اغلب در زیر خیابان‌ها و معابر اصلی احداث می‌شوند تا بدون ایجاد اختلال در فعالیت‌های سطحی، پاسخگوی نیازهای روزافزون ترافیکی باشند (Liu et al., 2022). با توجه به نقش حیاتی تونل‌ها در زندگی روزمره شهروندان، به‌ویژه در زمینه حمل‌ونقل عمومی، موضوع پایداری و ایمنی این سازه‌ها در طول بهره‌برداری از آن‌ها به یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان ژئوتکنیک و برنامه‌ریزان شهری تبدیل شده است. تونل‌ها امروزه نه تنها برای حمل‌ونقل، بلکه برای انتقال آب، فاضلاب و سایر خدمات شهری نیز استفاده می‌شوند و نقش مهمی در تحقق توسعه پایدار ایفا می‌کنند. بهره‌برداری از فضاهای زیرزمینی البته پدیده‌ای نوظهور نیست؛ به عنوان نمونه، شهر زیرزمینی درین‌کویو در ترکیه نشان می‌دهد که انسان‌ها از دیرباز از فضاهای زیرزمینی برای مقابله با چالش‌های محیطی استفاده کرده‌اند. امروزه این سنت دیرینه با فناوری‌های نوین ترکیب شده است. برای مثال، متروی توکیو که در سال ۲۰۱۵ روزانه به بیش از ۱۳ میلیون نفر خدمات‌رسانی می‌کرد، که نمونه‌ای شاخص از اهمیت توسعه تونل‌های زیرزمینی در کلان‌شهرهای پرتراکم است. همچنین یکی از روش‌های پرکاربرد در احداث تونل‌ها، روش کند و پوش است (شکل ۱). در این روش، ابتدا زمین حفر می‌شود، سپس سازه تونل در محل اجرا شده و در نهایت، سطح زمین مجدداً با خاک پر می‌شود. این تونل‌ها معمولاً به صورت قاب‌های جعبه‌ای طراحی می‌شوند و در محیط‌های شهری که با محدودیت فضا مواجه‌اند، با استفاده از گودبرداری مهارشده ساخته می‌شوند. این روش از قرن نوزدهم برای ساخت متروی لندن آغاز شد و در قرن بیستم در شهرهایی مانند برلین گسترش یافت. تونل‌های کند و پوش عمده‌تاً در عمق‌های کم تا متوسط ۶ تا ۱۲ متر اجرا می‌شود و برای اعماق بیش از ۱۸ متر به دلیل چالش‌های اجرایی کمتر از این نوع روش حفاری استفاده می‌شود (Shadabi et al., 2020).

توسعه صنعت خودروسازی موجب افزایش چشمگیر لاستیک‌های فرسوده در جهان شده است که دفع ناصحیح آن‌ها تهدیدی برای محیط زیست و سلامت انسان است. طبق گزارش USTMA، در سال ۲۰۱۷ حدود ۴ میلیون تن

(Xieo et al., 2012 & Meguid et al., 2018 & Ni et al., 2018) در شکل ۲، روش مدل سازی و پرکردن خاکریز خردده لاستیک اطراف تونل نشان داده شده است.

مختلفی ایده‌آل باشد، همچنین از کاربردهای خردده لاستیک در ادبیات فنی گذشته می‌توان به عنوان مصالح زهکش در محل‌های دفن زباله، خاکریزها، دیوار حائل و ... اشاره کرد



شکل ۲- روش مدل سازی و پرکردن خاکریز خردده لاستیک اطراف تونل (Sun et al., 2024)

Handy, 1973). همچنین (Ni et al., 2018 & Meguid et al., 2018 & Youssef, 2018) در دو آزمایش تمام مقیاس و تحلیل عددی با نرم افزار اجزا محدود پلکسیس سه بعدی ثابت کردند که TDA به طور چشمگیری تنش‌های منتقل شده به لوله‌های زیر پی‌های سطحی را کاهش می‌دهد. همچنین، در پروژه‌ای در اسپانیا از لایه‌ای به ضخامت ۲ متر خردده لاستیک برای کاهش تنش‌های وارد بر دیواره‌های تونل استفاده شد که نتایج آن موفق آمیز بود (Rodríguez et al., 2018). با وجود مطالعات متعدد در زمینه کاربرد خردده لاستیک مشتق شده از تایرهای فرسوده (TDA) در کاهش تنش‌های وارده بر سازه‌های مدفون نظیر لوله‌ها، دیوارهای حائل و سازه‌های ژئوتکنیکی، تحقیقات محدودی به بررسی تأثیر این مصالح بر رفتار سازه‌ای تونل‌های کند و پوش تحت بارگذاری استاتیکی سربار پرداخته‌اند. همچنین اثر عمق مدفون‌شدگی تونل بر میزان کارایی خردده لاستیک در کاهش نیروهای داخلی پوشش تونل به‌طور جامع مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از این‌رو، در پژوهش حاضر تأثیر استفاده از لایه خردده لاستیک به‌عنوان مصالح پرکننده اطراف تونل بر نیروهای داخلی شامل نیروی برشی و گشتاور خمشی و نیز تغییرشکل‌های تونل در شرایط استاتیکی و در عمق‌های مختلف مدفون‌شدگی، با استفاده از نرم افزار *FLAC2D* مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار این مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مشخصات مدل عددی، هندسه مسئله، ویژگی‌های مصالح و در بخش سوم فرآیند راستی‌آزمایی مدل ارائه شده است. در بخش چهارم،

طبق استاندارد *ASTM D6270 (2012)* خردده لاستیک ضایعاتی (*Tire Drive Aggregate*) را می‌توان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

نوع A: حداکثر اندازه ذرات برابر ۷۵ میلی‌متر

نوع B: حداکثر اندازه ذرات برابر ۳۰۵ میلی‌متر

همچنین پژوهش‌هایی در رابطه با اثرات زیست محیطی استفاده از خردده لاستیک ضایعاتی توسط پژوهشگران نشان می‌دهد استفاده از خاکریز خردده لاستیک، پس از گذشت ۱۲ ماه، تأثیر آن را بر کیفیت آب زیرزمینی بررسی کردند ناچیز بوده است (Edil & Bosscher, 1992). همچنین (Katz & Humphrey, 2001) با استفاده از آزمایش‌های میدانی تأثیر استفاده از خردده لاستیک را در سه آزمایش میدانی بررسی کردند که بررسی‌های آن‌ها نشان داد که استفاده از خردده لاستیک زیر سطح آب تأثیر ناچیزی بر کیفیت دارد. از کاربردهای دیگر مصالح خردده لاستیک به‌دلیل وزن سبک و خاصیت فشردگی بالا، به‌عنوان لایه‌ای کاهنده تنش در بالای لوله‌ها و تونل‌های مدفون استفاده شده است (Meguid & Youssef, 2018). فشار وارد بر سازه‌های مدفون به سختی نسبی بین سازه و خاک اطراف بستگی دارد. پرکننده خردده لاستیک باعث نشست بیشتر خاک بالای لوله نسبت به خاک اطراف شده و مکانیزم قوس مثبت ایجاد می‌کند که در نتیجه آن، فشار وارده به تاج لوله کاهش می‌یابد. در مقابل، در صورتی که نشست خاک بالای لوله کمتر از خاک اطراف باشد، قوس منفی شکل گرفته و فشار افزایش می‌یابد. (Spangler &

رسوب گذاری، نوع خاک و ویژگی های لیتولوژیکی و چینه شناسی لایه های سطحی تا عمق ۱۰۰ متر در این منطقه در ۴۹۶ گمانه، به سه واحد زمین شناسی اصلی تقسیم می شود (Tian et al., 2021).

- هولوسن کواترنری (Qh)

- پلیستوسن بالایی ($Q3p$)

- پلیستوسن میانه ($Q2p$)

ویژگی های لیتولوژیکی منطقه، که اطلاعات ارزشمندی

درباره ی نوع سنگ و رسوبات موجود ارائه می دهد حاوی اطلاعات زیر است:

- بافت و دانه بندی (از جمله اندازه، شکل و نحوه ی توزیع دانه های معدنی)

- ترکیب کانی شناسی (بیانگر نوع و درصد کانی های تشکیل دهنده ی سنگ هاست)

- ساختار و نحوه ی لایه بندی (از جمله چیدمان و چین خوردگی لایه ها)

بررسی این خصوصیات این منطقه طبق پژوهش سان و همکاران و تیان و همکاران نشان می دهد که خاک های موجود در این ناحیه عمدتاً از ماسه و رس تشکیل شده اند؛ هر یک با ساختار و ترکیب ویژه ی خود، نقش مهمی در رفتار ژئوتکنیکی و دینامیکی منطقه ایفا می کنند (Sun et al., 2024 & Tian et al., 2021). جدول ۱، مشخصات مکانیکی و مقاومتی پارامترهای را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و مقاومتی پارامترهای خاک (Sun et al., 2024)

ردیف	عمق (m)	وزن مخصوص (kg/m^3)	مدول یانگ (MPa)	ضریب پواسن	چسبندگی (kPa)	$\varphi(^{\circ})$
۱	۱۰-۰	۱۹۹۰	۲۰۳	۰/۳	۳۳/۶	۱۵/۱
۲	۲۰-۱۰	۲۰۰۰	۴۱۹	۰/۳	۳۵/۲	۱۴/۸
۳	۳۰-۲۰	۲۰۱۰	۵۵۸	۰/۳	۳۸/۹	۱۴/۸
۴	۴۰-۳۰	۲۰۱۰	۶۶۰	۰/۳	۴۲/۳	۱۴/۶
۵	۵۰-۴۰	۲۰۰۰	۸۲۸	۰/۳	۴۲/۴	۱۶/۷
۶	۶۰-۵۰	۲۰۰۰	۹۹۱	۰/۳	۴۴/۳	۱۶/۶
۷	۸۰-۶۰	۲۰۱۰	۱۲۳۶	۰/۳	۵۵/۲	۱۶/۴

شده است. ساختار تونل های کند و پوش به دلیل عمق کم، پس از حفاری برای اجرای سازه، فضای ایجاد شده معمولاً با خاک پر می شود. در این پژوهش، مشخصات تونل جعبه ای با

نتایج تحلیل های عددی و اثر استفاده از خرده لاستیک بر رفتار تونل در عمق های مختلف مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در نهایت، مهم ترین یافته های پژوهش و نتیجه گیری های حاصل در بخش چهارم ارائه شده اند.

۲- مشخصات ژئوتکنیکی منطقه و مشخصات

هندسی تونل

۱-۲ مقدمه

به منظور بررسی تأثیر خرده لاستیک بر پاسخ نیروهای داخلی در شرایط استاتیکی تونل و عمق قرارگیری تونل، یک مطالعه موردی که بر روی تونل کند و پوش واقع در منطقه شیونگان چین انجام شده؛ به عنوان مرجع صحت سنجی و ارزیابی و انتخاب نرم افزار قرار گرفته است. منطقه شیونگان یکی از سریع ترین مناطق در حال توسعه چین محسوب می شود. در شکل ۱، تصویری از منطقه شیونگان در چین را نشان می دهد که در حال حاضر بیش از ۳۸۰ کیلومتر تونل تأسیساتی در دست احداث است.

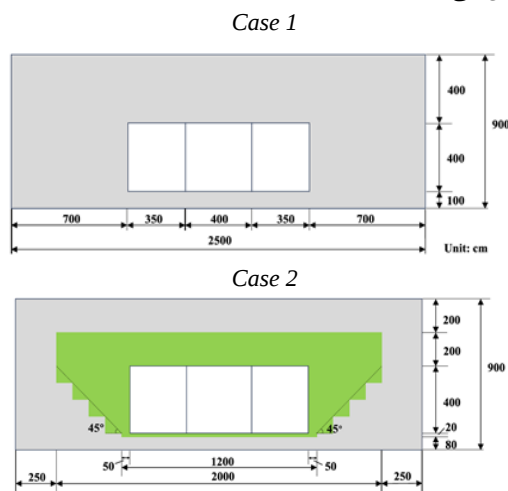
۲-۲ مشخصات ژئوتکنیکی

بر اساس مطالعات تیان (Tian) در سال ۲۰۲۱، نمونه های استخراج شده از گمانه های عمیق این منطقه نشان می دهد که لایه های بالایی زمین تا عمق ۱۰۰ متری، با توجه به سن

۳-۲ مشخصات هندسی تونل

ساختار تونل های کند و پوش در نظر گرفته شده بر اساس مطالعات سان و همکاران (۲۰۲۴) در منطقه شیونگان انتخاب

همکاران، ۴ آرایش مختلف خاکریز خرده‌لاستیک انجام شده است. در حالت اول، تونل بدون حضور پرکننده خرده‌لاستیک در نظر گرفته شده است. در حالت دوم، تنها خاکریز جانبی استفاده شده است. در حالت سوم، ترکیبی از خاکریز جانبی و بالایی لحاظ شده و در حالت چهارم، خاکریزهای جانبی، بالایی و پایینی به‌طور همزمان به کار گرفته شده‌اند که بهینه‌ترین حالت موقعیت قرارگیری خرده‌لاستیک طبق مطالعه سان و همکاران وقتی که اطراف تونل در پوشش خرده‌لاستیک قرار می‌گیرد است. شکل ۳، حالت ۱ و ۲ را نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت قرارگیری خرده‌لاستیک در اطراف تونل (Sun et al, 2024)

۳-۲- مدل‌سازی تونل در نرم‌افزار FLAC 2D

نرم افزار فلک دو بعدی قابلیت تعریف و مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای در محیط خاکی را داراست. پیش از اعمال المان سازه‌ای تونل در مدل، لازم است که حجم مصالح موجود در محدوده‌ی تونل برداشته شود و نسبت به منطقه که در آن تونل باید قرار بگیرد خاکبرداری کرد و محیط برای نصب المان سازه‌ای آماده کرد. در این پژوهش، با استناد به مطالعه سان و همکاران (Sun et al, 2024) برای مدل‌سازی تونل از جدول ۲، استفاده شده است.

۳-۳- مدل رفتاری مصالح خاک و خرده‌لاستیک

پس از ترسیم هندسه مدل مورد نظر، مرحله بعدی در فرآیند شبیه‌سازی عددی، اعمال مدل‌های رفتاری مناسب به مصالح مختلف محیط است.

مقطع مستطیلی که در منطقه شیونگان انجام شده است در نظر گرفته شده است. ابعاد تونل به عرض ۱۱ متر و ارتفاع ۴ متر است و ستون‌ها به فواصل ۳،۵ و ۴ متر قرار دارند. مصالح تونل با وزن مخصوص ۲۳۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول یانگ ۳۰،۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و رفتار مکانیکی آن به صورت الاستیک خطی مدل‌سازی شده است (Sun et al., 2024).

۳- اعتبار سنجی مدل عددی و روش انجام پژوهش

۳-۱- هندسه مدل و حالات مورد بررسی موقعیت قرارگیری خرده‌لاستیک

مطالعه سان و همکاران (Sun et al., 2024) به عنوان مطالعه صحت‌سنجی انتخاب گردید. در این مطالعه به بررسی کاربرد موقعیت قرارگیری خرده‌لاستیک به عنوان جداگر لرزه‌ای ژئوتکنیکی (GSI) در حفاظت از تونل‌های تأسیساتی نوع کند و پوش پرداخته شده است. سه آرایش متفاوت برای جایگذاری پرکننده TDA بررسی شده است: پرکننده جانبی، پرکننده جانبی همراه با پوشش بالایی، و پرکننده جانبی به همراه پوشش بالایی و پایینی به صورت ترکیبی که برای ارزیابی عملکرد سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق مطالعه سان و همکاران، بهینه‌ترین حالت موقعیت قرارگیری خرده‌لاستیک زمانی است که اطراف تونل در پوشش خرده‌لاستیک قرار می‌گیرد. در این راستا، طبق پژوهش سان و همکاران (Sun et al., 2024) یک مدل عددی جامع با در نظر گرفتن ویژگی‌های واقعی خاک و تونل ساخته شده و تاثیر عمق قرارگیری تونل در عمق بدون بعد، با و بدون حضور پرکننده از طریق تحلیل‌های استاتیکی مورد مقایسه قرار گرفته است. استفاده بهینه از این مصالح سبک‌وزن، عواملی نظیر ضخامت لایه پوششی خاک و میزان نشست احتمالی باید با دقت مورد توجه قرار گیرند. معمولاً نشست مصالح TDA در طول دوره ساخت و بهره‌برداری ناچیز بوده و با محاسبات دقیق قابل کنترل است. در موارد لزوم، بهسازی خاک مطابق شکل ۲، از طریق روش‌هایی مانند استفاده از ژئوگرید یا ژئوسل جهت افزایش پایداری و کاهش نشست انجام می‌شود (Sun et al., 2024). در پژوهش سان و

جدول ۲- مشخصات مکانیکی و مقاومتی تونل

مدل رفتاری	ضریب پواسن	مدول یانگ (MPa)	وزن مخصوص (kg/m^3)	سازه
الاستیک	۰/۲	۳۰۰۰۰	۲۳۶۰	Tunnel Beam Element

جدول ۳- مشخصات مکانیکی و مقاومتی پارامتر

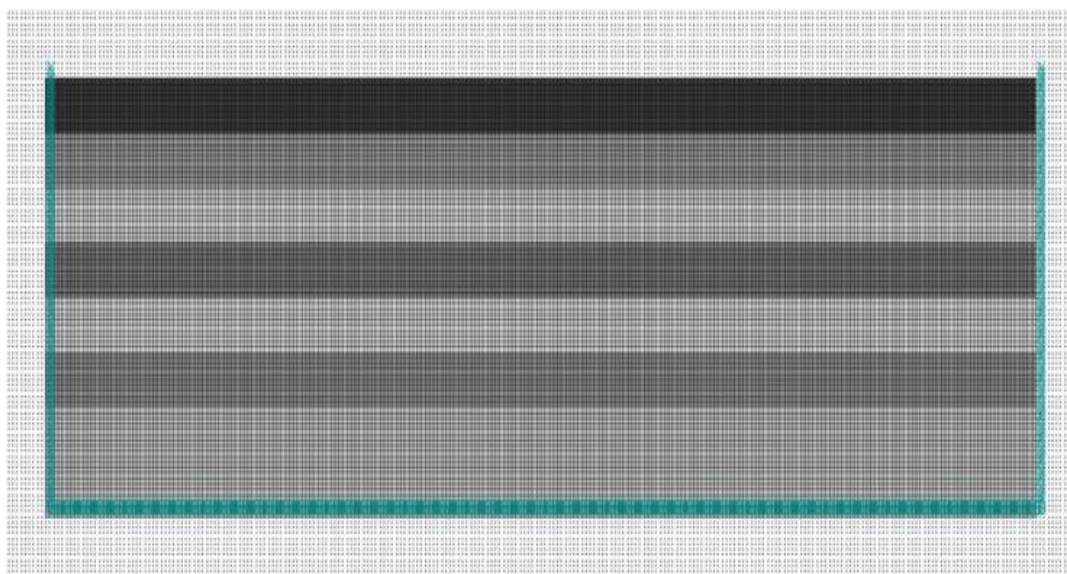
خرده لاستیک TDA (Sun et al, 2024)

مخالص	وزن مخصوص kg/m^3	مدول یانگ MPa	ضریب پواسن	چسبندگی kPa	زاویه اصطکاک داخلی خاک
TDA	600	10.24	0.28	13.3	22.2

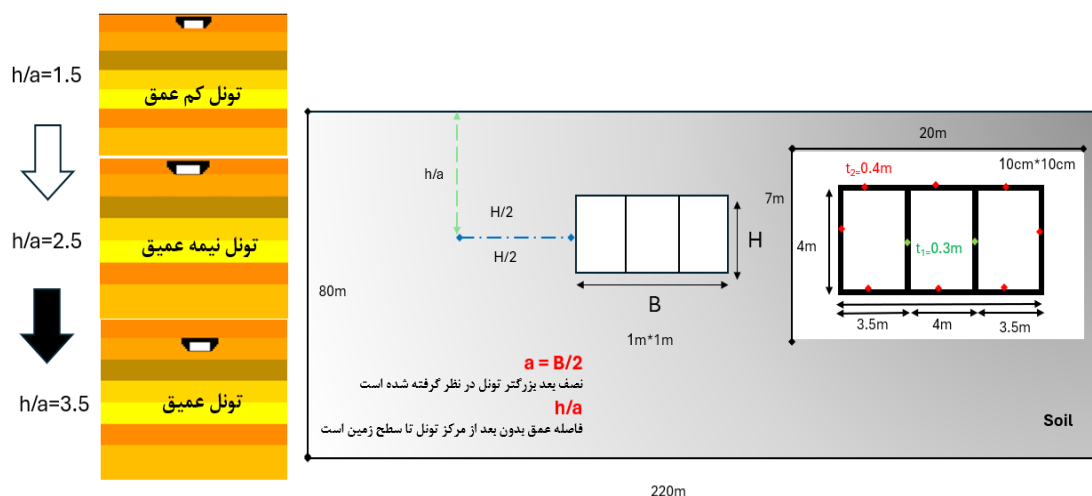
۳-۴- شرایط مرزی و تحلیل تنش‌های اولیه ساختگاه

مطابق شکل ۶، تحلیل استاتیکی اولیه برای تعیین تنش‌های اولیه در ساختگاه انجام شد. این مرحله باعث هماهنگی محیط عددی با شرایط واقعی زمین شده و از بروز خطاهای عددی در تحلیل‌های بعدی جلوگیری می‌کند. در تحلیل استاتیکی، شرایط مرزی مطابق شکل ۴، مرزهای جانبی مدل در راستای افقی مقید در نظر گرفته شد، که نشان‌دهنده عدم جابجایی افقی در لبه‌های مدل است. همچنین، گره‌های پایینی مدل در هر دو راستای افقی و عمودی و صلب در نظر گرفته شده. که از حرکت گره‌ها جلوگیری شود.

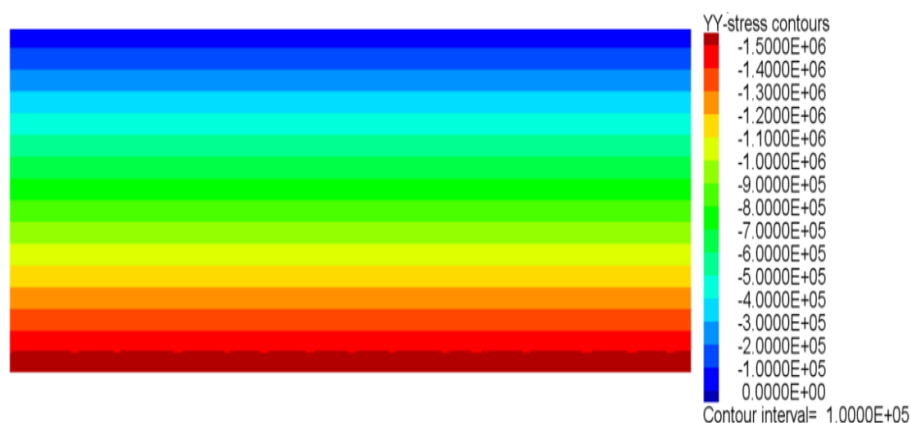
در این پژوهش، محیط شامل هفت لایه ژئوتکنیکی است که هرکدام ویژگی‌های مکانیکی متفاوتی دارند. برای شبیه‌سازی رفتار محیط اطراف تونل، از مدل رفتاری و معیار گسیختگی موهر-کولمب با استناد به پژوهش سان و همکاران استفاده شده است (Sun et al., 2024). چرا که این مدل قادر است رفتار گسیختگی برشی مصالح خاکی و سنگی را با دقت مناسبی نمایش دهد، که در این مرحله خصوصیات نظیر ضریب پواسن، چگالی، چسبندگی، مدول یانگ، زاویه اصطکاک داخلی خاک و ... طبق مشخصات جدول ۱، به عنوان پارامترهای ورودی این مدل رفتاری می‌باشد. همچنین برای مصالح خرده‌لاستیک (TDA) از جدول ۳، به عنوان پارامترهای ورودی در نرم‌افزار طبق پژوهش سان و همکاران استفاده شد.



شکل ۴- مدل اولیه و شرایط مرزی استاتیکی



شکل ۵- مدل عددی تونل و خاک



شکل ۶- تنش‌های اولیه ساختگاه

پارامترهای مکانیکی محیط و تونل آورده شده است. با توجه به نتایج کانتور نشست که در شکل ۷، برای حالت چهارم از موقعیت قرارگیری خرده لاستیک اطراف تونل طبق مطالعه سان و همکاران است را نشان می‌دهد که در بالای تونل مقداری بالا زدگی مشاهده می‌شود که مقدار آن برابر ۵ میلی متر است. این پدیده به دلیل حضور لایه خرده لاستیک در سقف تونل و ویژگی‌های مکانیکی آن رخ داده است. با توجه به این تفاوت‌ها، خرده لاستیک به عنوان یک لایه نرم و سبک عمل می‌کند و توانایی جذب و مهار کامل بار وارد شده از تونل را ندارد. در نتیجه، بخشی از خاک بالای تونل که روی این لایه قرار دارد، تحت اثر تغییرشکل‌های عمودی و جانبی خرده لاستیک، دچار جابجایی رو به بالا

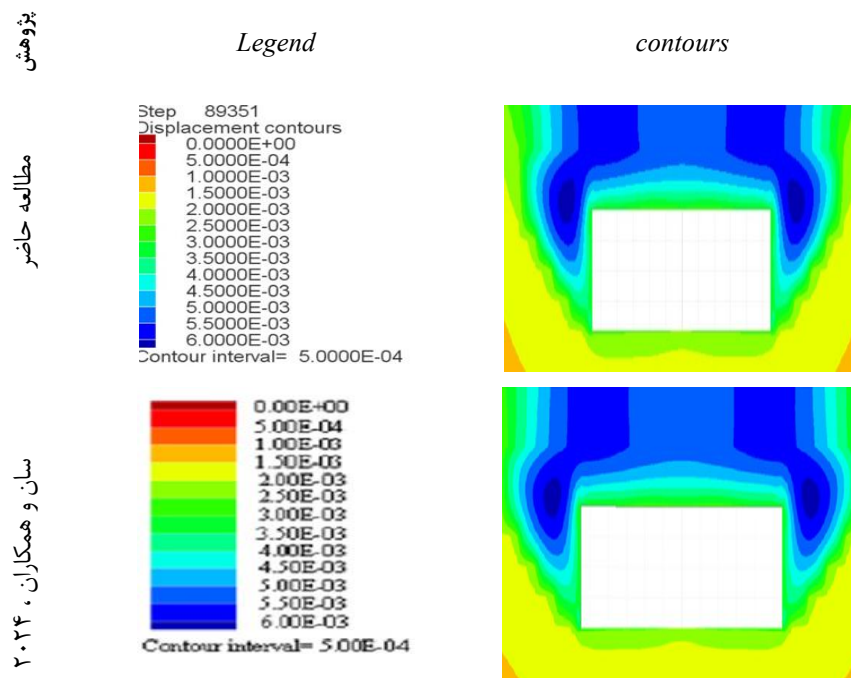
۳-۵- نتایج اعتبار سنجی مدل عددی مورد

پژوهش

برای اعتبارسنجی مدل عددی از پژوهش سان و همکاران استفاده شده است. این پژوهش به‌طور ویژه به تحلیل تأثیر موقعیت قرارگیری خرده لاستیک در اطراف تونل پرداخته و چارچوب مناسبی برای ارزیابی پژوهش حاضر است. در مدل‌سازی حاضر، تمامی مشخصات ژئوتکنیکی محیط، خواص مکانیکی و مقاومتی خرده لاستیک، و همچنین هندسه و مشخصات تونل مطابق با داده‌های ارائه شده در این پژوهش انتخاب شده‌اند. به همین منظور یک مدل عددی با ابعاد ۸۰*۲۲۰ مطابق شکل ۵، ساخته شد که در بخش‌های قبل

مطالعات پیشین سان و همکاران سازگاری دارد.

می شود که به صورت بالازدگی کوچک در سقف تونل مشاهده می شود. این مقدار بالا زدگی بسیار جزئی است و با نتایج



شکل ۷- مقایسه نتایج گزارش شده کانتور نشست عمودی در حالت استاتیکی TF با پرکننده خرده لاستیک در پژوهش سان و همکاران ۲۰۲۴ و مطالعه حاضر

داده است که تنش های اطراف سازه تا ۵۰ درصد کاهش می یابد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با پژوهش های سان و معقوب و همکاران هم راستا بوده است. حداکثر نیروهای داخلی در این حالت ها بین ۲۰ تا ۶۰ درصد کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً در لنگر خمشی و نیروی برشی دیوارهای جداکننده مشاهده می شود. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که استفاده از خرده لاستیک نه تنها نشست اضافی ایجاد نمی کند، بلکه به کاهش نیروهای داخلی کمک می کند. این موضوع اثربخشی استفاده از خرده لاستیک در بهبود عملکرد سازه ای تونل ها را تایید می کند.

۳-۶- مطالعه پارامتری

در این پژوهش، به بررسی تأثیر عمق قرارگیری تونل و اثر خرده لاستیک بر روی نیروهای داخلی تونل می پردازد. در این راستا، نقش پارامترهایی نظیر بهینه ترین موقعیت قرارگیری خرده لاستیک در اطراف تونل، بر اساس مطالعه سان و همکاران، انتخاب گردید. در این پژوهش، بهینه ترین حالت

به طور کلی، این پدیده ناشی از ترکیب اثر نرم بودن خرده لاستیک، وزن پایین آن و تفاوت سختی با خاک اطراف است. جدول ۴ و شکل ۸، به ترتیب درصد کاهش نیروهای داخلی در حالت استفاده از پرکننده و بدون پرکننده تفاوت نسب به حالت مرجع بدون خرده لاستیک نشان می دهد. همچنین شکل ۸، نمودار مقایسه ای درصد کاهش نیروهای داخلی در حالتی چهارم از موقعیت قرار گیری خرده لاستیک طبق مطالعه سان و همکاران را نشان می دهد. در حالت استفاده از پرکننده خرده لاستیک تأثیر قابل توجهی بر روی نیروهای داخلی ندارد و پایداری سازه را دچار مشکل نکرده است. در صورت استفاده از خرده لاستیک به طور کامل در اطراف تونل یا در بخش های اطراف و بالای تونل، نتایج بسیار مشابه به دست آمده است. در حالت های ۳ و ۴، به دلیل پوشش خاکی کم عمق و چگالی پایین خرده لاستیک، نشست قائم بالقوه به خوبی کنترل شده است؛ که در شکل ۱۰، نشان داده شده است. همچنین، مطالعه معقوب و النگار (۲۰۲۰) درباره استفاده از خرده لاستیک اطراف لوله های فولادی موج دار نشان

موقعیت قرارگیری خرده‌لاستیک حالت شماره چهار از پژوهش مذکور انتخاب شده که وجود پرکننده در نواحی فوقانی و تحتانی تونل می‌باشد. همچنین اثر عمق قرارگیری تونل در سه نسبت مختلف $h/a=1.5, 2.5, 3.5$ در حالتی که در حضور پرکننده و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک می‌باشد بررسی می‌شود. در این پژوهش نمودارهای نیروی برشی و گشتاور خمشی برای نیروهای داخلی تونل ترسیم شده است.

جدول ۴- مقایسه درصد کاهش نیروهای داخلی در قرارگیری های مختلف خرده‌لاستیک TDA

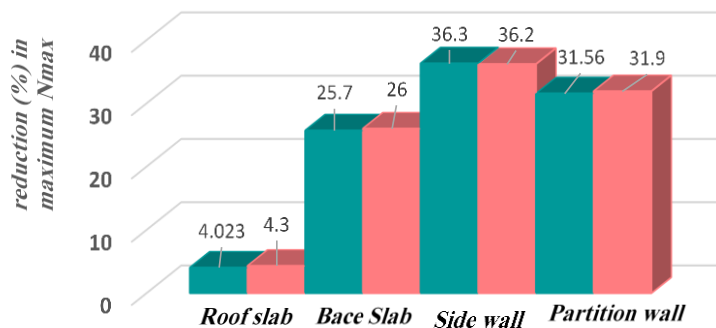
	N_{max}			M_{max}			Q_{max}		
	Case 2	Case 3	Case 4	Case 2	Case 3	Case 4	Case 2	Case 3	Case 4
 سقف تونل مطالعه حاضر	۱۵۱	۷.۲	۴	۷.۵	۳۵.۷	۴۰.۲	۵.۲۹	۳۲.۹	
سان و همکاران، ۲۰۲۴ سقف تونل	۶۹۱	۶.۶	۴.۳	۷.۹	۳۶.۲	۴۰.۶	۵.۶	۳۳.۲	۳۴.۸
کف تونل مطالعه حاضر	۶۱۱	۲۴.۹	۲۵.۷	۳.۵۵	۳۰.۵	۳۳.۰۸	۱۱.۹	۳۶.۶	۳۴.۰۹
سان و همکاران، ۲۰۲۴ کف تونل	۶۴۱	۲۴.۴	۲۶	۳.۶	۲۷.۵	۳۳.۶	۱۱.۸	۳۶.۸	۳۴.۱
دیوار گوشه سمت چپ مطالعه حاضر	۳۹۱	۴۰.۴	۳۶.۳	۱۳.۸	۲۷.۳	۳۵.۳۶	۱۲.۲۴	۲۲.۸	۲۷.۶۴
سان و همکاران، ۲۰۲۴ دیوار گوشه سمت چپ	۴۱	۴۰.۴	۳۶.۲	۱۴	۲۸	۳۶.۴	۱۲.۶	۲۲.۸	۲۷.۶
دیوار میانی مطالعه حاضر	۳۹	۳۰.۴	۳۱.۵۶	۳۶.۱	۱۵.۵	۵۸.۶	۴۰.۹	۱۵.۲	۶۲.۳
سان و همکاران، ۲۰۲۴ دیوار میانی	>	۳۰.۰۸	۳۱.۹	۳۰.۹	۱۷.۴	۵۶	۳۳.۶	۱۸.۶	۵۹.۱

بررسی عددی تأثیر پرکننده خرده لاستیک (TDA) در کاهش نیروهای داخلی ...، امیرحسین اقلیدس و ...، ص ۲۳-۴۲

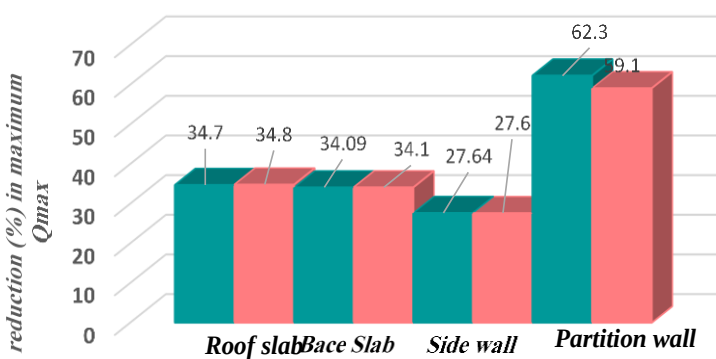
This Study

Sun et al. (2024)

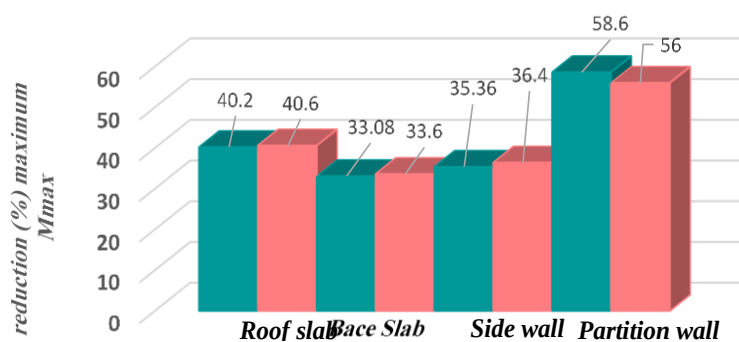
Nmax(الف)



Qmax(ب)

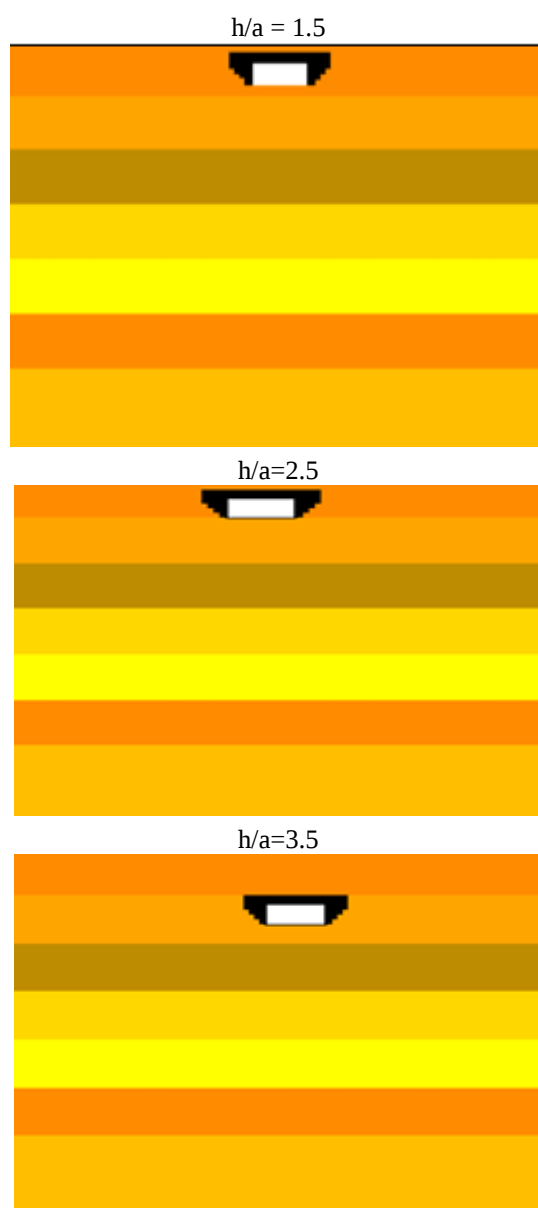


Mmax(ج)



شکل ۸- نتایج صحت سنجی تأثیر موقعیت خرده لاستیک در کاهش نیروهای داخلی در حضور پرکننده اطراف تونل که شامل؛

Nmax(الف) : Qmax(ب) : Mmax(ج)



شکل ۹- حالات قرار گیری تونل در عمق‌های مختلف با پر کننده خرده لاستیک

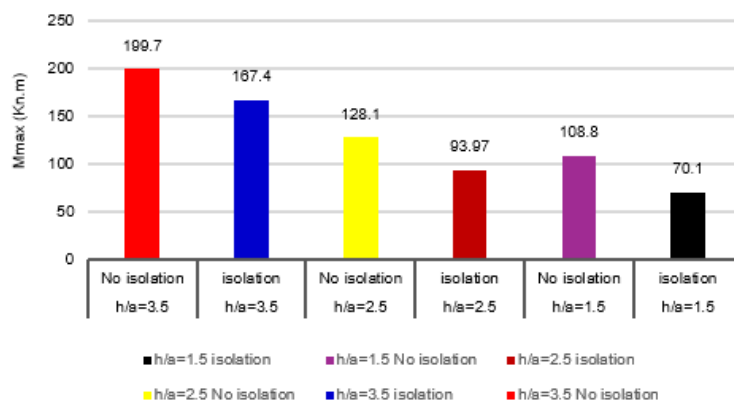
۴- تاثیر عمق قرارگیری تونل بر بیشینه گشتاور خمشی و نیرو برشی اجزای تونل در حضور پرکننده TDA

بررسی عملکرد استاتیکی تونل کند و پوش در سه نسبت مختلف عمق بدون بعد $h/a=1.5, 2.5, 3.5$ بررسی شده و تأثیر استفاده از خرده لاستیک TDA به عنوان لایه پرکننده در

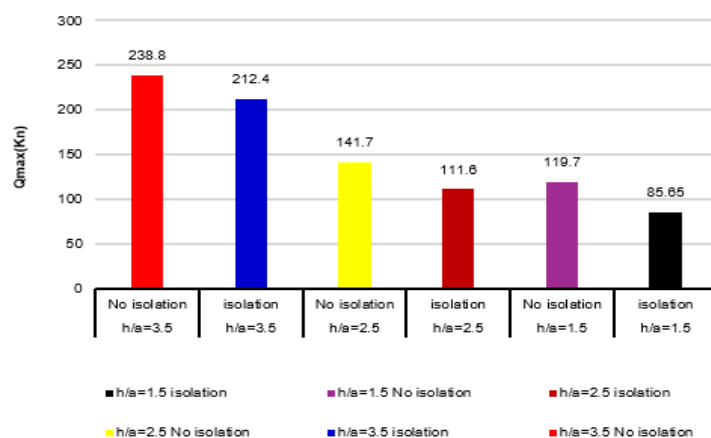
اطراف تونل، بر مقادیر بیشینه نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی مطابق شکل های ۱۰ تا ۱۳ ارزیابی شده است. همچنین نتایج به دست آمده از جدول ۴ و *Error! Reference source not found.* بیانگر تأثیر قابل توجه خرده لاستیک بر کاهش بارهای وارده به اجزای مختلف سازه ای تونل است. بر اساس *Error! Reference source not found.*

حالت وجود TDA نسبت به حالت بدون آن کاهش یافته است. به عنوان مثال، در نسبت، $h/a=3.5$ گشتاور خمشی در دال سقف از ۱۹۹٫۹ کیلونیوتن متر بدون TDA به ۱۶۷٫۴ کیلونیوتن با TDA کاهش یافته است. این روند در دیواره جانبی و دیوار گوشه نیز مشاهده شده و نشان دهنده کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد خمشی تونل در حضور لایه خرده لاستیک است. یکی دیگر از نتایج قابل توجه این مطالعه، وابستگی تأثیر TDA به عمق دفن تونل است. با افزایش نسبت h/a و به عبارتی با افزایش عمق مدفون بودن تونل، هم نیروهای برشی و هم گشتاورهای خمشی در هر دو حالت افزایش می یابند، اما میزان افزایش آنها در حالت بدون استفاده از TDA بسیار بیشتر از حالت استفاده از آن است.

مربوط به مقادیر بیشینه نیروهای برشی، مشخص است که در تمامی حالات بررسی شده، استفاده از TDA باعث کاهش چشمگیر مقادیر Q_{max} در اجزای مختلف تونل از جمله دیوار جانبی چپ، دیواره میانی، دال سقف و دال کف شده است. این کاهش در شرایط $h/a=3.5$ بسیار ملموس تر است، به طوری که مقدار نیروی برشی در دیواره میانی از ۳٫۴۱۲ کیلو نیوتن در حالت بدون TDA به ۱٫۶۴۴ کیلو نیوتن با حضور TDA کاهش یافته است که حاکی از بیش از ۵۰ درصد کاهش نیرو می باشد. چنین روندی در سایر اجزا نیز دیده می شود، که نشان می دهد TDA نقش مؤثری در کاهش انتقال نیروهای برشی به سازه دارد. همچنین در بررسی گشتاورهای خمشی بیشینه نیز روند مشابهی مشاهده می شود. مقادیر گشتاور خمشی در تمام بخش ها، به ویژه در دال سقف و دال کف، در



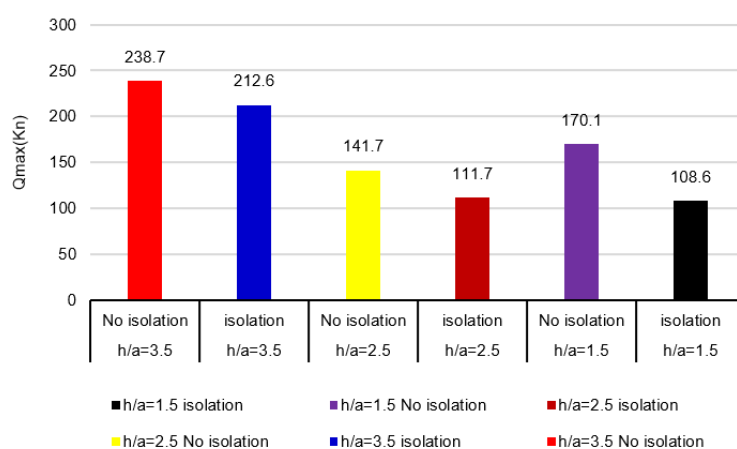
الف- بیشینه مقدار گشتاور خمشی سقف تونل در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک تونل



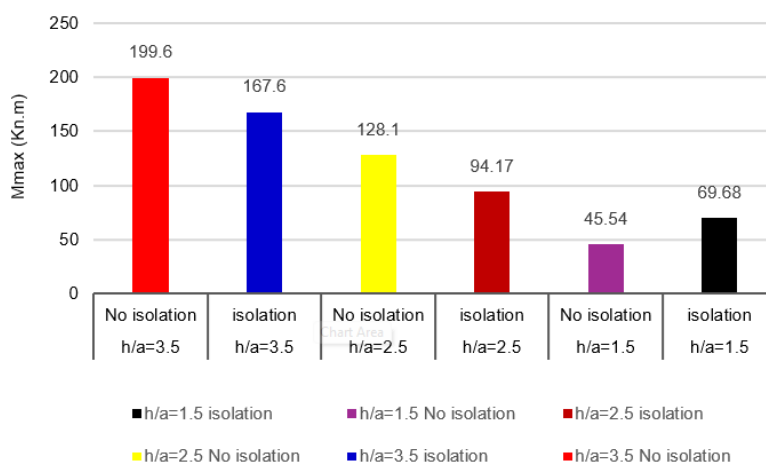
ب - بیشینه مقدار نیرو برشی سقف تونل در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک
شکل ۱۰- بیشینه مقدار گشتاور خمشی و بیشینه مقدار نیرو برشی سقف تونل

جدول ۵- مقادیر بیشینه گشتاور خمشی با پرکننده و بدون پرکننده در نسبت عمق های بدون بعد

$M_{max} (Kn.m)$					حالات مورد بررسی
Left partition wall	Left Side Wall	Bace Slab	Roof Slab		
۳/۲۱۷	۷۷/۱۳	۶۹/۶۸	۷۰/۱	$h/a=1.5$	با پرکننده
۱/۹۰۶	۱۱۵/۹	۹۴/۱۷	۹۳/۹۷	$h/a=2.5$	
۴/۱۹۱	۲۵۵/۷	۱۶۷/۶	۱۶۷/۴	$h/a=3.5$	
۱۰۸/۶	۱۰۸/۶	۵۴/۴۵	۱۰۸/۸	$h/a=1.5$	بدون پرکننده
۱۵۴	۴/۳۸۶	۱۲۸/۱	۱۲۸/۱	$h/a=2.5$	
۴/۵۲۶	۲۷۸	۱۹۹/۶	۱۹۹/۷	$h/a=3.5$	



الف- بیشینه مقدار نیرو برشی کف تونل در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک



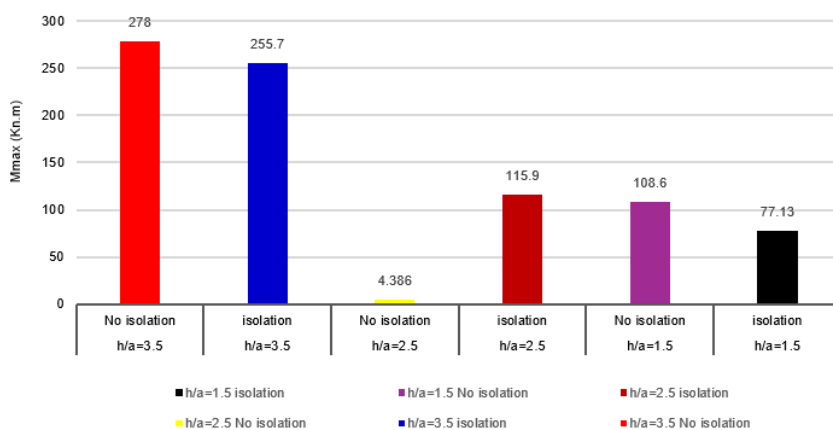
ب- بیشینه مقدار گشتاور خمشی کف تونل در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک

شکل ۱۱- بیشینه مقدار نیرو برشی کف تونل و بیشینه مقدار گشتاور خمشی کف تونل

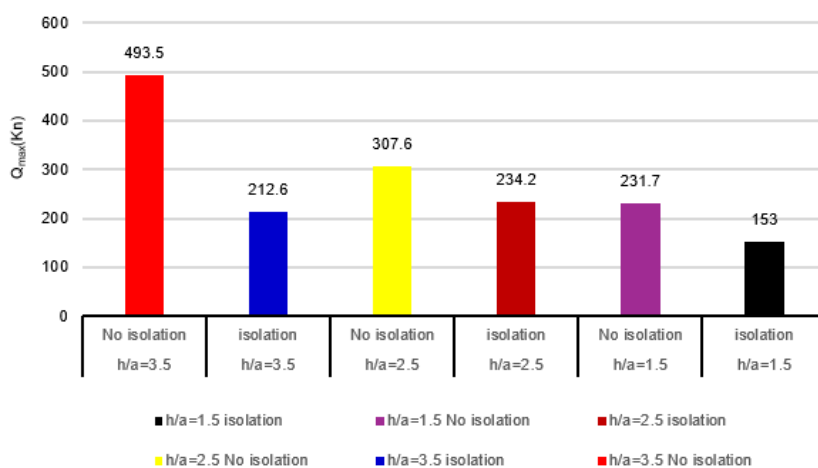
بررسی عددی تأثیر پرکننده خرده لاستیک (TDA) در کاهش نیروهای داخلی ...، امیرحسین اقلیدس و ...، ص ۲۳-۴۲

جدول ۶- مقادیر بیشینه نیرو برشی با پرکننده و بدون پرکننده در نسبت عمق های بدون بعد

Q_{max}				حالات مورد بررسی
Left partition wall	Left Side Wall	Base Slab	Roof Slab	
۸۶/۴۹	۱۵۳	۱۰۸/۶	۸۵/۶۵	$h/a=1.5$
۰/۹۵	۲۳۴/۲	۱۱۱/۷	۱۱۱/۶	$h/a=2.5$ با پرکننده
۱/۶۴۴	۲۱۲/۶	۲۱۲/۶	۲۱۲/۴	$h/a=3.5$
۱۱۹/۷	۲۳۱/۷	۱۷۰/۱	۱۱۹/۷	$h/a=1.5$
۲/۰۸۸	۳۰۷/۶	۱۴۱/۷	۱۴۱/۷	$h/a=2.5$ بدون پرکننده
۱/۷۸۴	۴۹۳/۵	۲۳۸/۷	۲۳۸/۸	$h/a=3.5$

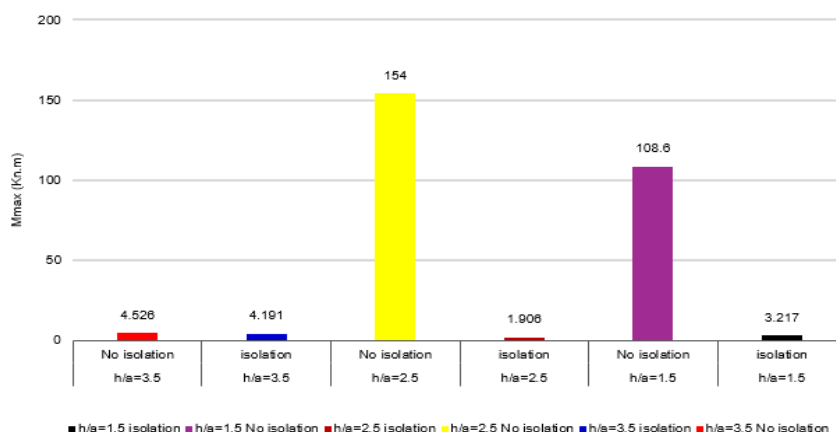


الف- بیشینه مقدار گشتاور خمشی دیوار گوشه در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک؛

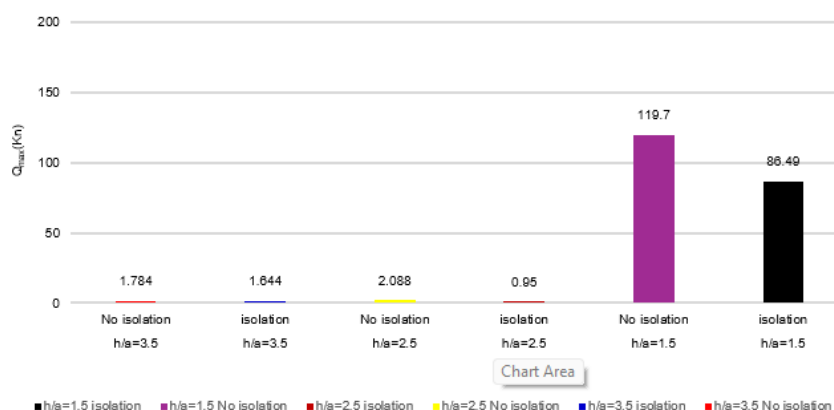


ب- بیشینه مقدار گشتاور خمشی کف تونل در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک

شکل ۱۲- بیشینه مقدار گشتاور خمشی دیوار گوشه و بیشینه مقدار گشتاور خمشی کف تونل



الف- بیشینه مقدار گشتاور خمشی دیوار میانی در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک؛



ب- بیشینه مقدار نیرو برشی کف تونل در حضور و بدون حضور پرکننده خرده لاستیک

شکل ۱۳- بیشینه مقدار گشتاور خمشی دیوار میانی و بیشینه مقدار نیرو برشی کف تونل

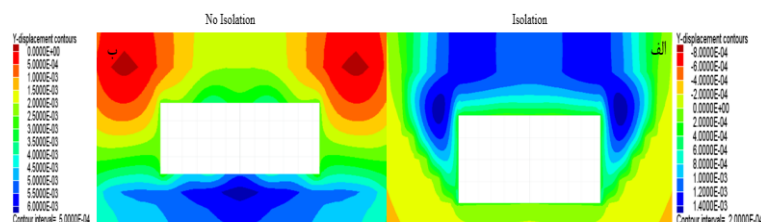
با افزایش عمق مدفون شدگی تونل بیشتر می شود. بنابراین، در شرایط ژئوتکنیکی سخت تر یا در پروژه هایی با عمق زیاد، استفاده از خرده لاستیک می تواند به عنوان یک راهکار مؤثر در طراحی مقاوم تر و بهینه تر مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، می توان نتیجه گرفت که خرده لاستیک با خواص مکانیکی خاص خود مانند انعطاف پذیری بالا و قابلیت جذب انرژی، می تواند نقش مهمی در کاهش اثرات بارگذاری استاتیکی بر تونل های مدفون داشته باشد. استفاده از این ماده نه تنها موجب بهبود عملکرد سازه ای تونل می شود، بلکه از نظر اقتصادی و زیست محیطی نیز می تواند گزینه ای مناسب برای بازیافت ضایعات لاستیکی و افزایش دوام سازه ها در برابر بارهای وارده باشد.

همچنین مطابق جدول ۷ و شکل ۱۴ تا شکل ۱۶، نشان می دهد که استفاده از خرده لاستیک به عنوان پرکننده تأثیر قابل توجهی در کاهش جابجایی عمودی اطراف تونل دارد. در تمامی حالات بررسی شده، میزان جابجایی در حالت وجود پرکننده به طور میانگین حدود ۷۰ درصد کمتر از حالت بدون پرکننده است. همچنین با افزایش نسبت، h/a جابجایی های عمودی کاهش یافته که بیانگر نقش مؤثر عمق در پایداری تونل است؛ هرچند این روند کاهش در اعماق بیشتر، شیب کمتری دارد. بنابراین، به کارگیری خرده لاستیک در کنار انتخاب عمق مناسب می تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد ژئوتکنیکی تونل های کم عمق ایفا کند این موضوع نشان می دهد که اثربخشی خرده لاستیک در کاهش نیروهای داخلی

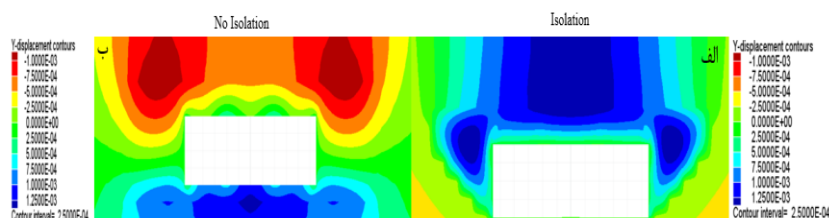
بررسی عددی تأثیر پرکننده خرده لاستیک (TDA) در کاهش نیروهای داخلی ... امیرحسین اقلیدس و ...، ص ۲۳-۴۲

جدول ۷- مقادیر بیشینه جابجایی سقف و کف تونل با پرکننده و بدون پرکننده در نسبت عمق‌های بدون بعد

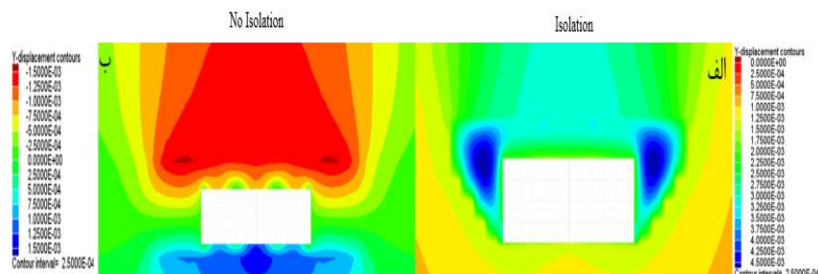
حالات مورد بررسی	maximum vertical displacement (cm)
$h/a=1.5$	0.6
با پرکننده	0.5
$h/a=2.5$	0.45
$h/a=3.5$	0.14
بدون پرکننده	0.12
$h/a=1.5$	0.15
$h/a=2.5$	
$h/a=3.5$	



شکل ۱۴- کانتور جابجایی عمودی در نسبت عمق بدون بعد $h/a=1.5$: الف) در حضور پرکننده خرده لاستیک؛ ب) بدون حضور پرکننده خرده لاستیک



شکل ۱۵- کانتور جابجایی عمودی در نسبت عمق بدون بعد $h/a=2.5$: الف) در حضور پرکننده خرده لاستیک؛ ب) بدون حضور پرکننده خرده لاستیک



شکل ۱۶- کانتور جابجایی عمودی در نسبت عمق بدون بعد $h/a=3.5$: الف) در حضور پرکننده خرده لاستیک؛ ب) بدون حضور پرکننده خرده لاستیک

۵- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد مصالح خاگریز حاوی خرده‌لاستیک (TDA) به عنوان جداگرهای لرزه‌ای پیرامون یک تونل تاسیساتی است. این بررسی در نسبت‌های مختلف عمق بدون بُعد $h/a=1.5, 2.5, 3.5$ و در یک ساختگاه واقعی واقع در منطقه شیونگان چین انجام شده است. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از مطالعات سان و همکاران و تیان و همکاران استخراج گردیده‌اند. تحلیل‌ها در دو حالت با حضور و بدون حضور خرده‌لاستیک، با استفاده از نرم‌افزار $FLAC$ 2D، که یکی از نرم‌افزارهای معتبر در زمینه تحلیل اندرکنش لرزه‌ای تونل‌ها محسوب می‌شود، انجام گرفته است. از این رو مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

۱- خرده‌لاستیک (TDA) به‌عنوان یک لایه پرکننده، عملکرد مؤثری در کاهش نیروهای داخلی تونل‌های کم‌عمق دارد.

۲- افزایش ضخامت این لایه می‌تواند به بهبود عملکرد جداسازی کمک کند، اما لازم است ایمنی و پایداری تونل در شرایط استاتیکی به‌دقت بررسی شود تا از بروز اختلال در

عملکرد سازه جلوگیری گردد.

۳- عمق مدفون بودن تونل نقش کلیدی در بهبود رفتار ژئوتکنیکی دارند.

۴- با افزایش نسبت h/a (افزایش عمق قرارگیری تونل)، مقادیر نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی در هر دو حالت افزایش می‌یابد، اما این افزایش در حالت بدون TDA بسیار بیشتر از حالتی است که از TDA استفاده شده است.

خرده‌لاستیک با خواص مکانیکی ویژه مانند انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت جذب انرژی، می‌تواند اثرات بارگذاری استاتیکی بر تونل‌های مدفون را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. علاوه بر بهبود عملکرد سازه‌ای، استفاده از TDA از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز راهکاری مناسب برای بازیافت ضایعات لاستیکی و افزایش دوام سازه‌ها در برابر بارهای وارده محسوب می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در طراحی تونل‌های شهری، بین‌شهری و زیرساختی، استفاده از TDA به‌عنوان بخشی از سیستم پرکننده در اطراف تونل مدنظر قرار گیرد، به‌ویژه در شرایطی که خاک اطراف دارای سختی کم یا پتانسیل بالای انتقال تنش باشد.

۶- مراجع

- Aydilek, A. H., Madden, E. T., & Demirkan, M. M. (2006). Field evaluation of a leachate collection system constructed with scrap tires. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 990-1000.
- Edil, T. B., & Bosscher, P. J. (1992). Development of engineering criteria for shredded waste tires in highway applications. Wisconsin Department of Transportation, Division of Highways, Bureau of Highway Engineering, CO Materials, Applied Research and Wisconsin Department of Natural Resources, Waste Tire Management or Recovery Grant Program, Bureau of Solid and Hazardous Waste Management.
- Hennebert, P., Lambert, S., Fouillen, F., & Charrasse, B. (2014). Assessing the environmental impact of shredded tires as embankment fill material. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(5), 469-478.
- Humphrey, D. N., & Katz, L. E. (2001). Field study of water quality effects of tire shreds placed below the water table. In *Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications* University of New Hampshire, Durham.
- Liu, B., Zhang, D., Li, X., & Li, J. (2022). Seismic response of underground structure-soil-aboveground structure coupling system: Current status and future prospects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 122, 104372.
- Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2020). Innovative application of tire-derived aggregate around corrugated steel plate culverts. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 11(3), 04020025.

- Meguid, M. A., & Youssef, T. A. (2018). *Experimental investigation of the earth pressure distribution on buried pipes backfilled with tire-derived aggregate*. *Transportation Geotechnics*, 14, 117-125.
- Ni, P., Qin, X., & Yi, Y. (2018). *Numerical study of earth pressures on rigid pipes with tire-derived aggregate inclusions*. *Geosynthetics International*, 25(5), 494-506.
- Rodríguez, L. M., Arroyo, M., & Cano, M. M. (2018). *Use of tire-derived aggregate in tunnel cut-and-cover*. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(7), 968-978.
- Shadabi, S., Rabeti Moghadam, M., Parvizi, M., & Zamani Lenjani, M. (2020). *Numerical Investigation of Geofoam Effect on the Internal Forces of Cut and Cover Tunnels during Earthquakes*. *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 7(2), 67-78.
- Spangler, M. G., and R. L. Handy. (1973). *Soil engineering*. New York: Intext Educational.
- Sun, Q., Xue, Y., & Hou, M. (2024). *Geotechnical seismic isolation system to protect cut-and-cover utility tunnels using tire-derived aggregates*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108354.
- Tian XM. (2021). *Seismic safety evaluation report for Rong Dong area of Xiong'an New area*. Beijing: China Earthquake Disaster Prevention Center.
- Xiao, M., Bowen, J., Graham, M., & Larralde, J. (2012). *Comparison of seismic responses of geosynthetically reinforced walls with tire-derived aggregates and granular backfills*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(11), 1368-1377.

Numerical investigation of tire-derived aggregate (TDA) backfill effect on reducing internal forces in cut-and-cover tunnels at different burial depths under static loading conditions

Amir Hossein Eghlidos¹, Masoud Rabeti Moghadam^{2*}, Hadi Sayadpour³, and Omolbanin Pirsabzi⁴

1- MSc Student; Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran. eghlidos.ah80@gmail.com

2-*Assistant Professor; Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, rabeti@yu.ac.ir

3- Assistant Professor; Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, hadi@yu.ac.ir

4- MSc Student; Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran, pirsabzibanin@gmail.com

Received: 21 Oct 2025; Accepted: 27 Jul 2026
DOI: 10.22044/tuse.2026.16992.1506

Keywords

Cut-and-cover tunnel
Tire-derived aggregate (TDA)
Numerical analysis
Backfill material
Tunnel burial depth

Extended Abstract

Summary

This study numerically investigates the performance of tire-derived aggregate (TDA) as a backfill material for reducing the internal forces in cut-and-cover tunnels under static loading conditions at different burial depths.

Introduction

The design of underground structures, particularly tunnels, requires accurate evaluation of the internal forces induced by static overburden pressures acting on the tunnel lining. The use of lightweight and flexible materials such as TDA, produced from waste tires, has been considered as an innovative and effective approach for reducing structural stresses. Due to its low unit weight, low stiffness modulus, and stress absorption capacity, TDA can significantly improve the mechanical behavior of tunnels.

Methodology and Approaches

The performance of TDA in reducing internal forces under static loading conditions was investigated numerically. The numerical model was validated using a previously studied cut-and-cover tunnel in China. The tunnel was analyzed at three dimensionless burial depth ratios of $h/a = 1.5, 2.5$, and 3.5 .

Results and Conclusions

The results indicated that increasing the burial depth led to higher shear forces and bending moments in the tunnel lining. However, the rate of increase was considerably lower when TDA was used as the surrounding backfill material. On average, the presence of TDA reduced the shear forces in tunnel components by 20–57% and the bending moments by 15–35%, with the greatest reductions observed in the tunnel sidewalls. Furthermore, the maximum vertical displacement increased in the presence of TDA, reflecting the reduced effective stiffness of the surrounding soil. Overall, the use of TDA promoted a softer soil response, resulting in stress redistribution and a significant reduction in the internal forces acting on the tunnel lining, although it was accompanied by an increase in the overall deformation of the surrounding ground.