

تأثیر نوع لایه‌بندی خاک بر انتشار امواج حاصل از انفجار سطحی بر تونل‌های مدفون (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: ۱۴۰۱/۰۲/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶

شماره صفحات: ۳۱۱ تا ۳۳۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.11898.1452

واژگان کلیدی	چکیده
لایه‌بندی خاک انفجار میرایی سازه‌های مدفون خاک تونل مترو اصفهان	<p>درک رفتار خاک تحت بارگذاری انفجار برای مهندسان ژئوتکنیک، معدن و پدافند غیرعامل از اهمیت بسیاری برخوردار است. هنگامی که خاک تحت بارگذاری انفجاری قرار دارد و اندرکنش مواد منفجره-خاک-سازه مطرح می‌شود خاک از خود رفتار پیچیده‌ای نشان می‌دهد. در این مقاله به بررسی تأثیر نوع لایه‌بندی و جنس خاک در میرایی تنش‌های حاصل از انفجار، تأثیر تغییرات در فاصله مرکز انفجار تا تونل‌ها در سطح زمین و تغییرات وزن ماده منفجره بسته به نوع بمب در تمامی حالات بررسی شده است. به صورت موردی در این مقاله تونل مترو اصفهان در مسیر صفه-آزادی مدل‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. جنس خاک در مسیر خط مترو به تناوب لایه آبرفتی، ماسه‌سنگ و ترکیب لایه آبرفتی-ماسه‌سنگی است. مدل‌سازی و تحلیل این موضوع به‌وسیله نرم‌افزار المان محدود <i>FLAC</i> انجام گرفته است. مدل رفتاری مورد استفاده در این طرح، مدل رفتاری موهرکلمب است. برای بررسی تأثیر بار دینامیکی انفجار سطحی بر روی تونل متروی اصفهان، مقطعی مشخص از مسیر تونل تحت بار دینامیکی انفجار مدل‌سازی شده است. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، اصابت بمب‌های <i>GP</i> در کلاس‌های ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ هر کدام به نسبت وزن ماده انفجاری که در خود دارند می‌تواند صدمات جدی به سازه زیرزمینی وارد کند. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته لایه خاک از جنس ماسه‌سنگ خاصیت میرایی بیشتری نسبت به لایه آبرفتی دارد. تونل مدفون در خاک آبرفتی تنها تا بار انفجار سطحی حاصل از ۵۶ کیلوگرم <i>TNT</i> و تونل مدفون در ماسه‌سنگی بار انفجار ناشی از ۱۶۵ کیلوگرم <i>TNT</i> را تحمل می‌کند. با توجه به تحلیل و بررسی تأثیر فاصله انفجار تا سازه زیرزمینی با افزایش فاصله انفجار به اندازه قطر تونل (<i>D</i>) میزان جابجایی تاج تونل ۴۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. از سوی دیگر وجود تونل مجاور باعث به وجود آمدن نیروهای اندرکنشی حاصل از وزن سازه مدفون و انعکاس امواج انفجار به دلیل صلبیت جداره تونل در محیط باعث افزایش جابجایی‌های ناشی از انفجار می‌شود.</p>

۱- مقدمه

سازه‌های استراتژیک کمک می‌کند. از آنجایی که ساخت سازه‌های سطحی مقاوم در برابر انفجار غیراقتصادی است، از این‌رو طراحی سازه‌های زیرزمینی پایدار در برابر انفجار

تجزیه و تحلیل مقاومت سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجارهای سطحی به درک بهتر تأثیر بارهای دینامیکی بر

* هرمزگان؛ بندرعباس؛ کیلومتر ۹ جاده میناب؛ دانشگاه هرمزگان؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دپارتمان مهندسی عمران؛ شماره تماس: ۰۹۱۷۷۲۹۲۸۹۶

سازه زیرزمینی تحت بارگذاری ناشی از انفجار پرتابه نفوذکننده در زمین پرداختند. سازه‌ی زیرزمینی در این مطالعه سالنی به طول ۵۰ متر و خاک اطراف سازه لایه‌های آهکی- ماری بود. بعد از اعمال بار دینامیکی، موج انفجار از هر نقطه‌ای که عبور کند باعث تغییر حالت تعادلی در آن نقطه می‌شود. بار اعمال شده باعث ایجاد تغییر مکان‌هایی در سازه می‌شود. امواج هم به صورت فشاری و هم کششی ایجاد شده‌اند و امواج کششی باعث ترک‌های کششی در پوشش سازه شده است (Mohammadnejad, et al., 2010).

مبارکی و واقفی (۲۰۱۵) به مطالعه تأثیر بار انفجار سطحی بر تونل مدفون در اعماق مختلف پرداختند. مقدار ماده منفجره ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT و خاک از نوع شن و عمق‌های مورد تحقیق ۳/۵، ۷، ۱۰/۵ و ۱۴ متر است. در این پژوهش انواع مختلفی از مقطع تونل اعم از جعبه‌ای شکل، نعل اسبی، نیمه بیضی و دایره‌ای توسط نرم‌افزار اجزا محدود LS-DYNA تحلیل شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد بهترین مقطع تونل نیمه بیضی است (Mobaraki & Vaghefi, 2015).

رشیددل و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر بار انفجار سطحی بر انواع اتصالات مسطح و منحنی پوشش تونل و نحوه چینش قطعات پوشش بتنی تونل پرداخته‌اند. در این پژوهش، شبیه‌سازی دوبعدی مترو تهران انجام شده است. مقدار ۵۰۰ کیلوگرم TNT به عنوان تولید کننده تنش موج انفجار در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج حاصل شده پوشش بتنی با اتصالات منحنی کارآمد بوده و در خنثی‌سازی انفجار سطحی موفق است. حداکثر گشتاورهای خمشی و نیروهای محوری در اتصالات منحنی کمتر از اتصالات مسطح و پیوسته است (Rashiddeh, et al., 2020).

تای و همکاران (۲۰۲۱) تأثیر انفجار موشک بالستیک بر تونل‌های RC (Reinforced Concrete) را به‌وسیله شبیه‌سازی المان محدود بررسی کرده‌اند. برای شبیه‌سازی ضربه، چهار نوع مختلف تونل بتن مسلح پوشش داده‌شده با یک لایه خاک ۱۵ متری تحت اثر موشک SCUD (یکی از سری موشک‌های بالستیک تاکتیکی است که توسط اتحاد جماهیر شوروی در طول جنگ سرد ساخته شد) با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA مدل‌سازی شده‌است. طی بررسی‌های

معقول‌تر و مقرون به‌صرفه‌تر است. طراحی سازه‌های زیرزمینی پایدار در برابر بارهای دینامیکی ناشی از انفجارهای سطحی به منظور محافظت از این سازه‌ها و افراد در هنگام تهدیدات خارجی بسیار مهم است. به‌طورکلی سازه‌های مدفون شده در عمق خاک برای تحمل بارهای انفجاری طراحی نمی‌شوند، بنابراین باید رفتار دینامیکی این سازه‌ها و خاک اطراف آن‌ها در برابر بارهای انفجاری مورد مطالعه قرار گیرد (Rashiddeh, et al., 2020).

با گسترش و پیشرفت مهندسی ژئوتکنیک و دانش ساخت سازه‌های زیرزمینی، پژوهش در مورد بار انفجار و تأثیر آن بر سازه‌های زیرزمینی آغاز شد و با پیشرفت تکنولوژی و فراهم شدن امکان تجزیه و تحلیل عددی و همچنین شبیه‌سازی مدل‌های واقعی در نرم‌افزارهای متفاوت، امکان بررسی تونل‌ها تحت بار انفجار رونق بیشتری پیدا کرد (zandieh & saadolahi, 2021).

در حالت کلی انفجار به تولید سریع حرارت و گاز که باعث به وجود آمدن انرژی زیادی در اثر انبساط گاز می‌شود گفته می‌شود. در اثر انفجار امواجی حاصل می‌شود که با توجه به محیط فشار منتشر شده متفاوت است. فشار تولید شده حاصل از خاصیت انعکاس و انکسار در انتشار امواج است (Sadegh Azar, et al., 2010).

یانگ (۱۹۹۷) به کمک توانایی تجزیه و تحلیل نرم‌افزار آباکوس، پاسخ اثر انفجار در مدل خاک ویسکوالاستیک را مورد بررسی قرار داد. سپس واکنش سازه مدفون در برابر افزایش عمق سازه و اندازه آن را تحت اثر ماده منفجره سطحی بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که هر چه صلبیت سازه بیشتر باشد در مقایسه با سازه‌های انعطاف‌پذیرتر، فشار و جابجایی کمتری را در طول موج نیمه اول نشان می‌دهند (Yang, 1997).

بورگرس و وانتومی (۲۰۰۶) نیز برای مدل‌سازی موج انفجار ایجاد شده در خاک از نرم‌افزار AUTODYN استفاده کردند. نتایج مطالعاتی گویای این است که ابعاد و اندازه حفره ناشی از انفجار به عوامل خاصی مثل شکل انفجار، مشخصات خاک، جرم ماده منفجره، مشخصه‌های دینامیکی خاک، هوا و عمق انفجار بستگی دارد (Vantomme & Borgers, 2006).

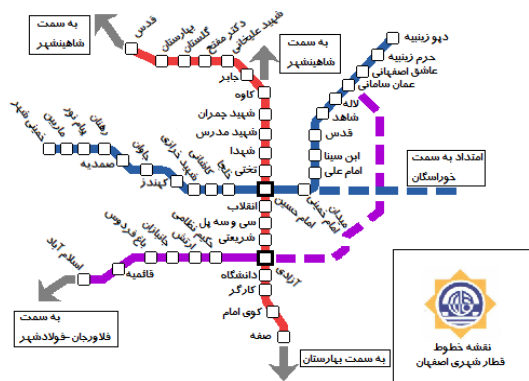
محمدنژاد و همکاران (۲۰۱۱) به تحلیل دینامیکی

شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معرفی تونل مترو اصفهان

متروی اصفهان شامل پنج خط است که در مرحله اول خط شمالی- جنوبی، از ترمینال مسافربری کاوه آغاز و در ترمینال مسافربری صفا پایان می‌یابد. مسافت این خط ۱۲/۵ کیلومتر است که تقریباً ۱۲ کیلومتر آن در زیرزمین است و در مجموع ۱۵ ایستگاه دارد. نقشه تونل مترو اصفهان در شکل ۱، نشان داده شده است (The urban & suburban trains, 2011). تونل مترو اصفهان شامل دو تونل رفت و برگشت به قطر ۶/۹ متر است که بسته به مسیر تونل‌ها در اعماق مختلف از ۹ متر تا ۱۵ متر قرار دارد و فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها ۱۴ متر است.



شکل ۱- نقشه تونل مترو اصفهان، مسیر صفا-آزادی (خط قرمز) (The urban & suburban trains, 2011)

۲-۲- مدل‌سازی هندسی

به منظور مدل‌سازی اثرات انفجار در نرم‌افزار از مدل دو بعدی استفاده می‌شود. به‌طور کلی انتشار امواج حاصل از انفجار در محیط خاکی به صورت کروی است که اثر متقابل بین انفجار و بار ضربه‌ای گاز انفجار، موجب به وجود آمدن کرنش‌هایی در اطراف می‌شود (Mohammadpur fard, 2014). در مدل‌سازی دو بعدی تمامی ناپیوستگی‌ها و شکستگی‌های اطراف محیط انفجار و همچنین ساختارهای زمین‌شناسی و هندسه محیط به‌طور کامل مدل‌سازی شده است.

با توجه به اینکه اهداف پژوهش بررسی اثرات

صورت گرفته در این پژوهش ضخامت دال تونل نقش بسزایی در مقاومت سازه در برابر ضربه موشک نشان داده است به این صورت که هر چه ضخامت افزوده شود مقاومت بهتری در مقابل انفجار مشاهده شده است (Thai, et al., 2021).

کسکین و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی اثرات انفجار سطحی بر تونل زیرزمینی با سطح مقطع دایره‌ای شکل با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS پرداختند. در این مقاله ابتدا مدل المان محدود در مقایسه با نتایج تجربی به‌دست‌آمده اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان داد که ابعاد چاله انفجار به‌دست‌آمده از نرم‌افزار با اندازه‌های چاله به‌دست‌آمده از آزمایش تجربی همخوانی دارد. علاوه بر این مقادیر تنش‌های حاصل از انفجار بر روی خاک و همچنین افزایش فشار هوا در طول دوره همان نتایجی را به دست می‌دهد که از آزمایش تجربی به‌دست‌آمده است (Keskin, et al., 2022).

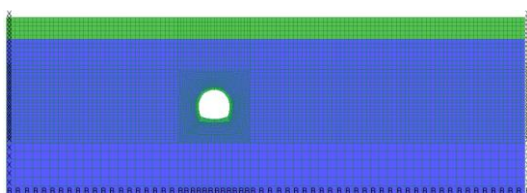
مومینوند و همکاران (۲۰۲۱) در دو مطالعه مجزا با توجه به اهمیت وجود ناپیوستگی‌ها و زوایای آن مطالعه‌ای بر روی ۲۰ گروه از نمونه‌های استوانه‌ای با زوایای جهت‌گیری ناپیوستگی مختلف (۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) انجام داده‌اند. بر اساس نتایج حاصله، سرعت موج P با افزایش زاویه جهت‌گیری (θ) و کاهش فرکانس ناپیوستگی (F) به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کرد. در حالت دوم به تمام نمونه‌های ۲۰ گروه دوغاب سیمان تزریق شد و پس از ۲ ماه مجدداً سرعت موج اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده سرعت موج در تمام نمونه‌ها افزایش یافته است و در اکثر نمونه‌ها سرعت موج به اندازه نمونه سنگ دست‌نخورده نزدیک شد (Moomivand, et al., 2021).

بررسی مسایل مربوط به تعامل بین سازه‌های مدفون در خاک در مواجهه با انفجار و درک رفتار خاک بسیار حائز اهمیت است. از سوی دیگر در مطالعات صورت گرفته مطالعه جامعی بر روی یکپارچگی و یا عدم یکپارچگی لایه‌های خاک و نحوه تأثیر این شرایط بر انتقال تنش‌های ناشی از انفجار با توجه به تغییرات جنس لایه‌ها نشده است. بر این اساس هدف مقاله حاضر بررسی تأثیر نوع جنس خاک و لایه‌بندی آن بر انتقال تنش‌ها به سازه مدفون است. در این مقاله تونل مترو اصفهان به صورت موردی بررسی

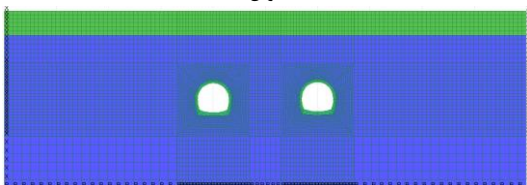
شبیه‌سازی به نحوی انجام شده که تمامی خصوصیات در آن لحاظ شود. در ابتدای مدل‌سازی، به منظور اعمال تحلیل استاتیکی نیاز به استفاده از مرزهای ثابت یا الاستیک است تا نتایج مناسب‌تری بدست آید. در شکل ۲، طرح کلی مدل بعد از حفر تونل‌ها و تعریف لایه‌های خاک، نحوه‌مش‌بندی و شرایط مرزی مدل بعد از اعمال بار استاتیکی ارائه شده است.

استفاده از مرزها با شرایط مشابه استاتیکی در تحلیل دینامیکی از دقت نتایج می‌کاهد. در زمان اعمال بار دینامیکی، سرعت و شتاب موج انفجار زمانی که به دورترین گره‌ها نزدیک می‌شود به صفر میل می‌کند، به عبارتی موج میرا می‌شود. بنابراین نیازی به تعریف مرزهای جاذب انرژی و میراگر در کناره‌های مدل نیست. این شرایط مرزی فقط بستگی به نوع بارگذاری و ابعاد آن دارد.

از مهم‌ترین پارامترهایی که باید در مدل‌سازی تعریف شود، مدل رفتاری خاک است. در این مقاله روند مدل‌سازی بر اساس تعریف فشار بر چاله انفجار انجام می‌شود، ابعاد چاله انفجار بر اساس آئین‌نامه ارتش آمریکا (UFC 3-340-02) به دست آمده است. از نظر مدل‌سازی عددی، مدل رفتاری باید گسیختگی اطراف چاله انفجار را تحت فشار انفجار زیاد در زمان بسیار کوچکی مدل کند. بر این اساس با توجه به مشخصات مصالحی که در دسترس است، مدل رفتاری موهر-کولمب انتخاب شده است.



الف) تونل تک



ب) تونل دوقلو و نحوه‌مش‌بندی و شرایط مرزی مدل بعد از اعمال بار استاتیکی

شکل ۲- شمای کلی مدل‌ها در دو حالت

در اولین مرحله تحلیل، مدل از لحاظ استاتیکی به

پارامتریک ناشی از امواج انفجارهای سطحی و زیرسطحی بر روی تونل مدفون در خاک است، مدل‌سازی محیط و تونل را به‌وسیله *FLAC 2D* و شبیه‌سازی انفجار را به‌وسیله نرم‌افزار *AUTODYN* انجام شده است. برای بررسی اثر انفجار روی تونل متروی اصفهان سه مرحله به شرح ذیل انجام شده است:

۱- مدل‌سازی محیط پیرامونی و تونل مترو به صورت استاتیکی تا قبل از اعمال فشار انفجار، که مدل به تعادل استاتیکی رسانده شود.

۲- اعمال بار دینامیکی بعد از اصلاح شرایط مرزی و همچنین اعمال سایر پارامترهای مورد نیاز تا بتوان تحلیل دینامیکی محیط خاک اطراف را در اثر انفجار بررسی کرد.

۳- تغییر شرایط مدل به منظور انجام مطالعات پارامتریک و تحلیل حساسیت.

۲-۲-۱- ساخت مدل در نرم‌افزار *FLAC 2D*

در ابتدا به مدل‌سازی شمای کلی محیط پروژه پرداخته شده است. در حالت کلی هندسه مدل از دو قسمت خاک و تونل تشکیل شده است. از آنجا که هدف این است که محیط نامحدود خاک به‌صورت محدود مدل شود، ابعاد مدل خاک طوری انتخاب شده که در عین محدودیت و کوچک بودن، کمترین تأثیر را بر نتایج داشته باشد. در واقع سعی شده است با مدل کوچک و زمان تحلیل کمتر، نتایج دقیقی حاصل شود. روابط (۱) و (۲) به ترتیب برای به دست آوردن طول مدل و ارتفاع مدل ارائه شده است:

$$Width: \geq 10D \quad (1)$$

$$Height: \leq H+4D \quad (2)$$

در روابط فوق:

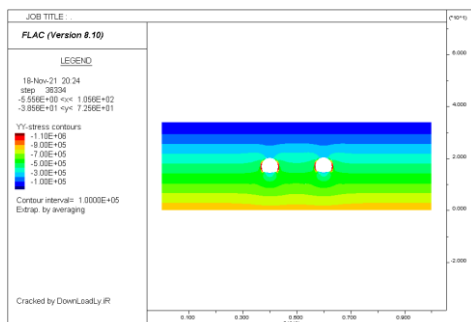
D : قطر تونل

H : فاصله مرکز تونل تا سطح زمین

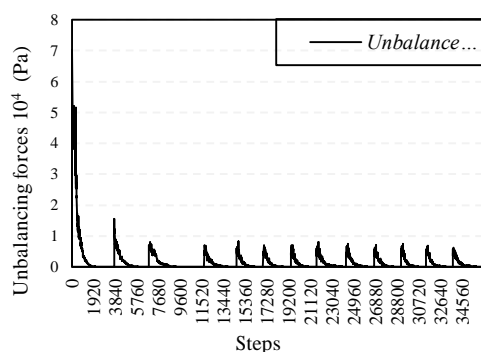
با استفاده از سعی و خطا ارتفاع مؤثر مدل ۳۴ متر و طول مدل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به ساختار اصلی تونل مترو اصفهان طراحی تونل‌ها با کمک نرم‌افزار *AUTOCAD* به صورت دو قوسی طراحی شده و با کمک ابزار *IMAGE* به نرم‌افزار *FLAC 2D* انتقال داده شد تا طراحی دقیق‌تری انجام گیرد.

با توجه به اینکه خاک محیطی نیمه بی‌نهایت است،

در حالت کلی پیش از اعمال هر بار دینامیکی مدل از لحاظ استاتیکی به تعادل رسیده، به این منظور مدل در ابتدا تحت شرایط مرزی اولیه و بار ثقلی تحلیل شده است. همان‌طور که در شکل ۶، مشاهده می‌شود، در این مرحله تمامی نیروهای نامتعادل کننده به‌طور کامل به صفر میل می‌کند.

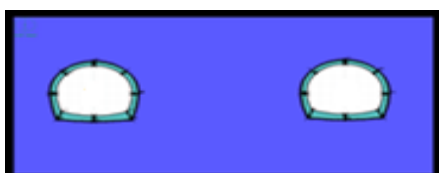


شکل ۵- تنش‌های قائم در مدل بعد از حفر تونل‌ها



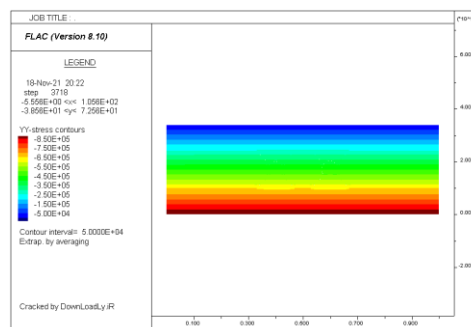
شکل ۶- روند به تعادل رسیدن مدل بعد از حفر تونل‌ها

در مرحله بعد قبل از تحلیل دینامیکی مدل، اندرکنش بین سازه و خاک تعریف شده است. به منظور تعریف اندرکنش سازه و خاک، ساخت مدل به صورت کامل، اعم از خاک و تونل بر طبق روابط اندرکنش بین سازه موردنظر و خاک اطراف محاسبه و به نرم‌افزار اعمال شده است (شکل ۷).

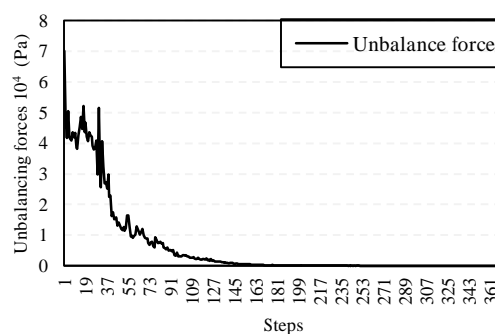


شکل ۷- نقاط تعریف اندرکنش بین درزه‌های طولی پوشش تونل، خاک و سازه

تعادل رسیده است. به این صورت که در ابتدای روند مدل‌سازی به ایجاد تنش‌ها و جابجایی‌های استاتیکی پرداخته شد. در این قسمت به‌وسیله اعمال نیروی گرانشی در خاک تنش‌های درجا اعمال شد (شکل ۳). بعد از به تعادل رسیدن مدل در حالت استاتیکی تمامی نیروهای نامتعادل کننده به صفر میل می‌کنند (شکل ۴). در مرحله بعد سازه زیرزمینی در مدل طراحی شد. در این بخش از مدل قسمت قبل استفاده می‌شود. به این صورت که قسمت داخل تونل حذف و المان‌های پوششی برای آن تعریف می‌شود و مشخصه‌های هر قسمت به آن اعمال و در نهایت مدل تحلیل می‌شود. در این بخش از تحلیل، بار خاک اطراف به پوشش تونل وارد می‌شود و تنش‌ها و جابجایی‌ها محاسبه شده است.



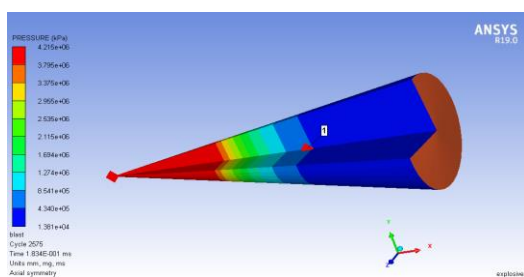
شکل ۳- تنش‌های قائم در زمان تحلیل استاتیکی



شکل ۴- نحوه به تعادل رسیدن نیروهای نامتعادل کننده

در شکل ۵، تغییرات تنش‌های قائم پس از ایجاد تونل مترو در مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، هر چه فاصله از محل قرارگیری تونل‌ها بیشتر می‌شود، تنش‌های ایجاد شده بر اثر حفر تونل‌ها کمتر و مقدار تنش‌ها به تنش‌های درجا نزدیک‌تر می‌شود.

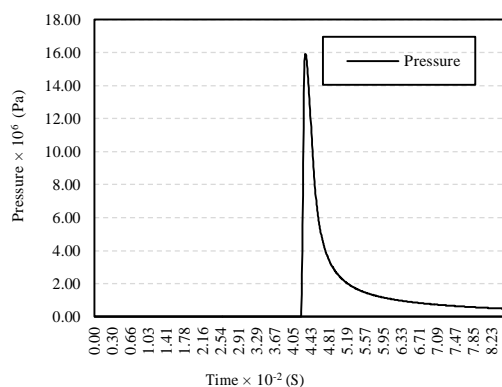
نیز برابر $e^{3/68}$ است (Rashiddeh, et al., 2020). در مرحله بعد به تحلیل مدل پرداخته شده است. به مدل تا رسیدن جبهه موج به تونل فشارسنج تعبیه شده و در مسیر انفجار اجازه تحلیل داده شد. در شکل ۸، شمای کلی مدل سازی شده از محیط انفجار و همچنین نحوه اتساع فشار جبهه موج ایجاد شده توسط ماده منفجره نشان داده شده است.



شکل ۸- شمای کلی محیط انفجار و نحوه اتساع فشار جبهه موج حاصل از انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT

فشارسنج تعبیه شده در مسیر انتشار موج انفجار به فاصله شعاع تأثیر برای اندازه گیری فشار حاصل از انفجار قرار داده شده است (شکل ۸). در این قسمت پس از اینکه فشار انفجار اعمال شد، اجازه داده شد تا موج حاصل از انفجار به سنجنده برسد و سپس تحلیل را متوقف کرده چون حداکثر فشار در همین فاصله رخ می دهد. به صورت موردی برای ۵۰۲ کیلوگرم TNT کمتر از ۴۲ میلی ثانیه زمان لازم بود که موج انفجار به سنجنده تعبیه شده برسد.

در انتها نرم افزار نتایج حاصل از انفجار به صورت نموداری (شکل ۹) به عنوان خروجی به نرم افزار *FLAC 2D* اعمال شده است.



شکل ۹- تاریخچه انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT

۲-۲-۲- تعیین پارامترهای انفجار و ساخت مدل در نرم افزار AUTODYN

با توجه به اینکه که نرم افزار *FLAC 2D* قادر به شبیه سازی انفجار نیست، شبیه سازی انفجار در نرم افزار *AUTODYN* انجام شده است. با استفاده از نرم افزار *AUTODYN* انفجار مدل سازی شده و تاریخچه انفجار پس از استخراج به صورت کدهایی به نرم افزار *FLAC 2D* اعمال شده است.

در نرم افزار دو شعاع تعریف شده است، اولی تحت عنوان کمترین شعاع است که به منظور ایجاد فاصله ای بین مرکز گوه تا نقطه انتهای گوه که در زمان دوران به حجم کره ای در مرکز انفجار بتواند ایجاد کند که عموماً مقدار ۱ میلی متر برای آن تعریف شد و شعاع بیشینه که بستگی دارد چه ابعادی از هوا هدف مدل سازی باشد. که برای این منظور ابتدا شعاع تأثیر ماده منفجره از رابطه (۳) محاسبه شده است.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

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

m = جرم ماده منفجره بر حسب kg

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

در واقع برای ۵۰۲ کیلوگرم TNT، شعاع تأثیر ماده منفجره برابر ۴۲۰ میلی متر و شعاع بیشینه ۱۰۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. در گام بعدی به تعریف مش بندی مدل پرداخته شده که بسته به شعاع بیشینه تعداد مش ها اعمال می شود. برای شعاع بیشینه ۱۰۰۰ میلی متر، تعداد ۵۰۰ مش در راستای R برای مدل در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، شعاع تأثیر محاسبه شده با استفاده از رابطه (۳) برای مقادیر مختلف ماده منفجره ارائه شده است.

جدول ۱- شعاع تأثیر انفجار برای مقادیر مختلف ماده

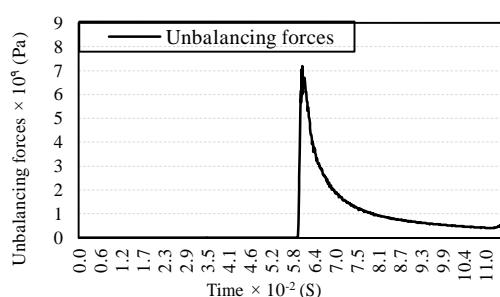
منفجره (kg)							
وزن ماده منفجره (kg)		۲۵	۵۶	۱۲۰	۱۶۵	۲۴۹	۵۰۲
شعاع تأثیر (mm)		۱۵۵	۲۰۵	۲۶۰	۳۰۰	۳۳۵	۴۲۰

قدم بعدی در ادامه مدل سازی در نرم افزار *AUTODYN* ابعاد محاسبه شده برای کره مواد منفجره برای مدل تعریف شده است (۴۲۰ میلی متر). چگالی ماده منفجره TNT (ρ) که مقدار آن برابر $1630 \frac{kg}{m^3}$ و انرژی داخلی TNT

حاصل شده حدود ۸ گیگاپاسکال فشار ایجاد شده است، از سوی دیگر بر اساس میرایی اعمال شده به سیستم، تمام نیروهای نامتعادل‌کننده سیستم بعد از ۰/۱۱۵ ثانیه از انفجار به‌طور کامل مستهلک شده است.

جدول ۲- قطر گودال انفجار برای مقادیر مختلف ماده منفجره (kg)

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



شکل ۱۰- روند میرایی نیروهای حاصل از انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT

۲-۳- مشخصات ژئوتکنیکی مصالح در مسیر

صفه-آزادی

لایه‌های خاک در مسیر صفه-آزادی شامل قطعه سنگ‌هایی با جنس‌های متفاوت است. جنس غالب سنگ‌های مسیر از نوع تناوب شیل و ماسه‌سنگ (*Sandstone*) است. با این وجود در قسمتی از مسیر خاک آبرفتی مشاهده شده است. همچنین در نواحی خاصی وجود لایه آبرفتی (*Alluvium*) به ضخامت تقریباً ۴ متر بر روی ماسه‌سنگ نیز مشاهده شده است (Amiri, et al., 2019). سطح آب زیرزمینی در اکثر مناطق در فاصله ۴ متری از سطح زمین است. مدل رفتاری استفاده شده برای خاک منطقه مدل رفتاری موهرکولمب است. برای تعیین مشخصات مکانیکی خاک در مسیر تونل در چندین نقطه گمانه حفاری شده است 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).

در آخرین مرحله مدل مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته 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 را برای جلوگیری از انعکاس امواج، از مرزهای جاذب انرژی ویسکوز استفاده می‌شود تا رفتار محیط در مدل‌سازی تا حد امکان به شرایط طبیعی پروژه نزدیک شود. در این مرحله تمامی جابجایی‌ها و سرعت‌هایی که ناشی از بار استاتیکی بود صفر در نظر گرفته شد.

بر اساس *MANUAL FLAC 2D* بهترین نوع میرایی برای انفجار و بارهای دینامیکی، میرایی مصنوعی است. در واقع اساس تعریف میرایی مصنوعی توسط فون‌نویمان (*Von Neumann*) و ریچتمایر (*Richtmyer*) به منظور شبیه‌سازی عددی مسائل دینامیکی تحت امواج قوی (انفجار) انجام شد. a_1 و a_n دو پارامتر ثابتی هستند که در این میرایی باید به نرم‌افزار اعمال شوند، که مقدارشان برای نیروی انفجار در برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

به دلیل انفجار حفره‌ای ایجاد می‌شود که به آن گودال انفجار گفته می‌شود. مهم‌ترین متغیرهایی که در شکل‌گیری گودال انفجار نقش دارند، وزن ماده منفجره، جنس خاک و عمق انفجار است. در کل فاصله انفجار از سطح و وزن ماده انفجاری به عنوان مهم‌ترین پارامترها برای پیش‌بینی عمق و شکل چاله می‌باشند. در مورد انفجارهای سطحی که در این پروژه مورد بررسی قرار گرفته است، اطلاعات بسیار کمی در دسترس است. گراهام (*Graham*) و کینی (*Kinney*) در سال ۱۹۸۵ رابطه‌ی تجربی (۴) را برای بدست آوردن قطر چاله انفجار ارائه داده‌اند.

بر اساس رابطه (۴) قطر گودال ناشی از انفجار محاسبه شد و خاک‌برداری گودال در مدل‌سازی منظور شده است [FLAC 2D User Manual].

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

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.

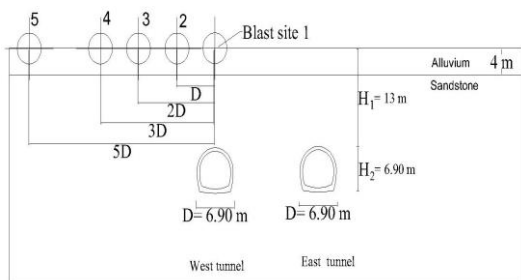
در شکل ۱۰، نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی ناشی از انفجار ۵۰۲ کیلوگرم *TNT* ارائه شده است. بر اساس نتایج

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

در گام نخست انفجار در حالت تونل تک در سه حالت لایه خاک موجود در مسیر پروژه مورد بررسی قرار گرفته شده است. حالت اول میزان جابجایی پوشش بتنی تاج و کف تونل تحت تأثیر بار انفجار در حالت خاک آبرفتی بررسی شد، حالت دوم به بررسی جابجایی پوشش بتنی تاج و کف تونل در لایه ماسه سنگی پرداخته شد و در حالت سوم مقدار جابجاییها در حالت خاک دو لایه (آبرفتی و ماسه سنگی) بررسی شد. در این حالت توانایی استهلاک انواع خاک موجود در محل پروژه تحت بارهای انفجاری بررسی شده است.

در گام بعد بارهای انفجاری مختلف با وزنهای ۲۵، ۵۶، ۱۲۰، ۱۶۵، ۲۴۹ و ۵۰۲ کیلوگرمی TNT در حالت تونل دوقلو، درست در بالای تونل غربی، به سطح خاک وارد شده است و مقادیر جابجایی بررسی شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- شمای کلی مدل و موقعیت قرارگیری ماده انفجاری

به منظور بررسی تأثیر فواصل مختلف انفجار سطحی بر تونلها، نقاط انفجار درست بالای تونل غربی و فواصل D ، $2D$ ، $3D$ و $5D$ در سطح زمین نسبت به مرکز تونل غربی در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱).

زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) خاک بر اساس استاندارد $ASTM, D3080$ و دانسیته (γ) بر اساس استاندارد $ASTM, D854$ تعیین شده است ($ASTM D854$)، برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی 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	γ (kN/m^3)	ν	E (Pa)	C (Pa)	ϕ
آبرفتی	۱۷	۰/۴	5×10^8	6×10^4	۲۵
ماسه سنگ	۲۷	۰/۳۲	$2/7 \times 10^9$	$1/77 \times 10^5$	۴۱

مدل سازی سازه های زیرزمینی نیز با در نظر گرفتن پوشش بتنی که به صورت ۸ تکه ($Segmental$) اجرا شده است (شکل ۷). 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}

مدول بالک (K) و مدول برشی (G) با استفاده از پارامترهای مدول الاستیسیته (E) و ضریب پواسون (ν) و با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شده اند ($Landau \& Lifshitz, 1970$).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (6)$$

در مطالعه حاضر سعی شد شرایط مختلف خاک و جانمایی انفجار و اثر آن بر تونلها بررسی شود. در جدول ۵، نوع بمب نفوذگر و وزن معادل TNT آن ارائه شده است.



شکل ۱۲- نواحی پلاستیک شده در لحظه انفجار ۲۵ کیلوگرم TNT در سطح خاک

۳-۱- بررسی تأثیر بار انفجار در حالت تونل تک، در سه حالت لایه‌بندی از جنس یکنواخت آبرفتی، ماسه‌سنگی و لایه‌بندی دو لایه آبرفتی و ماسه‌سنگی

در این مرحله تونل تک تحت شرایط پروژه مدل‌سازی شده است. با توجه به جنس خاک در مسیر پروژه در سه حالت به بررسی توانایی میرایی نیروی حاصل از انفجار انواع خاک موجود در محل پروژه پرداخته شد. مقادیر مختلف ماده منفجره درست در بالای محل قرارگیری تونل اعمال شده است.

حالت اول به بررسی میزان جابجایی پوشش بتنی تاج و کف تونل تحت تأثیر بار انفجار در حالت خاک آبرفتی پرداخته شد، در حالت دوم جابجایی پوشش بتنی تاج و کف تونل در زمین ماسه‌سنگی بدست آورده شد و در حالت سوم مقدار جابجایی‌ها در حالت خاک دو لایه (آبرفتی (۴ متر) و ماسه‌سنگی (۹ متر) بررسی شد. در جدول ۶، نتایج حاصل از اعمال بار انفجار، شامل مقادیر جابجایی تاج تونل، جابجایی کف تونل و مدت زمان لازم برای رسیدن موج انفجار به تونل، ارائه شده است.

بر اثر وقوع انفجار موجی تولید می‌شود که موجب ایجاد یک جبهه پر فشار از نقطه انفجار به سمت اطراف می‌شود. این فشار با زیاد شدن فاصله از مرکز انفجار مستهلک می‌شود. در واقع ضربه‌ای که خیلی سریع پس از انفجار تولید می‌شود با سرعت بسیار زیادی در محیط گسترش می‌یابد و فشار محیط را به حداکثر فشار انفجار می‌رساند و در کسری از ثانیه تا فشار محیط کاهش می‌یابد، به این مرحله اصطلاحاً فاز مثبت گفته می‌شود. همان‌طور که در جدول ۶، دیده می‌شود، در قسمت تاج تونل فشار رو

۲-۴- 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 مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای متفاوتی برای محاسبه حد مجاز خسارت و جابجایی در تونل‌ها تحت بار دینامیکی توسط پژوهش‌گران مختلف ارائه شده است. در این مقاله به منظور به دست آوردن جابجایی مجاز از معیار ساکورایی استفاده شده است. ساکورایی برای این مهم کرنش بحرانی (رابطه (۷)) را پیشنهاد کرده است (Sakurai, 1997):

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (7)$$

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 کرنش مجاز با استفاده از رابطه (۸) در سه رده سطح هشدار توسط ساکورایی معرفی شد.

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (8)$$

پس از محاسبه مقدار کرنش مجاز، حداکثر جابجایی مجاز در تونل‌ها با استفاده از رابطه (۹) حاصل شده است:

$$\varepsilon_c = \frac{u_c}{a} \quad (9)$$

u_c جابجایی مجاز و پارامتر a شعاع تونل است. در مقاله حاضر با 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 حداکثر میزان جابجایی مجاز پوشش بتنی ۳۹ میلی‌متر تعیین شد.

۳- بحث و بررسی نتایج

بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی انفجار نشان می‌دهد که عبور امواج انفجار از هر نقطه‌ای باعث می‌شود حالت تعادل آن نقطه دچار تغییر شود. تنش به وجود آمده حاصل از انفجار باعث به وجود آمدن ناحیه پلاستیک در خاک و همچنین سازه مدفون می‌شود. شکل ۱۲، تشکیل ناحیه پلاستیک در نقطه برخورد موج انفجار به سطح زمین را نشان می‌دهد.

واقع انفجار ۲۵ کیلوگرم TNT در ماسه سنگ ۶۶ میلی ثانیه زمان نیاز دارد که به تاج تونل برسد، در صورتی که این زمان در خاک آبرفتی ۶۹ میلی ثانیه است. در انفجارهای اعمال شده به مدل، نتایج مربوط به مدت زمان حرکت موج تا تاج تونل حدود ۶ تا ۱۴ درصد در ماسه سنگ نسبت به خاک آبرفتی سریع تر اتفاق می افتد. با بررسی جدول ۶، این نتیجه حاصل شد که هر چه ساختار یک خاک متراکم تر و وزن مخصوص بیشتری داشته باشد عبور موج از آن با سرعت بیشتری نسبت به خاک سست تر اتفاق می افتد (شکل ۱۳).

به پایین باعث جابجایی به سمت پایین شده است. در نتیجه ی انتشار موج اندکی پس از اینکه فاز مثبت طی می شود، گازهای حاصل از انفجار سرد شده و باعث می شود که فشار آن ها از فشار اتمسفر کمتر شود که این اتفاق باعث ایجاد مکش و به وجود آمدن تنش های کششی در محیط خاک می شود، به این مرحله فاز منفی گفته می شود.

در پی تحلیل نتایج حاصل از جابجایی تاج تونل و مدت زمان انتقال موج انفجار، مدت زمان رسیدن موج انفجار به تاج تونل در لایه ماسه سنگی سریع تر اتفاق می افتد. در

جدول ۶- نتایج تأثیرات نوع لایه بندی خاک و مقدار وزن ماده منفجره بر مقدار جابجایی تاج و کف تونل

وزن ماده منفجره (kg)	آبرفت			ماسه سنگ			دو لایه خاک (آبرفت - ماسه سنگ)		
	زمان رسیدن موج انفجار به تونل (s)	جابجایی تاج (mm)	جابجایی کف تونل (mm)	زمان رسیدن موج انفجار به تونل (s)	جابجایی تاج تونل (mm)	جابجایی کف تونل (mm)	زمان رسیدن موج انفجار به تونل (s)	جابجایی تاج (mm)	جابجایی کف تونل (mm)
۲۵	$6/9 \times 10^{-2}$	-۲۱/۴۲	۱۸/۳۶	$6/6 \times 10^{-2}$	-۹/۱	۸/۵۵۶	$6/63 \times 10^{-2}$	-۱۲/۸۴۴	۱۴/۱۳۳
۵۶	$5/72 \times 10^{-2}$	-۲۸/۸	۲۰/۷	$5/42 \times 10^{-2}$	-۱۳/۱۳۶	۱۰/۶۴	$5/49 \times 10^{-2}$	-۱۸/۷۱	۱۴/۳۴
۱۲۰	$5/26 \times 10^{-2}$	-۴۷/۵	۱۷	$4/94 \times 10^{-2}$	-۳۱/۸۳	۱۱/۱۴	$5/01 \times 10^{-2}$	-۳۳/۴۴۲	۱۵
۱۶۵	$4/75 \times 10^{-2}$	-۶۱/۸	۱۳/۱	$4/46 \times 10^{-2}$	-۲۶/۴	۱۳/۲۷	$4/52 \times 10^{-2}$	-۴۲/۲۴	۱۹/۲۳
۲۴۹	4×10^{-2}	-۹۰/۱۵	۱۴	$3/64 \times 10^{-2}$	-۴۹/۸۷	۱۴	$3/7 \times 10^{-2}$	-۶۴/۷	۱۷/۴۸
۵۰۲	$3/35 \times 10^{-2}$	-۱۲۰	-۱۲/۶۱	$3/03 \times 10^{-2}$	-۶۸/۱	۱۴/۳	$3/05 \times 10^{-2}$	-۱۰۶	۲۰/۰۱۲

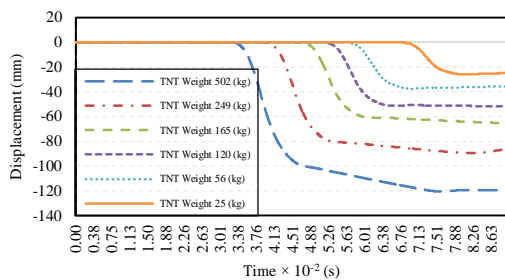
توجه است.

بر طبق محاسبات انجام شده مقدار مجاز جابجایی پوشش بتنی تونل ۳۹ میلی متر است، با توجه به نتایج حاصل از مدل سازی که در جدول (۶) ارائه شده، در حالت خاک آبرفتی پوشش تونل تنها تا بار انفجار ۵۶ کیلوگرمی TNT را می تواند تحمل کند زیرا در صورت تجربه بار ۱۲۰ کیلوگرمی TNT جابجایی تاج تونل به اندازه ۴۷/۵ میلی متر می شود که از مقدار جابجایی مجاز بیشتر است، که موجب تخریب در قسمت تاج تونل می شود. از سوی دیگر مشاهده می شود که پوشش بتنی تونل با مشخصات مفروض در حالتی که خاک از جنس ماسه سنگ باشد، می تواند فشار ناشی از انفجار تا ۱۶۵ کیلوگرم TNT را تحمل کند. در حالت سوم که خاک از دو لایه آبرفت و ماسه سنگ تشکیل شده است، سازه مدفون قادر به تحمل انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT است. در نتیجه خاک ماسه سنگی پاسخ مقاومتی

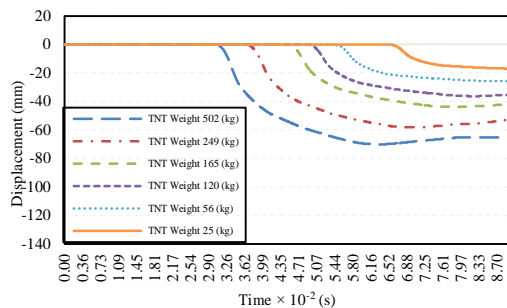
مقادیر جابجایی حاصل از بارهای انفجار نشان دهنده این است که جابجایی تاج و کف تونل در محیط ماسه سنگ تغییرات کمتری نسبت به محیط آبرفتی تجربه می کند. در انفجار ۲۵ کیلوگرم TNT تاج تونل در خاک ماسه سنگی حدود ۹ میلی متر به سمت پایین جابجا می شود، در صورتی که این مقدار برای تونل مدفون در خاک آبرفتی ۲۱/۴۲ میلی متر است. در حالتی که محیط خاکی شامل دو لایه آبرفتی (۴ متر) و ماسه سنگی (۹ متر) است، دو لایه بودن خاک باعث می شود که شرایط میرایی خاک متأثر از خواص میرایی هر دو لایه باشد. به صورت موردی در انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT در سه حالت خاک آبرفتی جابجایی پوشش بتنی تاج تونل ۱۲۰ میلی متر، ماسه سنگ برابر ۶۸/۱ میلی متر است و در حالت سوم که خاک از دو لایه تشکیل شده است، ۱۰۶ میلی متر جابجایی رخ داده است، که تأثیر میرایی هر دو لایه خاک توأمان بر امواج انفجار مورد

در خاک‌های با ماهیت مختلف، با یکدیگر متفاوت است، به این صورت که امواج قبل از اینکه به‌طور کامل در محیط مستهلک شوند، در ماسه‌سنگ نوسانات بیشتری نسبت به خاک آبرفتی تجربه می‌کنند.

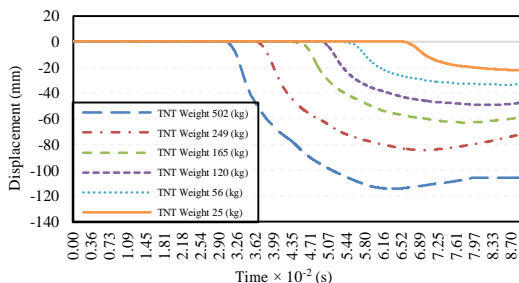
مدت زمان عبور امواج حاصل از انفجار در محیط انفجار به جنس خاک و همچنین شرایط لایه‌بندی خاک بستگی دارد. در شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نتایج اعمال بارهای انفجاری بر هر سه نوع محیط خاک و مقادیر جابجایی تاج تونل تحت تأثیر هر یک از بارهای انفجاری در واحد زمان ارائه شده است.



شکل ۱۴- مقایسه جابجایی تاج تونل و مدت زمان رسیدن موج به تاج در واحد زمان (خاک آبرفتی)



شکل ۱۵- مقایسه جابجایی تاج تونل و مدت زمان رسیدن موج به تاج در واحد زمان (ماسه‌سنگ)

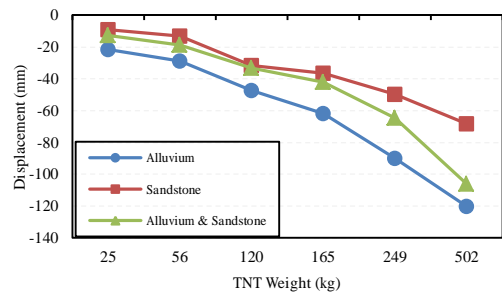


شکل ۱۶- مقایسه جابجایی تاج تونل و مدت زمان رسیدن موج به تاج در واحد زمان (دو لایه آبرفتی و ماسه‌سنگ)

بهتری در مواجهه با انفجار احتمالی می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصل از جابجایی تاج تونل و محدوده مجاز جابجایی پوشش بتنی تاج تونل هر چقدر خاک دارای وزن مخصوص بیشتر و مدول یانگ بیشتری باشد، در مواجهه با انفجار مقاوم‌تر و جابجایی کمتری را تجربه می‌کند.

بر اساس نتایج (جدول ۶) مقادیر جابجایی کف تونل، تغییرات جابجایی در هر سه حالت محیط خاکی مقادیری مثبت است. جابجایی مثبت کف تونل (رو به بالا) و ایجاد پدیده بالازدگی بیشتر در خاک‌های که از چسبندگی بالایی برخوردارند رخ می‌دهد. همچنین حضور آب زیرزمینی در محیط خاکی و فشار زیاد ناشی از مقادیر تنش حداکثری انفجار، که به ایجاد فشار آب منفذی منجر می‌شود، باعث بروز پدیده بالازدگی و تغییر شکل در کف تونل می‌شود. با توجه به جدول ۶، تنها انفجار در محیط خاک آبرفتی تحت بار ۵۰۲ کیلوگرمی TNT باعث شده است که جابجایی تونل تحت فشار به سمت پایین باشد؛ این اتفاق به دلیل تخریب کامل ساختار خاک و تونل مدفون رخ داده است، یعنی فشار انفجار از فشار مقاوم ایجاد شده در کف مدل بیشتر بوده است.



شکل ۱۳- تأثیر وزن ماده منفجره در جابجایی تاج تونل

بر اساس نتایج ارائه شده توانایی ماسه‌سنگ در استهلاک تنش‌های حاصل از انفجار را می‌توان مشاهده کرد. در حالت انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT تنش قائم حداکثری در خاک آبرفتی در مدت زمان ۵۰/۲ میلی‌ثانیه به تاج تونل می‌رسد و پس از گذراندن ۵/۵ میلی‌ثانیه به ۵۰۲ مگاپاسکال می‌رسد و در طرف دیگر تنش قائم حداکثری در ماسه‌سنگ، پس از تنها ۴۸ میلی‌ثانیه به تاج تونل می‌رسد و ۲/۸ میلی‌ثانیه زمان به حداکثر تنش فشاری (۳۸۸ مگاپاسکال) می‌رسد.

قابل توجه است که تعداد نوسان امواج حاصل از انفجار

مقایسه با خاک آبرفتی بسیار کمتر است. البته این نکته نیز باید در نظر گرفته شود که با وجود توانایی بیشتر خاک متراکم تر در انتقال موج حاصل از انفجار، جابجایی های کمتری نسبت به خاک سست تر در آن اتفاق می افتد.

۳-۲- بررسی تأثیر تغییرات فاصله مرکز انفجار تا مرکز تونل در سطح زمین

به منظور بررسی تأثیر موقعیت اعمال بار انفجاری بر رفتار تونل مدفون، بار انفجاری در سطح زمین و فواصل ۰، D ، $2D$ ، $3D$ و $5D$ (قطر تونل) نسبت به محور تونل غربی در نظر گرفته شده است.

در واقع محل وقوع انفجار به دلیل زاویه برخورد امواج به هدف حائز اهمیت است و از طرف دیگر مسافت طی شده موج باعث استهلاک بخشی از انرژی و یا تمام انرژی حاصل از انفجار می شود. در این مرحله به صورت موردی با شبیه سازی انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT، مقادیر جابجایی، تنش قائم حداکثری ایجاد شده در تاج تونل و زمان رسیدن موج انفجار به تاج تونل در جدول ۷، ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج جابجایی، تنش قائم حداکثری و مدت زمان رسیدن موج به تاج تونل با توجه به تغییرات فاصله افقی

نسبت به محور تونل غربی

فاصله تا تونل غربی	بالای محور تونل	D	$2D$	$3D$	$5D$
جابجایی تاج تونل (mm)	-۵۱/۳	-۲۹/۱	-۵۱/۸۴	-۰/۲	-۰/۱۸
حداکثر تنش قائم (Pa)	$-۵/۹ \times 10^4$	$-۴/۶۵ \times 10^4$	-۲×10^4	$-۱/۱ \times 10^4$	$۳/۹۴ \times 10^7$
زمان رسیدن موج انفجار به تونل است (s)	$۴/۷۳ \times 10^{-۱}$	$۴/۱۸ \times 10^{-۱}$	$۳/۹۵ \times 10^{-۱}$	$۵/۲ \times 10^{-۱}$	۶×10^{-۱}

بر اساس نتایج حاصل شده هر چقدر فاصله منبع انفجار از تونل مدفون (تونل غربی) بیشتر شود برای رسیدن موج انفجار به تاج تونل زمان بیشتری ثبت می شود. پس از انفجار سطحی ۱۲۰ کیلوگرم TNT در بالای تونل مدفون $۴۷/۳$ میلی ثانیه طول می کشد که موج انفجار به تاج تونل برسد. این مدت زمان برای انفجار سطحی در فاصله D ($۶/۹$ متری)، ۴۸ میلی ثانیه است و در فاصله $5D$ ، ۶۰ میلی ثانیه زمان لازم است تا به تاج تونل غربی برسد. با توجه به خاصیت میرایی هر کدام از خاک های موجود در منطقه، تنش ایجاد شده حاصل از انفجار هر چه مسافت بیشتری برای رسیدن به تاج تونل طی کند از شدت آن به طور

با توجه به نتایج ارائه شده، فشار مکش حاصل از مرحله فاز منفی انفجار و همچنین تأثیر بازتابی حاصل از برخورد موج انفجار به سطح جسم صلب (پوشش بتنی) در زمان های پایانی تأثیر امواج مشاهده می شود. با بررسی شکل ۱۵، مشاهده می شود که جابجایی حاصل از فاز منفی در خاک متراکم تر (ماسه سنگی) مشهودتر است، به طوری که بعد از گذشت $۶۴/۸$ میلی ثانیه از زمان انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT در ماسه سنگ، به مدت ۱۵ میلی ثانیه مکش رخ می دهد که باعث می شود تاج تونل به اندازه ۵ میلی متر به سمت بالا جابجا شود، از طرف دیگر با انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT در آبرفت تنها جابجایی در جهت پایین رخ می دهد و نیروی کششی قابل توجهی در خاک ایجاد نمی شود. این مهم به دلیل رفتار بهتر خاک ماسه سنگی در انتقال امواج رخ می دهد. با توجه به شکل ۱۶ و نظر به وجود دو لایه خاک هم از آبرفت و ماسه سنگ، جابجایی ها متأثر از هر دو نوع خاک رخ می دهد، با توجه به قابلیت انتقال موج در ماسه سنگ، مقاومت کمتر لایه آبرفتی در مقابل جابجایی (که متأثر از وزن مخصوص و مدول یانگ کمتر آبرفت است) و به خاطر وجود فشار آب منفذی، جابجایی به سمت بالا به مقدار بیشتری رخ می دهد. در انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT در خاک دو لایه (آبرفت و ماسه سنگ) مقدار جابجایی حاصل از مکش در مدت زمان فاز منفی حدود ۱۳ میلی ثانیه طول می کشد که در این مدت زمان ۹ میلی متر تاج تونل به سمت بالا جابجا می شود که در مقایسه با شرایط مشابه در ماسه سنگ مدت زمان وقوع فاز منفی بیشتر و جابجایی بیشتری رخ می دهد.

با توجه به مقادیر مختلف وزن ماده منفجره در هر سه حالت خاک، این نتیجه حاصل می شود که هر چقدر وزن ماده منفجره بیشتر باشد مدت زمان رسیدن به تاج تونل مدفون کمتر است. در خاک دو لایه متشکل از آبرفت و ماسه سنگ پس از انفجار ۵۰۲ کیلوگرم TNT، $۳۱/۴$ میلی ثانیه طول می کشد موج انفجار به تاج تونل برسد ولی مدت زمان مورد نیاز رسیدن موج حاصل از انفجار ۲۴۹ کیلوگرم TNT به تاج تونل مدفون، $۳۶/۵$ میلی ثانیه است. مدت زمان رسیدن موج انفجار به تاج تونل در خاک ماسه سنگ نسبت به خاک دو لایه (آبرفتی- ماسه سنگ) کمتر است و همچنین این مدت زمان در خاک دو لایه در

چشم‌گیری کاسته می‌شود.

۳-۳- بررسی جابجایی پوشش تونل در دو حالت

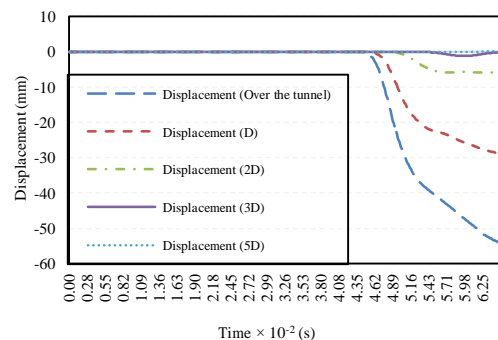
تونل تک و تونل دوقلو در شرایط پروژه

مدل‌سازی در این مقاله به دو صورت تونل تک و تونل دوقلو انجام شده است. در مرحله اول به مقایسه جابجایی تاج و کف تونل تک مدفون تحت تأثیر انفجارهای سطحی پرداخته شد. هدف از بخش دوم بررسی نقش کمی تونل دوقلو بر میزان جابجایی و توزیع تنش‌ها در حالت انفجار است. در حالت دوم، تونل‌ها به صورت دوقلو دقیقاً مشابه خط مترو اصفهان در نظر گرفته شده است و انفجار در بالای تونل غربی اعمال شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۸)، جابجایی پوشش تونل غربی به دلیل انفجار سطحی در حالت وجود تونل مجاور، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. به این صورت که جابجایی تاج تونل در اثر انفجار ۲۵ کیلوگرم TNT در حالت تونل تک به میزان ۱۲/۸۴ میلی‌متر به سمت پایین است و در حالت وجود تونل مجاور ۲۵/۵ میلی‌متر است که حدود ۹۸ درصد افزایش جابجایی را نشان می‌دهد. میزان جابجایی تاج تونل حاصل از انفجار ۵۶ کیلوگرم TNT، حالت تونل تک ۱۸/۷۱ میلی‌متر به سمت پایین و در حالت تونل دوقلو ۳۵ میلی‌متر جابجایی رخ می‌دهد که نشان دهنده افزایش ۸۸/۱۳ درصدی جابجایی است. به همین ترتیب درصد افزایش تغییرات جابجایی برای مقادیر مختلف ماده منفجره‌ی ۱۲۰، ۱۶۵، ۲۴۹ و ۵۰۲ کیلوگرمی TNT در حالت تونل تک و تونل دوقلو به ترتیب برابر با ۵۳/۴، ۵۱، ۳۵/۲ و ۰/۹ است. با توجه به اختلاف مقادیر جابجایی‌ها، این نتیجه حاصل می‌شود که هر چقدر وزن ماده منفجره بیشتر می‌شود، تأثیرپذیری مقادیر جابجایی از تونل حفرشده مجاور به حداقل می‌رسد. با توجه به حداکثر مقدار مجاز جابجایی پوشش بتنی تونل، در تونل دوقلو پوشش بتنی، تنش حاصل از بار انفجار بیشتر از ۵۶ کیلوگرم TNT را تحمل نمی‌کند و تخریب می‌شود؛ اما در حالت تونل تک، پوشش بتنی تنش‌های حاصل از انفجار مواد منفجره را تا وزن ۱۲۰ کیلوگرم TNT تحمل می‌کند.

شکل ۱۸، جابجایی تاج و کف تونل در دو حالت تونل تک و دوقلو تحت بارهای انفجاری اعمال شده در راستای تونل غربی در سطح زمین را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۷، مقدار جابجایی تاج تونل غربی را متأثر از فاصله مرکز در طی زمان مفروض نشان می‌دهد. با توجه به خواص مکانیکی پوشش بتنی به کار رفته در این پروژه، مقدار جابجایی مجاز تاج تونل ۳۹ میلی‌متر است. با توجه به این مقدار و شکل ۱۷، جابجایی تاج تونل غربی تحت تأثیر انفجار سطحی در بالای محور مرکزی تونل ۵۱/۳ میلی‌متر به سمت پایین و بیشتر از مقدار مجاز است، یعنی با توجه به فاصله انفجار تا تونل، خواص مقاومتی خاک توانسته است که تنش‌های حاصل از انفجار را ندارند و همین باعث تخریب در ناحیه تاج تونل می‌شود. در واقع با وجود تخریب پوشش بتنی تونل تحت بار انفجار سطحی بالای محور مرکزی تونل، هر چقدر فاصله افقی محل انفجار نسبت به محور مرکزی تونل بیشتر شود، مقدار جابجایی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، به طوری که در انفجار به فاصله D از محور مرکزی تونل مقدار جابجایی تاج تونل ۴۳ درصد کاهش پیدا می‌کند (کاهش ۲۲/۲ میلی‌متری). در حالت انفجار در فاصله $2D$ ، منجر به کاهش ۴۵/۴۶ میلی‌متری جابجایی تاج تونل نسبت به حالت اول می‌شود (۸۸ درصد از میزان جابجایی تاج تونل کاسته می‌شود). بررسی تأثیر انفجار در فاصله $3D$ و $5D$ از محور مرکزی تونل نشان می‌دهد که مقادیر جابجایی تقریباً صفر می‌شود.

به طور کلی با توجه به مقادیر جابجایی و فاصله محل انفجار از محور مرکزی تونل، اگر انفجار سطحی حاصل از ۱۲۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ای به اندازه قطر تونل و یا بیشتر از آن رخ بدهد، تخریبی در تونل اتفاق نمی‌افتد.



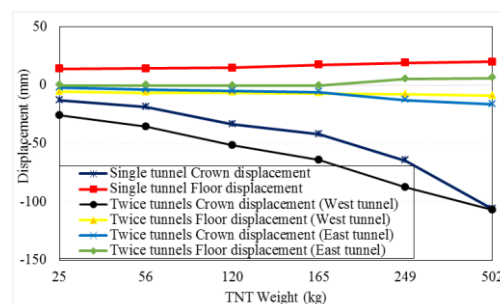
شکل ۱۷- مقدار جابجایی تاج تونل در طی زمان بر اساس تغییر فاصله افقی مرکز انفجار تا محور تونل غربی

۱۶/۵ میلی متر است. کف تونل شرقی متأثر از امواج حاصل از انفجار برای مقادیر ۲۵، ۵۶، ۱۲۰ و ۱۶۵ کیلوگرم TNT جابجایی‌های ناچیزی به سمت پایین رخ می‌دهد، اما در مورد انفجارهای حاصل از ۲۴۹ و ۵۰۲ کیلوگرم TNT مقادیر جابجایی‌ها مثبت است که به معنی بالازدگی کف تونل شرقی است.

جابجایی کف تونل غربی در حضور تونل مجاور به سمت پایین است، که این مهم در مقایسه با حالت تونل تک برعکس است که به خاطر نیروهای اندرکنشی بین دو سازه و تأثیر وزن سازه مجاور در جلوگیری از بالازدگی کف تونل غربی اتفاق می‌افتد. کف تونل شرقی تحت تأثیر انفجارهای ۲۵ تا ۱۶۵ کیلوگرمی TNT جابجایی‌هایی به سمت پایین تجربه می‌کند، به طوری که در انفجارهای ۲۴۹ و ۵۰۲ کیلوگرم TNT جابجایی‌ها رو به بالا است، که این اتفاق به دلیل زاویه قرارگیری تونل نسبت به مرکز انفجار و همچنین به وجود آمدن تنش‌های حداکثری و تحت تأثیر فشار آب منفذی ناشی از وجود آب زیرزمینی و چسبندگی خاک در آن ناحیه رخ می‌دهد. در مرحله بعد نتایج جابجایی تاج و کف تونل‌ها، حاصل از اعمال بارهای انفجار سطحی درست در فاصله حد واسط دو تونل مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۱). در جدول ۸، مقادیر جابجایی در تاج و کف تونل‌های غربی و شرقی ارائه شده است.

زاویه قرارگیری مرکز انفجار و فاصله آن تا محور مرکزی تونل مدفون در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. بعد از اعمال بارهای انفجار سطحی در حد واسط محل قرارگیری دو تونل (فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها ۲۰ متر است)، این نتیجه حاصل شد که مقدار جابجایی‌ها در دو تونل غربی و شرقی تا حد زیادی برابر است. مقدار تفاوت اندک هم به دلیل نحوه اتساع موج و توزیع نامتقارن تنش‌ها در محیط خاکی است. تحت تأثیر بارهای انفجار ۲۵ تا ۵۰۲ کیلوگرم TNT جابجایی‌های تاج تونل در محدوده ۶/۵ تا ۲۷/۴ میلی متری رخ می‌دهد، که با توجه به حداکثر مقدار مجاز جابجایی پوشش بتنی، موجب تخریب نمی‌شود. از سوی دیگر با توجه به مقادیر جابجایی در کف تونل‌ها نیز این نتیجه حاصل می‌شود که تخریبی در تونل‌ها اتفاق نمی‌افتد.

با توجه به اهمیت موقعیت مرکز انفجار نسبت به محور



شکل ۱۸- جابجایی تاج تونل‌ها در دو حالت تونل تک و دوقلو

در واقع این نتیجه حاصل می‌شود که حضور تونل مجاور باعث می‌شود جابجایی‌های مضاعفی در تونلی که تحت بار انفجار است رخ دهد که این تنش‌ها ناشی از دست‌خوردگی بیشتر خاک به خاطر حفر تونل مجاور است. حفر تونل باعث به هم خوردن ساختار متراکم و مقاوم خاک می‌شود. نکته دیگری که در این مسئله حائز اهمیت است سازه مدفون مجاور در واقع باعث ایجاد یک سطح بازتابی در محیط می‌شود که امواج حاصل از انفجار را بازتاب کرده و به اطراف ساطع می‌کند، که همین امر باعث می‌شود جابجایی‌های سازه مدفون تحت بار انفجار افزایش پیدا کند. این نتایج نشان‌گر این است که بین تونل‌های مجاور تأثیرات اندرکنشی وجود دارد.

بر اساس نتایج شکل ۱۸، مقادیر جابجایی در کف تونل تک، مقادیر مثبتی است به طوری که مقدار جابجایی حاصل از انفجار ۲۵ کیلوگرم TNT، ۱۴/۱۳ میلی متر است، در واقع جابجایی حاصل از بیشترین مقدار ماده منفجره اعمالی (۵۰۲ کیلوگرم TNT)، ۲۰/۰۲ میلی متر است. با توجه به مقادیر جابجایی‌های حاصل شده از انفجارها، هیچ کدام منجر به تخریب سازه مدفون نمی‌شود. از سوی دیگر در مواجهه با بارهای انفجاری مشابه در حالت تونل دوقلو، جابجایی‌ها اغلب به سمت پایین است. کف تونل غربی در حالت تونل دوقلو در مواجهه با بارهای انفجاری ۲۵ تا ۵۰۲ کیلوگرم TNT، از ۵/۵۶ میلی متر تا ۸/۹۷ میلی متر به سمت پایین جابجا می‌شود. تونل شرقی در مواجهه با انفجارهای رخ داده، به دلیل فاصله‌ای که محور مرکزی آن تا منبع انفجار دارد جابجایی‌های بسیار کمتری را تجربه می‌کند. در تاج تونل شرقی بر اثر امواج حاصل از انفجارهای ۲۵ تا ۵۰۲ کیلوگرم TNT، حداقل جابجایی ۲/۱ میلی متر و حداکثر جابجایی

بیشتر باشد تغییرات در جابجایی‌ها محسوس‌تر خواهد بود.
 ۲. در حالت تونل تک خاک آبرفتی پوشش تونل تنها تا بار انفجار ۵۶ کیلوگرمی TNT را تحمل می‌کند و در حالت لایه از جنس ماسه‌سنگ تا ۱۶۵ کیلوگرم TNT را تحمل کند. در حالتی که خاک از دو لایه آبرفت و ماسه‌سنگ تشکیل شده است، سازه مدفون قادر به تحمل انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT است.

۳. با افزایش فاصله انفجار از محور مرکزی تونل، مقدار جابجایی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، به نحوی که با افزایش فاصله انفجار به فاصله D از محور مرکزی تونل مقدار جابجایی تاج تونل ۴۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. در حالت انفجار در فاصله $2D$ ، جابجایی تاج تونل ۸۸ درصد کاهش یافته است.

۴. به‌طور کلی با توجه به مقادیر جابجایی و فاصله محل انفجار از محور مرکزی تونل، اگر انفجار سطحی حاصل از ۱۲۰ کیلوگرم TNT در فاصله‌ای به اندازه قطر تونل و یا بیشتر از آن رخ بدهد، تخریبی در تونل اتفاق نمی‌افتد.

۵. هرچقدر ذرات خاک متراکم‌تر، وزن مخصوص خاک بیشتر و مدول یانگ بالاتر باشد خاصیت استهلاک تنش‌ها بیشتر است.

۶. با مقایسه دو حالت تونل تک و تونل دوقلو این نتیجه حاصل شد که جابجایی‌های ناشی از انفجار در تونل تک نسبت به تونل دوقلو کمتر است به‌طوری‌که تونل تک تنش‌های حاصل از انفجار ۱۲۰ کیلوگرم TNT تونل دوقلو تنش حاصل از ۵۶ کیلوگرم TNT را تحمل کند.

۷. جابجایی تاج تونل در اثر انفجار ۲۵ کیلوگرم و ۵۶ کیلوگرم TNT در حالت تونل دوقلو نسبت به تونل تک به ترتیب حدود ۹۸ و ۸۸ درصد افزایش جابجایی را نشان می‌دهد.

۸. وجود تونل مجاور باعث به وجود آمدن نیروهای اندرکنشی حاصل از وزن سازه مدفون و همچنین انعکاس امواج انفجار به دلیل صلبیت جداره تونل در محیط می‌شود. حفر تونل مجاور موجب می‌شود تنش‌هایی مازاد در خاک اطراف به وجود آید. از این‌رو جابجایی‌های به وجود آمده حاصل از انفجار در تاج تونل در حالت تونل دوقلو نسبت به حالت تک متفاوت است.

مرکزی تونل‌ها در مقدار جابجایی‌ها و مقایسه نتایج شکل ۱۸ و جدول ۸ این نتیجه حاصل می‌شود که مقدار جابجایی‌های تاج تونل در حالت انفجار در حد واسط دو تونل در مقایسه با انفجار درست روی محور مرکزی تونل غربی بین ۶۹ تا ۷۴ درصد کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۸- نتایج جابجایی تاج و کف تونل‌های غربی و شرقی تحت بار انفجار در حد واسط دو تونل

وزن ماده منفجره (kg)	تونل غربی		تونل شرقی	
	جابجایی تاج تونل (mm)	جابجایی کف تونل (mm)	جابجایی تاج تونل (mm)	جابجایی کف تونل (mm)
۲۵	-۶/۶	-۱/۸۶	-۶/۵	-۱/۸۵۵
۵۶	-۸/۱۱۲	-۴	-۸	-۳/۵
۱۲۰	-۱۵/۹۱	-۴/۷۲	-۱۶/۶	-۴/۸۵
۱۶۵	-۱۸/۱	-۷/۵	-۱۸/۳	-۸/۱
۲۴۹	-۲۳/۸	-۸/۵۵	-۲۳/۷	-۹
۵۰۲	-۲۷/۴	۳/۸	-۲۷/۴	۳/۹

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته حداکثر تنش ایجاد شده حاصل از انتشار امواج انفجار در محیط خاکی با مشخصات ذکر شده در راستای قائم صورت می‌گیرد و می‌توان برای به حداقل رساندن تنش‌های دریافتی از جانب پوشش بتنی تونل‌ها، در حدفاصل تونل و سطح زمین تمهیدات خاصی مانند سپر بتنی یا فولادی و یا سیمانته کردن لایه‌های خاک بالای تونل به منظور افزایش توان میرایی خاک استفاده کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی چند متغیر نوع لایه‌بندی خاک و جنس خاک در میرایی تنش‌های حاصل از انفجار، تأثیر تغییرات در فاصله مرکز انفجار تا تونل‌ها در سطح زمین و همچنین تأثیر تغییرات وزن ماده منفجره بسته به نوع بمب پرداخته شده است و 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. جابجایی‌ها در تاج و کف تونل وابسته به وزن ماده منفجره متغیر است و هر چقدر مقدار وزن ماده منفجره

۵- فهرست نمادها

در جدول ۹، سیاهه نمادها نشان داده شده است.

جدول ۹- 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- مراجع

- 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)
- 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*
- Campbell, J., Vignjevic, R. (2009). *Artificial Viscosity Methods for Modelling Shock Wave Propagation. In Predictive Modeling of Dynamic Processes (pp. 349-365). Springer, Boston, MA.*
- Yankelevsky, D.Z. Feldgun, V.R., Karinski. Y.S. (2008). "Underground explosion of a cylindrical charge near a buried wall." *International Journal of Impact Engineering* 35: 905-919.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.10.008>
- FLAC 2D User Manual. (2019) ITASCA Consulting Group, Inc. Version 8.10.477
- Borgers, J. Vantomme. (2006). *Towards a parametric model of a planar blast wave created with detonating cord, in: 19th International Symposium on the Military Aspect of Blast and Shock, Calgary, Canada: 1-12*
- Keskin, İ., Ahmed, M. Y., Taher, N. R., Gör, M., & Abdulsamad, B. Z. (2022). *An evaluation on effects of surface explosion on underground tunnel; availability of ABAQUS Finite element*

- method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 120, 104306.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104306>
- Kheirandish, M., Alizadeh Souri, B. (2016). Investigation of the effect of blast wave on underground tunnels. *Journal of Modern Defense Science and Technology*, 201-208. (In Persian)
- Li, P.-J., (2020). "Explosion mechanism analysis during tunnel construction in the Zengwen Reservoir." *Tunnelling and Underground Space Technology* 97: 103279.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103279>
- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the engineering mechanics division*, 95(4), 859-877.
- Mobaraki, B. and M. Vaghefi. (2015). "Numerical study of the depth and cross sectional shape of tunnel under surface explosion." *Tunneling and Underground Space Technology* 47: 114 – 122. (In Persian)
- Mohammadnejad, M., Ramezanzadeh, A., Jalali, M., Azizmohammadi, D. (2011). Dynamic analysis of underground structures under load due to explosion of ground penetrating rocket. Sixth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, 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.
- Moomivand, H., Maarefvand, P., & Moomivand, H. (2021). A New Empirical Approach to Assess Wave Velocities and Dynamic Elastic Properties of Several Models of Jointed Rock Before and After Grouting. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(12), 6439-6455.
- Niroomand, H. (2010). Report of explosion studies in soil based on work done in different countries, Tehran, Malek Ashtar University of Technology
- Qian, H., Zong, Z., Wu, C., Li, J., & Gan, L (2021). Numerical study on the behavior of utility tunnel subjected to ground surface explosion. *Thin-Walled Structures*, 161, 107422.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107422>
- Rashidell, A., Kharghani, M., Dias, D., & Hajihassani, M. (2020). Numerical study of the segmental tunnel lining behavior under a surface explosion–Impact of the longitudinal joints shape. *Computers and Geotechnics*, 128, 103822.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103822>
- Sakurai, S. (1997). Lessons learned from field measurements in tunnelling. *Tunnelling and underground space technology* 12(4), 453-460.
- Sadegh Azar, M., Attarnejad, R., Adel, Khosravi. (2010). Evaluation of response of reinforced concrete structures buried under surface explosion by numerical simulation. *First National Conference on Structures, Earthquakes, Geotechnics*. (In Persian)
- Thai, D. K., Tran, M. T., Phan, Q. M., & Pham, T. H. (2021). Local damage of the RC tunnels under

تأثیر نوع لایه‌بندی خاک بر انتشار امواج حاصل از انفجار سطحی بر...، محمد امیری و ...، ص ۳۱۱-۳۳۱

ballistic missile impact investigated by finite element simulations. In Structures (Vol. 31, pp. 316-329). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.092>

Yang, Z. (1997). *Finite element simulation of response of buried shelters to blast loadings. Finite Elements in Analysis and design 24(3): 113-132. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(96\)00033-](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(96)00033-)*