

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار سازه‌ای نگهداری موقت تونل ساخته شده از لتیس گیر در به همراه شاتکریت در برابر بارهای دینامیکی ناشی از آتشباری

نگارنده: سید حمیدرضا کریمی تبار

استاد راهنما

دکتر فرنوش باسلیقه

استاد مشاور

دکتر مجید نیکخواه

دی ۱۳۹۹

شماره: ۹۹, ۴۳۸ / ۴ =
تاریخ: ۱۳۹۹, ۱۱, ۱۵

باسمه تعالی



فرم شماره (3) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید حمیدرضا کریمی تبار با شماره دانشجویی 9512384 رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت عنوان بررسی رفتار سازه ای نگهداری موقت تونل ساخته شده از لیس گیردر به همراه شاکریت در برابر بارهای دینامیکی ناشی از آتشباری که در تاریخ 1399/10/29 با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره 19-20	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره 18/99 - 18
☐ ج) درجه خوب: نمره 17/99 - 16	☐ د) درجه متوسط: نمره 15/99 - 14
☐ ه) کمتر از 14 غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
1- استاد راهنمای اول	دکتر فرنوش باسلیقه	استادیار	
2- استاد راهنمای دوم			
3- استاد مشاور	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
4- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی عجمی	استادیار	
5- استاد ممتحن اول	دکتر میثم جلالی	استادیار	
6- استاد ممتحن دوم	دکتر رضا نادری	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء مهر دانشکده:



تقدیم بہ

پدر، مادر و، محترم عزیز نرم

بانشکر

به رسم ادب و قدرشناسی، این جانب بر خود لازم می‌دانم که در این چند خط محدود از تلاش ها و کمک های اساتید

ارجمندم آقایان دکتر فروش باسلیق و دکتر محمد نیکخواه که صبورانه پشتیبان و راهنمای من بودند و در طول انجام این

پروژه بار راهنمایی های مفید و مساعدت هایشان مسیر را هموار نمودند و از هیچ گونه کمک و علمی دریغ نکردند، کمال تشکر و

قدردانی را داشته باشم.

این جانب سید حمیدرضا کریمی تبار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی رفتار سازه های نگهداری موقت تونل ساخته شده از لئیس گیردر به همراه شاتکریت در برابر بارهای دینامیکی ناشی از آتشباری تحت راهنمایی دکتر فرنوش باسلیقه متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

سید حمیدرضا کریمی تبار

دی ۱۳۹۹

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

امروزه کاربرد تونل‌ها، علاوه بر کاربردهای متعدد در زمینه حمل و نقل و صنایع عمرانی و معدنی برای اتصال دو نقطه به یکدیگر دارند، در زمینه‌های پدافند غیرعامل و سازه‌های مقاوم در برابر انفجار نیز قابل توجه می‌باشند. در صورت انفجار در تونل‌ها، اعم از انفجار سینه‌ی کار جهت پیشروی یا انفجار در محیط داخلی تونل، امکان ایجاد خسارات وجود دارد و ممکن است به سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل و پایداری تونل آسیب وارد شود. سازه نگهدارنده‌ی تونل در سیستم‌های سنتی حفاری، به دو صورت موقت و دائم مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های نگهدارنده موقت عموماً شامل پروفیل‌های فولادی یا قاب‌های مشبک که با شاتکریت به صورت یکپارچه درمی‌آیند، هستند و برای کنترل پایداری و همگرایی تونل و جلوگیری از تخریب آن، مقاومت ایجاد می‌کنند. در این پایان‌نامه به بررسی پارامترهای دینامیکی ناشی از انفجار الگوی آتشباری بر روی سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل که به صورت مقطع معادل لتیس گیردر (قاب مشبک) و شاتکریت در نظر گرفته شده، پرداخته شده است. در این ارتباط بررسی واکنش دینامیکی سازه به لرزش انفجار ناشی از آتشباری بسیار مهم است. به این منظور بعد از انتخاب زمین مناسب که شرایط استفاده از مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت در آن الزامی باشد، به بررسی این اثرات، تحت نیروهای ناشی از انفجار الگوی آتشباری استفاده شده، پرداخته شده است. با توجه به تحلیل پیچیدگی‌های اندرکنش سیال-سازه انتشار موج شوک ناشی از انفجار و برای مدل‌سازی فرایند انفجار، از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA استفاده شده است. سپس ویژگی‌های پاسخ دینامیکی سازه موقت تونل، مورد بحث قرار گرفته است. معیار سرعت حداکثر ذره‌ای (PPV) جهت ارزیابی ایمنی تونل تحت بارهای دینامیکی، در نظر گرفته شده است. در صورتی که سرعت ایجاد شده در المان‌ها از ۰.۹ متر بر ثانیه بیشتر شود، مراتب تخریب آن‌ها ایجاد می‌شود. طی بررسی المان‌های سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل، مشاهده می‌شود که این سازه، در نزدیک‌ترین محل به سینه‌ی کار تونل دچار تخریب، و تا فاصله‌ی ۲ متر از آن نیز، دچار آسیب می‌شود.

کلمات کلیدی: تونل، پوشش بتنی، مدل‌سازی عددی، انفجار، LS_DYNA

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- کریمی تبار حمیدرضا، باسلیقه فرنوش، نیکخواه مجید. مدل سازی عددی خسارت ناشی از انفجار داخلی بر روی پوشش بتنی تونل. مجله علمی-پژوهشی مواد پرانرژی، سال پانزدهم، شماره ۱، بهار ۹۹، ص ۳۹-۴۶.
- ۲- کریمی تبار، سید حمیدرضا و باسلیقه، فرنوش، ۱۳۹۹. بررسی عددی میزان جابجایی و تنش مؤثر وارده به سازه ی تونل تحت بارگذاری انفجار گاز داخل تونل، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز.

فهرست مطالب

۱	فصل اول - مقدمه و کلیات
۲	۱-۱ کلیات تحقیق
۲	۱-۱-۱ مقدمه
۳	۱-۱-۲ بیان مسئله
۳	۱-۱-۳ ضرورت تحقیق
۴	۲-۱ اهداف تحقیق
۴	۱-۲-۱ اهداف کلی
۴	۲-۲-۱ اهداف جزئی
۵	۳-۲-۱ اهداف کاربردی
۵	۳-۱ فرضیات تحقیق
۵	۴-۱ روش تحقیق
۷	۲. فصل دوم - مرور ادبیات فنی موضوع و پیشینه‌ی تحقیق
۸	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ تونل سازی
۱۰	۱-۲-۲ حفاری تونل به روش ناتم (New Austrian Tunneling Method)
۱۱	۳-۲ سیستمهای نگهداری در تونلهای سنگی
۱۲	۱-۳-۲ راک بولت و کابل مهاری (سنگدوزی)
۱۳	۲-۳-۲ شاتکریت
۱۹	۳-۳-۲ قاب فولادی
۲۰	۴-۳-۲ قاب مشبک
۲۵	۴-۲ ضرورت استفاده از قاب مشبک در انواع سنگ
۲۶	۵-۲ ویژگیهای انفجار
۲۶	۱-۵-۲ انواع انفجار
۲۷	۲-۵-۲ مکانیسم انفجار
۲۹	۳-۵-۲ روش انفجار در حفر تونل
۳۰	۶-۲ مقاومت دینامیکی
۳۰	۱-۶-۲ مصالح و معیارهای پاسخ
۳۱	۲-۶-۲ پاسخ استاتیکی و پاسخ دینامیکی
۳۲	۳-۶-۲ محدودیت‌های تغییر شکل
۳۲	۷-۲ تاریخچه کارهای انجام شده
۳۹	۳. فصل سوم - ارائه مفاهیم و مدل سازی عددی

۴۰	۱-۳ مقدمه
۴۰	۲-۳ روش‌های عددی در تحلیل مسائل
۴۱	۱-۲-۳ دیدگاه لاگرانژی
۴۲	۲-۲-۳ دیدگاه اویلری
۴۳	۳-۲-۳ روش ALE
۴۴	۳-۳ معرفی نرم‌افزار LS-DYNA
۴۵	۱-۳-۳ تاریخچه پیدایش نرم‌افزار
۴۵	۲-۳-۳ توانمندی‌های نرم‌افزار
۴۶	۳-۳-۳ انواع تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها
۴۶	۴-۳-۳ الگوریتم کلی فرآیند شکل‌دهی در LS-DYNA
۴۷	۴-۳ مراحل مدل‌سازی
۴۸	۱-۴-۳ هندسه مدل
۵۰	۲-۴-۳ مش بندی
۵۲	۳-۴-۳ الگوی انفجار
۵۳	۵-۳ سیستم واحدها در نرم‌افزار
۵۳	۶-۳ معادلات حاکم
۵۴	۱-۶-۳ شرایط مدل‌سازی ماده منفجره، گل و هوا
۵۴	۷-۳ معادلات رفتار ماده و معادلات حالت
۵۵	۱-۷-۳ مدل رفتار ماده معادل لتیس شاتکریت
۵۵	۲-۷-۳ مدل رفتار ماده منفجره و معادله حالت
۵۶	۳-۷-۳ مدل رفتار ماده سنگ
۵۶	۴-۷-۳ مدل رفتار و معادله حالت هوا
۵۷	۵-۷-۳ مدل ماده گل گذاری
۵۸	۸-۳ اعتبارسنجی مدل‌سازی نرم‌افزار LS-DYNA
۵۸	۱-۸-۳ هوا
۵۹	۲-۸-۳ سنگ
۶۱	۴. فصل چهارم - تحلیل و ارزیابی نتایج
۶۲	۱-۴ مقدمه
۶۲	۲-۴ کانتورهای گسترش تنش مؤثر اطراف چال
۶۵	۳-۴ بررسی پارامترهای دینامیکی سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل
۶۷	۱-۳-۴ بررسی پارامتر جنبش سرعت
۷۳	۲-۳-۴ بررسی پارامتر جابه‌جایی
۷۸	۳-۳-۴ بررسی پارامتر جنبش شتاب

۸۲	۴-۳-۴ تنش مؤثر المان‌ها
۸۷	۴-۴ ارزیابی آسیب
۹۱	۵. فصل پنجم - نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۲	۵-۱ نتیجه‌گیری
۹۳	۵-۲ پیشنهادها
۹۵	منابع و مآخذ

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ شکل کلی از جزئیات لتیس گیردر و شاتکریت با الیاف فولادی در تونل ----- ۹
- شکل ۲-۲ نمای کلی از سنگ دوزی تونل ----- ۱۳
- شکل ۳-۲ نمای کلی شاتکریت و لتیس گیردر در محیط سنگی ----- ۱۴
- شکل ۴-۲ منحنی تنش - کرنش شاتکریت ----- ۱۷
- شکل ۵-۲ نمونه‌ی منحنی تنش کرنش فولاد ----- ۲۰
- شکل ۶-۲ جزئیات لتیس گیردر سه میله‌ای ----- ۲۲
- شکل ۷-۲ جزئیات لتیس گیردر چهار میله‌ای ----- ۲۲
- شکل ۸-۲ شمای کلی لتیس گیردر ----- ۲۳
- شکل ۹-۲ شمای کلی لتیس گیردر و شاتکریت اجرا شده ----- ۲۴
- شکل ۱۰-۲ طبقه‌بندی RMR سنگ ----- ۲۵
- شکل ۱۱-۲ انفجار در سینه‌ی کار تونل. ----- ۲۸
- شکل ۱۲-۲ نمودار شماتیک موج انفجار. ----- ۲۹
- شکل ۱۳-۲ انفجار حفاری در سینه‌ی کار تونل. ----- ۳۰
- شکل ۱۴-۲ محیط مدل‌سازی و نقاط موردنظر جهت بررسی ----- ۳۴
- شکل ۱۵-۲ میزان ماکزیمم سرعت و شتاب ایجاد شده در نقاط مختلف تونل ----- ۳۶
- شکل ۱۶-۲ الگوی آتشباری استفاده شده جهت مدل‌سازی در سنگ گرانی. ----- ۳۷
- شکل ۱-۳ تفاوت دیدگاه لاگرانژی و اوپلری. ----- ۴۳
- شکل ۲-۳ هندسه و شمای کلی متقارن مدل‌سازی. ----- ۴۹
- شکل ۳-۳ محیط کامل مدل‌سازی شده. ----- ۵۰
- شکل ۴-۳ مش بندی سنگ، سازه‌ی تونل و اطراف چال‌های انفجاری. ----- ۵۱
- شکل ۵-۳ مقایسه‌ی الگوی آتشباری استفاده شده با مدل‌سازی نرم‌افزار. ----- ۵۲
- شکل ۶-۳ (الف) مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج تجربی (ب) محل نقاط اندازه‌گیری. ----- ۵۹
- شکل ۱-۴ کانتور تنش اطراف چال‌های انفجاری در لحظه‌ی انفجار اولیه و زمان‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌ثانیه. ----- ۶۳
- شکل ۲-۴ کانتور تنش اطراف چال‌های انفجاری در زمان‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ میلی‌ثانیه. ----- ۶۳
- شکل ۳-۴ گسترش تنش ناشی از انفجار در سنگ اطراف. ----- ۶۴
- شکل ۴-۴ گسترش تنش ناشی از انفجار در سنگ اطراف. ----- ۶۵
- شکل ۵-۴ نقاط اصلی موردنظر در مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت. ----- ۶۶
- شکل ۶-۴ فواصل نیم متری نقاط موردنظر در مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت. ----- ۶۷
- شکل ۷-۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط نشانه A1, B1, C1, D1, E1. ----- ۶۸
- شکل ۸-۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط A1 تا A5. ----- ۶۹
- شکل ۹-۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط B1 تا B5. ----- ۶۹

- شکل ۴-۱۰ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط C1 تا C5. ----- ۷۰
- شکل ۴-۱۱ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط D1 تا D5. ----- ۷۱
- شکل ۴-۱۲ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط E1 تا E5. ----- ۷۲
- شکل ۴-۱۳ میزان حداکثر سرعت نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر. ----- ۷۲
- شکل ۴-۱۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط اصلی A1,B1,C1,D1,E1. ----- ۷۴
- شکل ۴-۱۵ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط A1 تا A5. ----- ۷۵
- شکل ۴-۱۶ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط B1 تا B5. ----- ۷۵
- شکل ۴-۱۷ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط C1 تا C5. ----- ۷۶
- شکل ۴-۱۸ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط D1 تا D5. ----- ۷۶
- شکل ۴-۱۹ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط E1 تا E5. ----- ۷۷
- شکل ۴-۲۰ میزان حداکثر جابه‌جایی نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر. ----- ۷۷
- شکل ۴-۲۱ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط نشانه A1,B1,C1,D1,E1. ----- ۷۹
- شکل ۴-۲۲ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط A1 تا A5. ----- ۷۹
- شکل ۴-۲۳ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط B1 تا B5. ----- ۸۰
- شکل ۴-۲۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط C1 تا C5. ----- ۸۰
- شکل ۴-۲۵ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط D1 تا D5. ----- ۸۱
- شکل ۴-۲۶ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط E1 تا E5. ----- ۸۱
- شکل ۴-۲۷ میزان حداکثر شتاب نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر. ----- ۸۲
- شکل ۴-۲۸ کانتور تنش مؤثر در پوشش سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل. ----- ۸۳
- شکل ۴-۲۹ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط نشانه A1,B1,C1,D1,E1. ----- ۸۴
- شکل ۴-۳۰ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط A1 تا A5. ----- ۸۴
- شکل ۴-۳۱ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط B1 تا B5. ----- ۸۵
- شکل ۴-۳۲ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط C1 تا C5. ----- ۸۵
- شکل ۴-۳۳ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط D1 تا D5. ----- ۸۶
- شکل ۴-۳۴ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط E1 تا E5. ----- ۸۶
- شکل ۴-۳۵ میزان حداکثر تنش مؤثر نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر. ----- ۸۷

فهرست جداول

جدول ۳-۱ طبقه بندی مقطع عرضی تونل راه.	۴۷
جدول ۳-۲ طبقه بندی مقطع عرضی تونل راه آهن.	۴۸
جدول ۳-۳ واحدهای قراردادی نرم افزار جهت پارامترهای ورودی و خروجی	۵۳
جدول ۳-۴ مدل ماده مقطع معدل لتیس گیردر و شاتکریت.	۵۵
جدول ۳-۵ مدل ماده خرج انفجاری [24].	۵۶
جدول ۳-۶ مدل ماده سنگ.	۵۶
جدول ۳-۷ مدل ماده هوا.	۵۷
جدول ۳-۸ مدل ماده خاک.	۵۷
جدول ۳-۹ مقایسه ی نتایج رابطه ی تجربی و مدل سازی عددی سنگ.	۶۰
جدول ۴-۱ نوع آسیب سازه بر اساس سرعت بیشینه.	۸۸
جدول ۴-۲ درجه ی خسارت در نقاط مورد بررسی.	۸۹

۱. فصل اول - مقدمه و کلیات

۱-۱ کلیات تحقیق

۱-۱-۱ مقدمه

سازه‌های زیرزمینی، امروزه کاربردهای بسیاری در زندگی روزمره‌ی ما دارند و لازمه‌ی بسیاری از فعالیت‌های بشر می‌باشند. از این سازه‌ها در زمینه‌های بسیاری از جمله صنعت راه و حمل‌ونقل، تونل‌های انتقال آب، خطوط انتقال برق فشارقوی و ... استفاده می‌شود.

پس از آنکه تونل یا فضای زیرزمینی حفر شد اگر خودپایدار نباشد باید توسط سیستم نگهداری مستحکم شود. نگهدارنده‌هایی که برای نگهداری فضای زیرزمینی بکار می‌روند به دو دسته موقت و دائمی تقسیم می‌شوند. سنگ‌های سالم، از جمله سنگ‌های آذرین متبلور و برخی از سنگ‌های رسوبی سخت، در طی اجرا و در زمان بهره‌برداری تونل حالت خودنگهدار دارند. در صورتی که بسیاری دیگر از سنگ‌ها و تقریباً همه خاک‌ها باید در طول حفاری با حایل‌هایی نگهداری شوند و پس از آن نیز محتاج پوشش‌های محافظ دائمی‌اند.

طراحی نگهدارنده‌ی تونل زیرزمینی بر مبنای فشار زمین و نوع سنگ انجام می‌شود. فشار زمین به کمک روابط تحلیلی یا تجربی برآورد می‌شود. فشار زمین می‌تواند در زمین رسی بسیار زیاد باشد و یا اینکه حدود صفر باشد که این در مورد سنگ‌های سالم، می‌تواند صدق کند. قاب‌های فولادی، قاب‌های مشبک، تیرک‌های چوبی، صفحات پوششی، میل مهار، شبکه توری، و بتن پاشی روش‌هایی‌اند که جهت نگهداری فضاهای حفر شده در سنگ‌های متوسط تا ضعیف بکار گرفته می‌شوند. در صورتی که پیشروی ما به صورت انفجار با خرج گذاری مکانیکی باشد، زمین موردنظر، تحت آسیب قرار می‌گیرد و امکان تخریب در آن هست؛ لذا وجود سازه‌ی موقت یا دائمی در این موارد، الزامی است. بررسی‌های زیادی روی تأثیر انفجارهای خارجی یا داخلی بر سازه‌های موقت و دائمی شده است که در بخش‌های بعد توضیحات بیشتر داده خواهد شد.

شاتکریت به عنوان نگهداری موقت استاندارد در طراحی و ساخت تونل استفاده می‌شود. اگر شدت بارهایی که از زمین به نگهداری موقت منتقل می‌شود، به اندازه‌ای بزرگ باشد که مانع از استفاده شاتکریت به تنهایی شود،

یا اگر فشردگی زمین^۱ و یا لکه‌گیری^۲ مجدد برای سطح پوشش لازم باشد، قاب مشبک یا همان لتیس گیردر و یا پروفیل‌های قوسی فولادی به‌طور معمول همراه با شاتکریت استفاده می‌شود.

توجه به عملکرد قاب مشبک و شاتکریت تحت بارهای انفجاری ناشی از پیشروی در تونل و بررسی تغییرات پارامترهای سازه‌ای ایجادشده در آن لازم می‌باشد.

۱-۱-۲ بیان مسئله

باتوجه به توسعه کاربری روزافزون تونل‌ها و احداث آن‌ها در پروژه‌های مختلف، پیشروی در آن‌ها به روش‌های متداول سنتی چال‌زنی و آتشباری انجام می‌گیرد. روش آتشباری یکی از روش‌های کارآمد جهت احداث حفاریات زیرزمینی به ویژه برای مواردی که طول زیادی ندارند، می‌باشد که سرعت پیشروی زیاد آن و همچنین هزینه‌های کمتر آن نسبت به روش‌هایی مانند حفاری مکانیکی و ... تأثیر بسزایی در جذابیت طرح دارد. اجرای این روش شامل یک عملیات چرخه‌ای یا سیکلی است که با اجرای هر سیکل بخشی از فضای زیرزمینی احداث می‌گردد. شناخت ماهیت اجزای اصلی این مجموعه عملیات جهت بهبود راندمان آن بسیار مفید و ضروری می‌باشد. با توجه به بار دینامیکی ایجادشده هنگام انفجار ناشی از آتشباری چال‌های حفاری، در این پایان‌نامه بررسی تأثیر بار دینامیکی ناشی از انفجار بر سازه‌ی موقت تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این تحقیق فقط به بررسی رفتار سازه‌ای نگه‌دارنده‌ی موقت تونل در برابر بارهای دینامیکی ناشی از آتشباری پرداخته خواهد شد.

۱-۱-۳ ضرورت تحقیق

امروزه به دلیل نیاز روزافزون به استفاده از فضاهای زیرزمینی شهری، ضرورت بررسی این سازه‌ها در برابر نیروهای مختلف بیش‌ازپیش احساس می‌شود. این سازه‌ها با مقطع دایره، نعل اسبی، D شکل و ... ساخته

¹ Squeezing

² Raveling

می‌شوند، لذا باتوجه‌به نیروهای وارد، تغییر شکل‌ها و تنش‌های ایجادشده در سازه نگهدارنده‌ی تونل، تغییرات بسیار زیادی داشته و در نهایت شرایط پیچیده‌تری را فراهم می‌آورند. بررسی سازه‌های زیرزمینی که تحت تأثیر بارهای انفجاری قرار می‌گیرند، سبب شناخت مهندسان مشاور و مهندسان اجرایی کار نسبت به عملکرد آن‌ها می‌شود؛ لذا نواحی پرخطر سازه‌ها شناسایی و از ایجاد حوادث ناگوار جلوگیری می‌شود.

۱-۲ اهداف تحقیق

اهداف پژوهش حاضر شامل اهداف کلی و کاربردی به شرح زیر می‌باشد.

۱-۲-۱ اهداف کلی

اهداف کلی تحقیق بررسی رفتار سازه‌ای نگهداری موقت تونل ساخته شده از لیس گيردر به همراه شاتکریت در برابر بارهای دینامیکی ناشی از آتشباری می‌باشد. با بررسی این موضوع، می‌توان شناخت صحیحی نسبت به رفتار سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل تحت آتشباری داشت.

۱-۲-۲ اهداف جزئی

باتوجه‌به استفاده از الگوی آتشباری جهت پیشروی طولی تونل به بررسی پارامترهای زیر پرداخته شده است:

- تنش مؤثر ایجادشده در سازه‌ی موقت تونل
- میزان جابه‌جایی ایجادشده در سازه‌ی موقت تونل
- میزان سرعت ایجادشده در سازه‌ی موقت تونل
- میزان شتاب ایجادشده در سازه‌ی موقت تونل

۱-۲-۳ اهداف کاربردی

این تحقیق می‌تواند در زمینه‌ی مهندسی عمران، مهندسی معدن و همچنین مهندسی ژئوتکنیک کمک کند تا شناخت کاملی نسبت به پدیده‌ی انفجار در تونل پیدا کنند. در زمینه‌ی پیشروی با آتشباری که در پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود، داده‌های این پایان‌نامه می‌تواند برای مهندسان طراح تونل مفید باشد.

۱-۳ فرضیات تحقیق

- در نظر گرفتن لתיس گیردر به همراه شاتکریت در سازه‌ی نگهدارنده موقت تونل سبب بهبود عملکرد سازه تونل خواهد شد.
- در نظر گرفتن لתיس گیردر به همراه شاتکریت در سازه نگهدارنده موقت تونل سبب کاهش سرعت موج انفجار در محیط اطراف می‌شود.

۱-۴ روش تحقیق

در این تحقیق پس از انتخاب سنگ مناسب که طبق رده‌بندی RMR، از درجه‌ی ۴ باشد و لزوم استفاده از لתיس گیردر و شاتکریت در آن نیاز باشد، به بررسی مقطع معادل لתיس گیردر و شاتکریت پرداخته شده و مشخصات آن به دست آورده شده است. برای پیشروی در جبهه‌ی کاری تونل، از الگوی آتشباری رایج استفاده شده است. پس از آن، به مدل‌سازی پرداخته شده است.

برای مدل‌سازی فرایند انفجار چال‌های انفجاری، در مدل‌سازی عددی از روش صریح کوپل لاگرانژی - اویلری به‌وسیله نرم‌افزار LS-DYNA استفاده شده است. مدل‌سازی به‌صورت کامل و تمام‌مقیاس انجام شده است. در این مدل، به شبیه‌سازی سنگ، سازه‌ی تونل، خرج انفجاری، گل‌گذاری و هوای داخل تونل پرداخته شده است. سازه‌ی تونل با مقطع D شکل و محیط پیرامون سنگی تحت بار ناشی از خرج چال‌های انفجاری بررسی شده است. کوپل سیال و سازه (FSI) به‌صورت کامل ایجاد شده است. المان‌ها از نوع SOLID و برای صحت سنجی روش عددی، از روابط تجربی جهت کنترل داده‌ها در المان‌ها و اطمینان از نتایج استفاده شده است.

۲. فصل دوم- مرور ادبیات فنی موضوع و پیشینه‌ی تحقیق

۲-۱ مقدمه

قاب‌های فولادی و قاب‌های مشبک اساساً عملکرد مشابهی دارند. آن‌ها را می‌توان به‌عنوان پوشش نگهداری موقت یا بخشی از پوشش دائمی استفاده کرد. در دهه‌های اخیر قوس‌های فولادی سنگین جای خود را به قوس فولادی سبک‌تر و قاب‌های مشبک کنترل‌پذیرتر داده است.

قاب‌های فولادی مقاومت و سختی بالایی دارند ولی به خاطر خصوصیات هندسی آن‌ها، ممکن است حفره‌های غیرمنتظره‌ای در پوشش شاتکریت ایجاد شود که می‌تواند سبب خوردگی فولاد در بین شاتکریت شود از طرف دیگر اگر تونل زیرسطح ایستایی باشد می‌تواند معبری برای عبور آب باشد. به خاطر هندسه سه‌بعدی قاب مشبک، امکان ایجاد حفره در پوشش شاتکریت به میزان زیادی کاهش می‌یابد [۱].

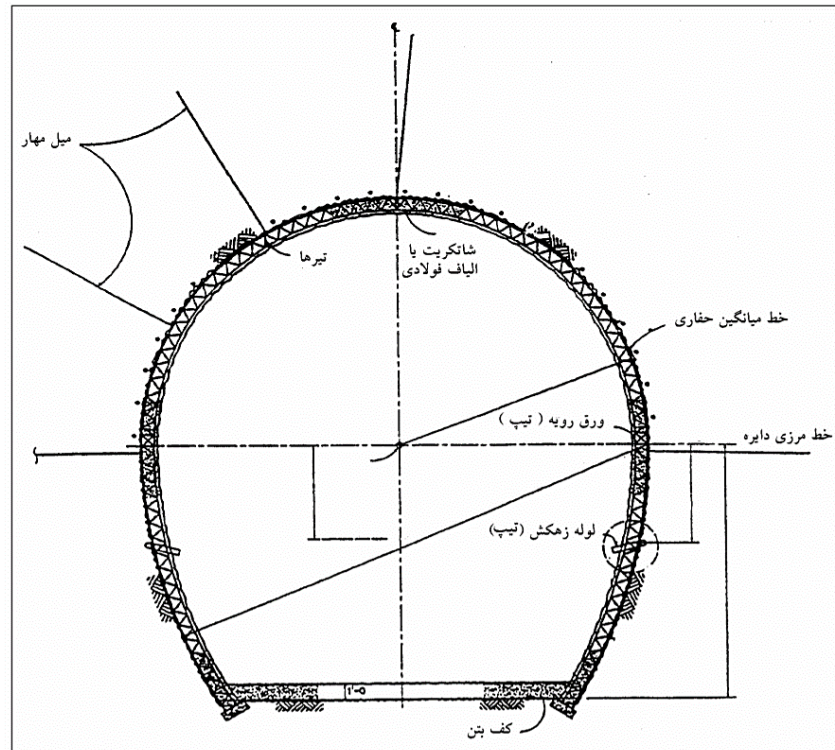
از طرفی، با توجه به مزایای آتشباری جهت پیشروی در تونل، در زمین‌های سنگی، آشنایی با این روش و بررسی میزان تنش‌های وارد از آن به سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل، ضروری می‌باشد.

در این فصل، تحقیقات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در رابطه با روش‌های تونل‌سازی و سازه‌های نگهدارنده‌ی آن توضیحاتی داده شده است. به موضوع انفجار و مکانیسم گسترش موج انفجار نیز پرداخته شده است.

۲-۲ تونل‌سازی

پیشرفت و تکامل صنعت تونل‌سازی عمدتاً به پیشرفت‌هایی است که در زمینه‌ی حفاری صورت گرفته است. البته ابداعاتی که در زمینه‌ی نگهداری و تحکیم مواد سنگی صورت گرفته است نیز در این زمینه نقش مهمی دارند. تونل‌زنی در مناطق شهری تبعات خاص خود را دارد. عمق روباره کم بوده، زمین اغلب به‌صورت آبرفتی بوده و سیمانی نشده است و وجود ساختمان‌ها و پی‌های مجاور حساسیت زیادی بر نشست‌های حاصل از حفر تونل ایجاد می‌کنند و علاوه بر این امکان حفاری و یا تقویت را از طریق سطح زمین (روش کندن و پوشاندن)

محدود می‌کند. با وجود چنین شرایطی تونل‌ها بایستی با روش‌هایی ایجاد شوند که کمترین خسارت را برای سازه‌های سطحی داشته باشند، یعنی تغییر شکل زمین را تا حد امکان کاهش دهند. در شکل ۱-۲ جزئیات سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل، که از نوع لتیس گیردر همراه با شاتکریت الیاف فولادی می‌باشد، نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ کلی از جزئیات لتیس گیردر و شاتکریت با الیاف فولادی در تونل [۲].

روش‌های مختلفی برای حفر تونل وجود دارد که اختصاراً به توضیح آن پرداخته می‌شود

- با استفاده از سپر
- با استفاده از هوای فشرده
- با استفاده از ماشین تونل کنی

روش‌های مکانیزه در حفر تونل به وسیله‌ی ماشین‌های تونل کنی به شرح زیر است

- حفاری کل مقطع تونل توسط دستگاه TBM
- حفاری‌های موضعی با استفاده از دستگاه کله‌گاوی
- استفاده از چکش‌های هیدرولیکی

۲-۱-۲ حفاری تونل به روش ناتم (New Austrian Tunneling Method)

روش اتریشی ناتم روشی است که با حفاری تدریجی تونل، به خاک یا توده سنگ اجازه داده می‌شود که قسمتی از آن تحت تأثیر حفاری قرار گرفته و پس از مقداری تغییر شکل و نصب سیستم نگهداری، تعادل نسبی خود را به دست آورد. روش اجرا در این حالت تابع شرایط خاک می‌باشد و برحسب جنس خاک، حفاری ممکن است در کل سطح مقطع، نیمی از آن و یا در مقاطع کوچک‌تر انجام گیرد ولی به‌طور کلی مراحل اجرا تابع شرایط زمین‌شناسی، وضعیت آب زیرزمینی، وضعیت روباره و روش اجراست. از مزایای کاربرد روش ناتم و کاربرد وسیع آن در پروژه‌های مترو، می‌توان عدم نیاز به ماشین‌آلات خاص، امکان اجرای مقطع دلخواه تونل و قدرت مانور بیشتر و از معایب روش مذکور سرعت پیشروی کم، امکان اجرای تونل در طول‌های محدود، عدم کنترل ریزش سینه کار و ورود آب‌های نفوذی از سینه کار و دیواره‌های حفاری شده تونل است [۳].

NATM مجموعه‌ای از تکنیک‌های خاص حفاری و پشتیبانی نیست و اغلب از آن به‌عنوان رویکرد "طراحی در حین حرکت" برای تونل‌سازی استفاده می‌شود که پشتیبانی بهینه شده‌ای را بر اساس شرایط زمین مشاهده شده ارائه می‌دهد، اما به طور صحیح‌تر، "طراحی است که شما نظارت می‌کنید" رویکرد مبتنی بر همگرایی و واگرایی مشاهده شده در پوشش و همچنین شرایط غالب زمین.

چند ویژگی وجود دارد که NATM بر اساس آن‌ها بنا شده است:

- استفاده از مقاومت توده سنگ - پشتیبانی اولیه برای این است که سنگ بتواند خودش را تحمل کند.

- محافظت شاتکریت - شل شدن و تغییر شکل بیش از حد سنگ باید به حداقل برسد.
- اندازه‌گیری‌ها - هر تغییر شکل حفاری باید اندازه‌گیری شود.
- پشتیبانی انعطاف‌پذیر - پوشش اصلی تونل نازک است و شرایط نهایی لایه‌ها را منعکس می‌کند.
- ترتیبات قراردادی - از آنجاکه NATM مبتنی بر اندازه‌گیری‌های نظارتی است، تغییر در پشتیبانی و روش ساخت امکان‌پذیر است.
- طبقه‌بندی توده سنگ اقدامات پشتیبانی را تعیین می‌کند - چندین کلاس اصلی سنگ برای تونل‌ها و سیستم‌های پشتیبانی مربوطه وجود دارد. اینها به‌عنوان راهنمایی برای تقویت تونل عمل می‌کنند [۴].

۲-۳ سیستم‌های نگهداری در تونل‌های سنگی

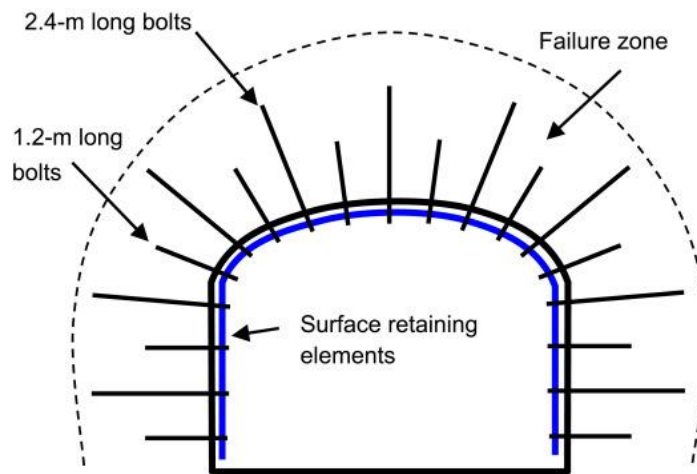
سیستم نگهداری به سیستمی گفته می‌شود که با نصب سیستم‌هایی مانند قاب‌های فلزی و دیوارسازی، از حرکت سنگ‌های اطراف تونل جلوگیری شده و نیز وزن قطعات سست که امکان سقوط دارند، به‌وسیله این سیستم تحمل می‌شود. امروزه از تقسیم‌بندی سیستم‌های نگهداری موقت و دائم استفاده می‌شود. سیستم نگهداری اولیه، به‌منظور تأمین محیط کار و همچنین شروع فرآیند فعال‌سازی و حفظ مقاومت توده سنگ نصب می‌شود. این سیستم نگهداری ممکن است تمام یا قسمتی از کل سیستم نگهداری لازم را تشکیل دهد. هرگونه سیستم نگهداری که پس از این مرحله نصب شود، نگهداری ثانویه نامیده می‌شود. نگهداری ثانویه وظایف و نقش خاصی را به عهده دارد و مکمل نقش نگهداری اولیه است. در بسیاری از تونل‌ها سطح داخلی تونل باید صاف و هموار باشد. به‌طور مثال در تونل‌های راه ممکن است محافظ‌های ضد فرسایش و خوردگی برای نگهداری اولیه و آستربندی نهایی موردنیاز باشد که تمامی این اهداف با سیستم نگهداری ثانویه تأمین می‌شود [۵].

تونل‌ها و حفره‌های معدنی ایجاد شده در سنگ معمولاً خودنگهدار هستند. حفره‌ها و بخش‌های استخراج شده در معادن، به‌ویژه در معادن زغال‌سنگ، به‌جای مقطع دایره‌ای یا بیضوی دارای مقطع مستطیلی‌اند. در اینجا تنش‌ها عمدتاً توسط دیواره‌های تونل و در کارگاه‌های استخراج توسط پایه‌ها و قسمت‌های حفاری نشده تحمل می‌گردد. پس از حفاری تونل در سنگ‌های دارای لایه‌بندی افقی، لایه‌های واقع در سقف، تغییر شکل داده و تشکیل یک قوس فشاری می‌دهند که بار لایه‌های بالایی را تحمل می‌کند. در نتیجه بارهای روباره از اطراف حفره به دیواره‌ها و پایه‌ها منتقل می‌شود. میزان تغییر شکل لایه سقف تابعی از ابعاد دهنه، وزن لایه و ضخامت آن، مقاومت کششی و مشخصات درزه‌هاست. در سنگ‌های دارای درزه‌های زیاد، با دوختن و مهار کردن لایه‌ها می‌توان یک تیر مرکب تشکیل داد و سقف را مقاوم کرد. ظرفیت باربری پایه‌ها تابعی از جنس و ابعاد پایه و جنس پی آن است.

فضاهای زیرزمینی بزرگ معمولاً در سنگ‌های با کیفیت خوب احداث می‌شوند که محتاج حداقل پوشش‌اند. در معادن نیز حایل توسط پایه‌ها تأمین می‌شود یا در صورت استفاده از جک‌هایی که پس از پایان استخراج جمع‌آوری می‌شوند، سقف تونل‌های دائمی معادن را می‌توان با میل مهار کنترل کرد. در اینجا مهم‌ترین روش‌های نگهداری فضاهای ایجاد شده در سنگ را مرور می‌کنیم.

۲-۳-۱ راک بولت و کابل مهاری (سنگ‌دوزی)

در سنگ‌های درزدار، لایه‌لایه یا دیگر سنگ‌های ناپایدار، ناحیه سست یا خمیری شده اطراف قوس طاق تونل، همانگونه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده، توسط راک بولت‌ها یا در صورتی که منطقه سست ضخیم باشد، توسط کابل‌هایی تحت فشار نگه داشته می‌شود. راک بولت‌ها، معمولاً در چال‌هایی که به این منظور در سنگ حفاری می‌شود، قرار داده می‌شوند.



شکل ۲-۲ نمای کلی از سنگ دوزی تونل [۶].

۲-۳-۲ شاتکریت

بتنی رقیق با دانه‌های سنگی درشت (۱۲ میلی‌متر) است که با فشار باد و با سرعت زیاد بر سطح سنگ پاشیده می‌شود و به‌این ترتیب پیوندی قوی با سنگ به وجود می‌آورد. شاتکریت معمولاً در لایه‌های ۵ سانتیمتری (به تنهایی) و بلافاصله بعد از حفاری (آتش‌کاری) پاشیده می‌شود. شاتکریت را بسته به شرایط می‌توان به‌تنهایی یا همراه با دیگر نگهدارنده‌ها بکار گرفت.

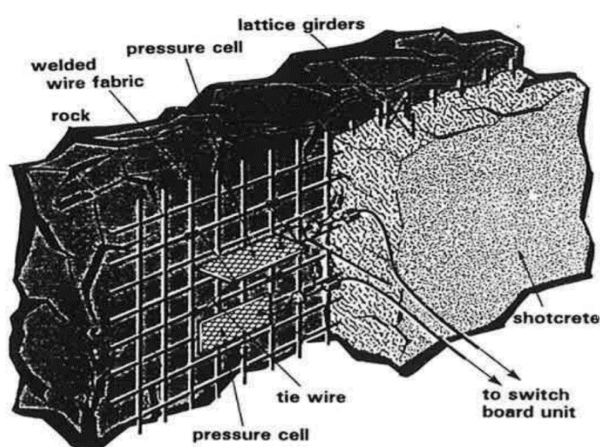
۲-۳-۲-۱ روش اجرای شاتکریت

دو روش برای اجرای شاتکریت وجود دارد: روش خشک و روش تر.

در روش خشک، مصالح خشک توسط هوای با فشار کم در لوله حمل و آب در انتهای افشانه به آن اضافه می‌شود. از این روی امکان استفاده از مصالح درشت‌دانه تا ۱۵ میلی‌متر نیز وجود دارد. این سیستم معمولاً برای اجرای شاتکریت دانه‌درشت در حفاریات زیرزمینی به کار می‌رود. از مزایای آن می‌توان به استفاده از تجهیزات ساده‌تر و ارزان‌تر و همچنین امکان پمپ کردن طولانی‌مدت مصالح اشاره کرد. از معایب آن نیز می‌توان به پرت زیاد شن و ماسه، ایجاد گرد و خاک زیاد و همچنین حساسیت زیاد شاتکریت به میزان آب وارده اشاره کرد.

در روش تر، ابتدا اجزا شاتکریت و آب را مخلوط کرده و سپس به داخل پمپ‌های ویژه هدایت می‌کنند. از مزایای آن ایجاد گرد و غبار کم و همچنین یکنواختی کامل شاتکریت است. از معایب آن مصرف سیمان بیشتر و گران‌تر بودن ماشین‌آلات مورد استفاده است.

در شکل ۲-۳، نمایی کلی از جزئیات اجرا و محل قرار گیری اجزای سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ نمای کلی شاتکریت و لتیس گیردر در محیط سنگی [۷].

۲-۲-۳-۲ عملکرد تکیه‌گاهی شاتکریت

عمده‌ترین عاملی که باعث استفاده فراوان شاتکریت در نگهداری سازه‌های سنگی زیرزمینی شده، قابلیت چسبندگی آن به هر نوع سنگ و گیرش و سخت شدگی سریع آن است.

- اگر شاتکریت با فشار روی درز و ترک‌ها و ناهمواری‌های سطوح سنگی پاشیده شود، مانند یک ملات سبب یکپارچگی سطوح مورد اجرا می‌شود.

- شکاف‌های سنگ محل تأثیر تنش‌های متمرکز و جز نقاط ضعیف آن محسوب می‌شوند. پرکردن این ترک‌ها با بتن زودگیر سبب می‌شود که قسمت‌های زاویه‌دار سنگ به‌صورت گرد در آید و در نتیجه، تنش‌های متمرکز کاهش یابد و از حرکات مخرب جلوگیری به عمل آید.
- از آنجا که شاتکریت با اکثر سنگ‌ها به خوبی می‌چسبد، لذا لایه نازکی از آن به شکل سطحی مقاوم در جهت تقویت سطوح ضعیف عمل می‌کند. با این روش، ترکیبی از سنگ و سطح تقویت شده به وجود می‌آید که بار وارده را به کمک مقاومت‌های چسبندگی و برشی، به سنگ‌های پایدار مجاور منتقل می‌سازد. مقاومت برشی مناسب شاتکریت سبب می‌شود که به خوبی از سقوط قطعات سست سنگ جلوگیری به عمل آید.
- در صورت سست بودن اتصال سنگ و پوشش، لایه‌ی نازک و یکپارچه‌ای از شاتکریت به‌صورت یک غشا در خمش و کشش کار می‌کنند.
- در اتصال بلوک‌های سنگی به‌وسیله مهارها، دیده شده است که با کاهش فاصله بلوک‌ها، در مورد یک نوع مهار با شکل و اندازه مشخص، تنش‌های وارده بر آن کاهش می‌یابد. سنگ و شاتکریت را می‌توان به‌صورت یک تکیه‌گاه توأم که به طور پیوسته محیط تونل را احاطه کرده‌اند با فاصله صفر بین بلوک‌ها در نظر گرفت. به علت پایین بودن نسبی سطح تنش گسترده در لایه شاتکریت، این لایه قادر به تحمل بار نسبتاً زیاد از ناحیه سنگ است. به‌علاوه، با گسترش سطح تماس آن با سنگ در جهت طول تونل، ظرفیت تحمل بار این پوشش به مراتب بیشتر می‌شود.

- شاتکریت از نشت آب از خلل و فرج سنگ جلوگیری می‌کند و در نتیجه از خروج ذرات آکنده ترک‌ها ممانعت به عمل می‌آورد. در تونل سازی با روش سنتی حفاری، معمولاً آب موجود در سنگ‌ها به وسیله گاز ناشی از انفجار پس زده می‌شود. اگر قبل از آنکه آب مزبور مجدداً به سطح سنگ برگردد، شاتکریت اجرا شود، اثر عایق‌بندی آن بیشتر خواهد بود. همچنین پوشش سریع سنگ عریان، سبب حفاظت آن در مقابل هوازدگی می‌شود.

- در ساعات اولیه، شاتکریت کمی به حالت تسلیم درمی‌آید اما پس از چندی که فشارهای سست‌شدگی افزایش می‌یابد، سخت می‌شود. در شرایط تعادل، قوس فشار در بالای تونل ثابت شده و گسترش آن متوقف می‌شود. به این ترتیب، سنگ به صورت تکیه‌گاهی مستقل باید قسمتی از بارهای وارده از ناحیه بالای تونل را تحمل کند. یک لایه‌ی نازک شاتکریت که بلافاصله پس از حفاری پاشیده می‌شود، به شکل پوسته‌ای مناسب، سنگ ضعیف را به وضعیت پایدارتری می‌رساند.

- شاتکریت به صورت پیوسته و لایه‌ای ضخیم حداقل ۱۵ سانتیمتر، از نظر سازه‌ای به صورت یک حلقه بسته یا قوسی گیردار عمل می‌کند.

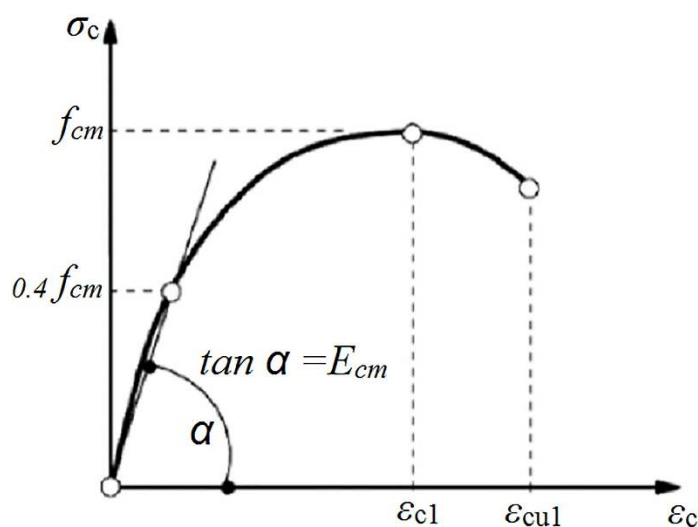
به طور خلاصه می‌توان گفت که شاتکریت برخلاف سیستم‌های نگهداری فلزی، بار وارده را به کف تونل منتقل نمی‌کند بلکه به توده سنگ کمک می‌کند تا بارهای وارده را تحمل کند [۸].

۳-۲-۳-۲ رفتار شاتکریت

همانگونه که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، شاتکریت در روزهای اولیه از کاربرد خود رفتار متغیری از خود نشان می‌دهد و خواص آن بسیار متغیر است که با گذشت زمان از شدت تغییرات کاسته می‌شود،

به‌طوری‌که پس از ۲۸ روز تغییرات متوقف می‌شود. برخی از رفتارهای پیچیده که شاتکریت از خود نشان می‌دهد به‌صورت زیر است:

- خواص مکانیکی شاتکریت مانند محصول واکنش هیدراتاسیون نسبتاً زیاد تغییر می‌کند و یک بتن محکم تشکیل می‌دهد.
- میزان تغییر خواص به علت هیدراتاسیون در ابتدا سریع است و با گذشت زمان آهسته می‌شود.
- در شکل سخت شده شاتکریت، وقتی که تحت فشار باشد به‌صورت یک ماده پلاستیکی غیرخطی عمل می‌کند.
- درکشش، بتن ابتدا یک ماده الاستیسیته خطی است که پس از آن به‌صورت ترد می‌شکند.
- برای غلبه بر شکست ترد، معمولاً میل‌گردهای (تقویت‌های) کششی اضافه می‌شود.
- شاتکریت افت حجمی نشان می‌دهد.
- رفتار خزش شاتکریت می‌تواند مشخص شود و با گذشت زمان تغییر می‌کند.



شکل ۲-۴ منحنی تنش - کرنش شاتکریت [۹].

۴-۲-۳-۲ مقاومت در برابر کشش

در صورتی که بتن تحت کشش قرار گیرد، ترک خوردگی رفتار بتن را بیشتر تعیین می کند نسبت به حالتی که تحت فشار بوده است. به میزان ۶۰٪ یا بیشتر ماکزیمم تنش کششی تک محوری، ریز ترک های جدید به وجود می آید بنابراین رفتار بتن به صورت الاستیسیته خطی است. به میزان ۷۵٪ ماکزیمم تنش کششی تک محوری، گسترش ترک ناپایدار شروع می شود و ترک های اندکی به سرعت رشد می کنند تا اینکه بتن دچار شکست شود. از آنجا که مقاومت کششی بتن خیلی پایین تر از مقاومت فشاری است در بسیاری از موارد، شکست کششی (ترک خوردن) رخ می دهد درحالی که تنش های فشاری به خوبی زیرسطح شکست هستند. معمولاً مقاومت کششی بتن را در طراحی نادیده می گیرند زیرا کوچک است (حدود یک دهم مقاومت فشاری) و به خاطر طبیعت شکننده بودن شکست، یک مرتبه به ماکزیمم مقدار خود می رسد. مقاومت کششی شاتکریت غیر مسلح F_{tu} به ندرت مورد آزمایش قرار می گیرد. در صورت عدم وجود داده های دیگر، مقاومت کششی را می توان به کمک معادله ۱-۲ از مقاومت فشاری F_{cu} برآورد کرد:

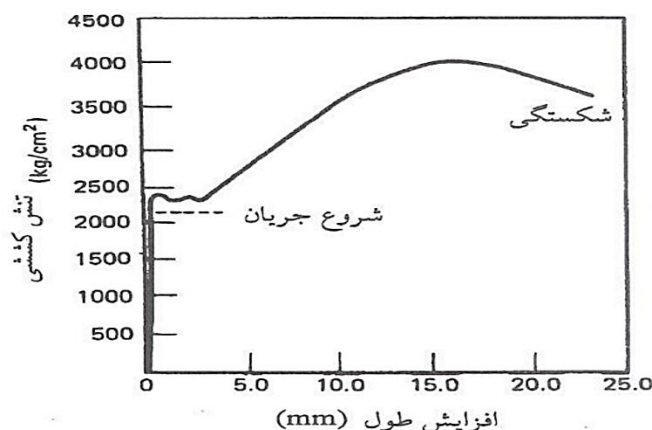
$$F_{tu} = 0.3F_{cu}^{0.67} \quad (۲-۱)$$

برای خنثی کردن این اثر، آرماتور کششی به بتن اضافه می شود. تقویت در پوشش شاتکریت تونل ها معمولاً توسط شبکه فولادی، الیاف فولادی و یا قاب مشبک انجام می شود. وقتی که بتن مسلح تحت یک تنش کششی قرار گیرد، ترک خوردگی مانند قبل در بتن رخ می دهد. با این حال پیوند بین بتن ترک نخورده و میلگرد فولادی اجازه یک انتقال تدریجی بار کششی از بتن در حال ترک خوردن به فولاد، مطابق با افزایش بار کششی می دهد. بتن مسلح به عنوان سازه مرکب عمل می کند. از این رو یک واکنش سخت تری به بارگذاری می دهد نسبت به بتن یا آرماتوری که به تنهایی استفاده می شود. به این پدیده سخت شدن کشش می گویند [۱۰].

۲-۳-۳ قاب فولادی

پوشش‌های فلزی کاربرد وسیعی در سیستم‌های نگهداری تونل‌های مختلف دارند و آن‌ها را می‌توان در شرایط مختلف به کار گرفت. سیستم‌های نگهداری فولادی به صورت مقاطع I یا U نیز کاربردهای مختلفی به عنوان سیستم‌های نگهداری موقت تونل‌های حفر شده در سنگ‌های ضعیف دارند. مقاومت قطعات فولادی چه در شرایط کشش و چه تحت فشار، عالی است؛ بنابراین می‌توانند لنگرهای خمشی زیادی را تحمل کنند و نیز دارای مشخصه مطلوب پس از تسلیم هستند. چنین سیستم نگهداری، مقاومت خوبی را در برابر جابه‌جایی‌های ماورای شرایط تسلیم، به ویژه در شرایط تغییر شکل شعاعی زیاد از خود نشان می‌دهد. در نتیجه این سیستم‌های نگهداری برای شرایطی از زمین مناسب‌اند که در نتیجه تأثیر تنش‌های القایی ناشی از شکستگی سنگ، تمایل به همگرایی عمده دارند. نگهدارنده‌های فولادی برای هر نوع شکل فضایی زیرزمینی به هر دو صورت حلقه باز و بسته قابل استفاده‌اند، زیرا مقاومت فشاری و کششی آن‌ها بالا است و می‌توان آن‌ها را به هر شکل دلخواه درآورد. معمول در تونل‌های دایره‌ای، قوسی، نعل اسبی و مستطیلی از این سیستم نگهداری استفاده می‌شود [۱۱] و [۱۲].

منحنی تنش - کرنش مقطع فولادی با مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگا پاسکال در شکل ۲-۵ آمده است.



شکل ۲-۵ نمونه‌ی منحنی تنش کرنش فولاد [۱۱].

۲-۳-۴ قاب مشبک^۳

کاربرد قاب‌های مشبک برمی‌گردد به دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی که اولین بار مورد استفاده قرار گرفت و به مرور جایگزین مقطع‌های فولادی سنگین وزن و پرهزینه شد.

روش کاربرد آن به این صورت است که لتیس گیردرها با توجه به نوع زمین و نیاز مهندسی محاسب، در فواصل مختلف از ۰.۵ متر تا ۲ متر قرار می‌گیرند. در بین این فاصله‌ها، شبکه‌بندی مش گذاشته می‌شود و پشت و جلوی لتیس‌ها با مش درگیر می‌شوند. بعد از این مرحله، شاتکریت پاششی به صورت خشک یا تر به این شبکه پاشیده می‌شود و بعد از گیرایی آن، این سازه‌ی موقت به صورت یکپارچه درمی‌آید.

بتن یا ملاتی که توسط هوای فشرده بر روی دیواره پاشیده می‌شود را شاتکریت^۴ یا گونیت^۵ می‌نامند. ضخامت معمول شاتکریت به صورت تنها بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد که در صورت به کار بردن آن با لتیس، این ضخامت تا ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متر هم می‌رسد. به دنبال پیشرفت‌های صورت گرفته در فن‌آوری تجهیزات مربوط به دستگاه‌های بتن پاش امروزه این سیستم برای پوشش سطوح سنگ‌ها و حفاظت آن‌ها در برابر هوازدگی و

^۳ Lattice Girder

^۴ Shotcrete

^۵ gunite

گاه نیز به عنوان سیستم نگهدارنده موقتی به کار می رود. از دیگر محاسن این روش ایجاد سطوح هموار و صاف در حفاریات زیرزمینی است. از دیگر ویژگی های شاتکریت حذف قالب و ویبره زدن می باشد. شاتکریت همراه لتیس گیر در یکی از متداول ترین سیستم های نگهداری در تونل می باشد.

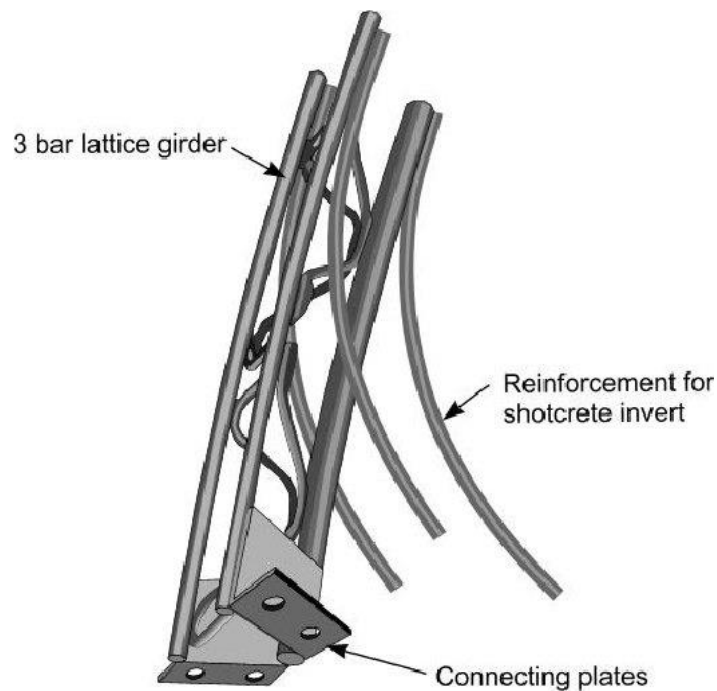
در این حالت میل گردها به همراه شاتکریت تشکیل مقطع بتن آرمه را خواهند داد. قاب مشبک در شرایط کشش و فشار دارای مقاومت بالایی است؛ بنابراین می تواند گشتاور خمشی بالایی را تحمل کند ولی وزن کمتری نسبت به قاب های فولادی دارد. به همین دلیل برای سنگ های ضعیف که تغییر شکل شعاعی بالا از خود نشان می دهند، به خصوص در سیستم نگهداری اولیه مناسب است.

قاب مشبک معمولاً اولین عضو سازه ای در حفاری تونل است که یا بلافاصله بعد از تمام شدن یک گام حفاری و یا بعد از به کار گرفتن یک لایه شاتکریت برای حفاظت از پروفیل ناپایدار، نصب می شود. قاب های مشبک را می توان به وسیله میل گردهای جانبی به یکدیگر محکم کرد.

قاب های مشبک شرایط زیر را در فرایند ساخت تونل فراهم می آورند:

- نگهداری موقت از زمانی که نصب می شود تا هنگامی که شاتکریت مقاومت کافی برای نگهداری خود به دست بیاورد.
- راهنمایی دقیق برای ضخامت شاتکریت.
- نگهداری موقت اضطراری یا نگهداری برای زمین ناپایدار.
- پایه ای ثابت برای انواع روش های پیش نگهداری.
- گیرداری صلب و نگهداری تقویتی فولاد برای قوس درونی و بیرونی پوسته ی پوشش شاتکریت.

- نگهداری موقت اضطراری یا نگهداری برای زمین ناپایدار.
- راهنمای قالب یا الگویی دقیق برای مقطع حفاری تونل.
- گیرداری صلب و نگهداری تقویتی فولاد برای قوس درونی و بیرونی پوسته‌ی پوشش شاتکریت.
- پایه‌ای ثابت برای انواع روش‌های پیش نگهداری.
- نگهداری موقت از زمانی که نصب می‌شود تا هنگامی که شاتکریت مقاومت کافی برای نگهداری خود به دست بیاورد.
- راهنمایی دقیق برای ضخامت شاتکریت.
- اتصالات محکم و دقیق برای ایستگاه‌های رفتارسنجی همگرایی تونل.



شکل ۸-۲ شمای کلی لتیس گیردر.

۲-۳-۴-۲ مراحل نصب قاب مشبک

در شکل ۲-۸ و ۲-۹، جزئیات لتیس گیردر و اجرای آن در تونل، آمده است. مراحل نصب قاب مشبک، به شرح زیر است:

- ۱- صاف کردن و آماده‌سازی سطح تونل و ایمن‌سازی سینه کار تونل.
- ۲- مش بندی و اجرای شاتکریت اولیه.
- ۳- نصب قاب مشبک‌ها به‌عنوان عضو سازه‌ای.
- ۴- مش بندی و اجرای شاتکریت ثانویه.
- ۵- حفاری دوباره تونل.
- ۶- تکرار مراحل ۱ تا ۴ و وصل کردن قاب‌های مشبک با میله‌های جانبی.



شکل ۲-۹ شمای کلی لتیس گیردر و شاتکریت اجرا شده.

۴-۲ ضرورت استفاده از قاب مشبک در انواع سنگ

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I – Very good rock RMR: 81-100	Full face, 3 m advance	Generally no support required except spot bolting		
II – Good rock RMR: 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required	None
III – Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh in crown	50-100 mm in crown and 30 mm in sides	None
IV – Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required
V – Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

شکل ۲-۱۰ طبقه‌بندی RMR سنگ [۱۵].

باتوجه به مشخصات سنگ و بررسی قرار گرفتن در طبقه‌بندی RMR از کلاس بسیار عالی تا بسیار ضعیف، میزان لزوم سنگ به استفاده از سازه‌های نگهدارنده و پشتیبانی را مورد بررسی قرار داد. همان‌طور که در شکل ۲-۱۰ مشاهده می‌شود، در صورتی که سنگ در رده‌ی مقاومت بسیار عالی باشد، هیچ نیازی به استفاده از سازه‌ی نگهدارنده نیست، و اصطلاحاً به آن سنگ، خود نگهدار گویند. در صورتی که رده‌بندی سنگ، خوب و یا معمولی باشد، لازم است حداقل ۵ سانتی‌متر یا ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت به همراه راک بولت اجرا شود. اما در صورتی که رده‌بندی سنگ ضعیف و یا خیلی ضعیف باشد، علاوه بر شاتکریت و راک بولت، حتماً باید قوس فولادی یا لتیس گیردر نیز در آن اجرا گردد.

۲-۵ ویژگی‌های انفجار

انفجار پدیده‌ای است که در اثر آزادسازی ناگهانی مقدار زیادی انرژی به وجود می‌آید. منشأ واقعی این انرژی می‌تواند باروت، بخار متراکم شده در بویلر یا تحولات کنترل نشده اتمی باشد، اما به هر حال رهاسازی انرژی باید ناگهانی باشد و یک محیط پرانرژی در اطراف مبدأ ایجاد آن به وجود آید. این انرژی متمرکز شده به سرعت از راههای مختلف مانند موج انفجاری، پرتاب ترکش‌ها، تشعشع حرارتی یا یونیزاسیون پخش می‌گردد. قدرت یک انفجار بر اساس مقدار انرژی که آزاد می‌گردد بیان می‌شود بنابراین می‌توان آن را به طور مستقیم با واحدهای انرژی مانند ژول بیان کرد. برای مقایسه قدرت انفجاری مواد منفجره باید مبنایی در نظر گرفت و استانداردهایی بنا نمود. یکی از مبناهای اساسی، انرژی آزادشده در انفجار ماده منفجره TNT است. دلیل انتخاب این ماده درصد خلوص، راحتی در اندازه‌گیری و دردسترس بودن آن است. همچنین TNT از لحاظ کاربرد ایمن می‌باشد. علاوه بر این، نظم کریستالی قابل مشاهده در ریزساختار این ماده منفجره، به وقوع پدیده انفجاری کامل به همراه تمام ویژگی‌های مربوطه منجر می‌گردد. لازم به ذکر است که، از انفجار یک گرم TNT ، ۴۶۱۰ ژول یا ۱۱۰۰ کالری انرژی ایجاد می‌گردد [۱۶].

۲-۵-۱ انواع انفجار

انواع انفجارهایی که در محیط باز و غیر مسدود رخ می‌دهند بر سه دسته‌اند: هوایی، سطحی و زیرزمینی

- انفجار هوایی

انفجارهایی است که در ارتفاعی بالاتر از سطح هدف رخ می‌دهند. در این‌گونه انفجارها از سیستم‌های فیوز زمانی استفاده می‌شود تا قبل از اصابت به هدف و در ارتفاع سینی بر فراز آن، انفجار اجرا شود

- انفجار سطحی

اصولاً انفجارهایی که بر روی زمین یا خیلی نزدیک به آن رخ می‌دهند، از نوع سطحی محسوب می‌شوند. در انفجار سطحی بر اثر بازتابش و تقویت موج اولیه به وسیله سطح زمین، موج بازتابشی تولید می‌شود که در همان نقطه انفجار با موج تابشی ترکیب شده و موج واحد به وجود می‌آید که به شکل نیمه کروی است. ذکر این نکته ضروری است که متداول‌ترین روش حملات هوایی به مناطق و اهداف وسیع، بمباران‌های سطحی است.

- انفجار زیرسطحی

مشمول بر انفجارهایی است که پس از نفوذ یک سیستم انفجاری به درون سطح زمین رخ می‌دهد. همچنین پیشروی سینه‌ی کار تونل جزء این دسته از انفجار حساب می‌شود. در این گروه از انفجارها که می‌تواند علیه اهداف مهم نظامی باشد و یا برای پیشروی در محیط‌های سنگی اجرا شود، عامل انفجاری برخوردار از فیوز تأخیری است تا فرصت لازم برای نفوذ درون هدف و یا مدیریت بهینه‌ی انفجار فراهم گردد [18], [17].

۲-۵-۲ مکانیسم انفجار

تبدیل سریع مواد منفجره جامد به گاز، انفجار نامیده می‌شود. زمانی که ماده منفجره در هوا منفجر می‌شود، پوشش آن قطعه‌قطعه شده، هوای اطراف را فشرده می‌سازد که این امر باعث تولید حرارت و شعله می‌گردد. بعد از این مرحله، در اثر ازهم‌پاشیدن ماده منفجره، مواد گازی از آن خارج و شروع به انبساط می‌نمایند. سرعت اولیه گازهای منبسط شده از ۶۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ فوت بر ثانیه متغیر است. البته این گازها بعد از طی مسافتی در حدود ۴۰ تا ۵۰ برابر قطر سلاح منفجره به سرعت سرد شده و سرعت خود را از دست می‌دهند. متغیر بودن فشار این گازها و حرکتشان در محیط اطراف، باعث به وجود آمدن موج انفجار می‌گردد. شکل ۲-۱۱، یک نمونه انفجار در سینه‌ی کار تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱ انفجار در سینه‌ی کار تونل.

براین اساس، مواد منفجره با توجه به نوع و چگونگی ترکیب مواد تشکیل‌دهنده، دارای خصوصیات انفجاری مختلفی هستند.

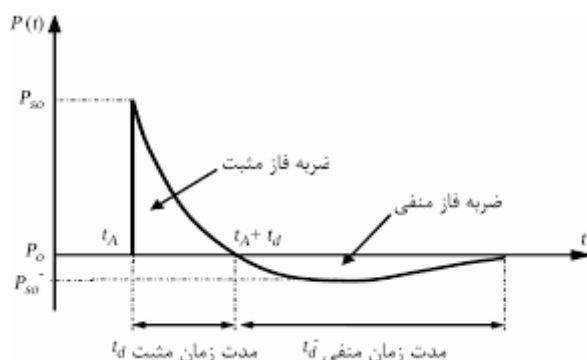
این خصوصیات، عبارت‌اند از:

الف) انرژی آزاد شده: انرژی آزاد شده از انفجار بر اساس واحد انرژی آزاد شده از خرج معادل TNT سنجیده می‌شود.

ب) سرعت انفجار: سرعت انفجار برای مواد منفجره نظامی بین ۱۵۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰ فوت بر ثانیه است. سرعت انفجاری TNT در حدود ۲۹۰۰۰ فوت بر ثانیه است.

همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است، موج انفجار در اثر افزایش سریع فشار هوا از مقدار فشار اتمسفری خود به فشار ماکزیمم فشار اوج ایجاد می‌شود که به دنبال آن یک کاهش سریع در فشار اتمسفری و سپس افزایش تدریجی در آن حاصل می‌گردد؛ بنابراین موج انفجار دارای دو فاز می‌باشد. ازدیاد سریع فشار که یک کاهش اتمسفری به دنبال دارد، فاز مثبت یا فاز فشاری نام دارد و کاهش فشار به حد اتمسفری که یک بازگشت به حالت اتمسفری به دنبال دارد، فاز منفی و با فاز مکنده نامیده می‌شود. مساحتی که زیر فاز مثبت منحنی فشار - زمان قرار دارد به نام ضربان (تکانه) مثبت انفجار و محدوده باقی مانده به نام ضربان (تکانه) منفی شناخته شده است. افزایش سریع فشار هوا باعث به وجود آمدن فضایی در اطراف بمب انفجاری خواهد

شد که در جلوی این محیط، هوا دست نخورده باقی می ماند ولی در پشت سر آن هوا تحت فشار شدیدی قرار خواهد گرفت که این منطقه شوک جلویی انفجار نامیده می شود. چون انفجار باعث گرم و منبسط شدن هوای اطراف می شود، در نتیجه این امر در هوا و مایعات قابل فشار، موجب به وجود آمدن موج انفجار خواهد شد. خصوصیات فیزیکی موج انفجار را می توان به صورت های فشار اوج و ضربان در فواصل مختلف بیان نمود. فشار اوج در طول فاز اولیه به مقدار حداکثر خود خواهد رسید.



شکل ۲-۱۲ نمودار شماتیک موج انفجار.

۳-۵-۲ روش انفجار در حفر تونل

امروزه به واسطه خرج گذاری مکانیکی و مقدار دقیق خرج که داخل لوله های پلاستیکی قرار می گیرد می توان انفجار با دقت بالا انجام داد، در این روش رعایت دو مسئله حائز اهمیت است:

- باید توجه داشت که حفاری به اندازه ی نیاز باشد چون هزینه خارج کردن سنگ زیاد است و بعداً باید محل برداشت اضافی را با سیمان پر کرد.
- باید دقت کرد که توده سنگ حین انفجار آسیب نبیند چون سبب وارد شدن بار اضافی به پوشش تونل می شود، البته ریزش و آسیب دیدن سنگ های مجاور تا حدی به بافت سنگ ها نیز ارتباط دارد.

بهینه سازی الگوی انفجار در تونل ها، باعث کاهش مصارف خرج، چال و چاشنی شده و بدین ترتیب با کم شدن صدمات زیست محیطی، راندمان پیشروی نیز افزایش می یابد. سرعت پیشروی در این روش اگر

مدیریت خوبی صورت پذیرد تا ۷۰ متر در هفته تخمین زده می‌شود. در شکل ۲-۱۳، یک نمونه از انفجار سینه‌ی کار تونل نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳ انفجار حفاری در سینه‌ی کار تونل.

۲-۶ مقاومت دینامیکی

۲-۶-۱ مصالح و معیارهای پاسخ

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر اثرات انفجار مستلزم داشتن شناخت از ویژگی‌های دینامیکی مصالح سازه‌ای و همچنین پاسخ‌های المان‌های سازه‌ای در برابر انفجار است. مصالح و سیستم‌های سازه‌ای، پاسخ‌های متفاوتی را به بارهای دینامیکی نسبت به بارهای استاتیکی معمولی نشان می‌دهد و ضروری است که میان این دو حالت تفاوت قائل شویم. تحت بارگذاری دینامیکی، مصالح به افزایش مقاومتی می‌رسند که به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت سازه‌ای را بالا می‌برند. به عنوان مثال، سازه‌های در معرض بارهای انفجاری مجاز هستند تا به محدوده تغییر شکل‌های پلاستیکی (دائمی) برای جذب انرژی انفجاری وارد شوند، در حالی که در حالت پاسخ به بارهای معمول متعارف لازم است تا در محدوده الاستیک باقی بمانند.

۲-۶-۲ پاسخ استاتیکی و پاسخ دینامیکی

بارهای معمولی، مانند نیروی باد و بارهای زنده، به صورت نسبتاً آرامی به سازه اعمال می‌شوند و برای دوره‌های زمانی طولانی نسبت به زمان پاسخ سازه، ثابت باقی می‌مانند. سازه‌های تحت بار انفجاری، با اعمال بسیار سریع بار و همین‌طور افزایش بسیار سریع تنش اعضا مواجه‌اند. این بار گذرا است و معمولاً به شرایط محیط در دوره زمانی کوتاهی (مثلاً چند میلی‌ثانیه) برمی‌گردد.

در طراحی‌های انجام شده مطابق با تحقیقات گذشته، تنش‌ها در محدوده الاستیک قرار داشتند. درحالی‌که در طراحی انفجاری تسلیم شدن اعضا قابل قبول بوده و در حقیقت برای مقاصد اقتصادی نیز مطلوب است. وقتی تنش عضو وارد محدوده پلاستیک می‌شود، جذب انرژی انفجار در مقابل انرژی کرنشی عضو ادامه می‌یابد. مقدار انرژی کرنشی کل موجود، تابعی از خواص دینامیکی مصالح، ویژگی‌های مقاطع و مقدار تغییر شکل‌های پلاستیکی مجاز است. مقدار کل انرژی انفجار که لازم است جذب شود، تابعی از حداکثر بار انفجاری و مدت زمان تداوم انفجار است. در طراحی انفجاری، ضابطه کفایت یک عضو بر پایه تغییر شکل بیشینه، دقیق‌تر و کارآمدتر از ضابطه سطح تنش است و پاسخ مصالح تحت بارگذاری دینامیکی به طور کامل متفاوت از پاسخ مصالح تحت بارگذاری استاتیکی است. وقتی مصالح به سرعت بارگذاری می‌شوند، نمی‌توانند با همان سرعت تغییر شکل دهند. این خاصیت باعث افزایش مقدار تنش تسلیم و نیز تنش نهایی مصالح پیش از گسیختگی می‌شود. به‌طور کلی هرچه کرنش در مواد سریع‌تر تغییر کند، باعث مقاومت بیشتری در ماده می‌شود. این افزایش مقاومت موجب می‌شود، مقاومت عضو به بیش از مقاومت حالت استاتیکی سازه افزایش یابد. این افزایش می‌تواند در حد ۱۰ تا ۳۰ درصد باشد؛ بنابراین نادیده گرفتن این تأثیرات، در مورد برآورد استحکام خمشی بسیار حائز اهمیت است. این تأثیرات در طراحی انفجاری با اعمال ضرایب افزایش دینامیکی یا DIF و ضرایب افزایش مقاومت SIF لحاظ می‌شوند.

۲-۶-۳ محدودیت‌های تغییر شکل

محدودیت‌های تغییر شکل برای اطمینان از پاسخ مناسب در برابر بارهای انفجاری اعمال می‌شوند. این محدودیت‌ها بر پایه نوع سازه با قطعه، مصالح ساختمانی مورد استفاده، موقعیت سازه و سطح حفاظت مورد نظر تعیین می‌شوند.

در طراحی معمول سازه‌ها معمولاً، تنش‌های ایجاد شده در اعضا با حداکثر تنش مجاز مقایسه می‌شود. همچنین تغییر شکل نیز بیشتر برای ملاحظات بهره‌برداری با معماری کنترل می‌شود تا الزامات سازه‌ای، ولی در طراحی اقتصادی، اعضای در معرض بار انفجاری، تحت تنش تسلیم با بیش از آن فرض می‌شوند. به‌طور کلی، هر چه سازه تغییر شکل بیشتری دهد با عضو بتواند بدون شکست تغییر شکل یابد، انرژی انفجاری بیشتری می‌تواند جذب کند. در صورتی که تنش عضو از محدوده تسلیم تجاوز کند، سطح تنش دیگر برای ارزیابی پاسخ عضو مناسب نیست.

ظرفیت یک عضو برای تغییر شکل چشم‌گیر و جذب انرژی، بستگی به توانایی اتصالات آن برای حفظ مقاومت در طی پاسخ دارد. اگر اتصالات در پاسخ‌های بزرگ ناپایدار باشند، ممکن است شکست فاجعه‌آمیز رخ دهد؛ بنابراین، مقاومت اتصالات با افزایش تغییر شکل دچار افت خواهد شد. اغلب، مقاومت اتصالات تعیین کننده‌ی ظرفیت انفجاری سازه‌ها برای بار معمول است.

۲-۷ تاریخچه کارهای انجام شده

تحقیق بر روی تأثیر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی مانند تونل‌ها، ایستگاه‌های زیرزمینی و ... از موارد مورد علاقه‌ی پژوهشگران و مهندسان بوده است. نگرانی از انتشار موج انفجار و تأثیر آن بر روی توده‌های سنگ و همچنین تغییرات ایجاد شده در زمین و سازه‌های مدفون در آن، همواره مورد توجه بوده است.

ژائو و همکاران سال ۱۹۹۹ در پروژه‌ی انبار مهمات سنگاپور، به بررسی خواص دینامیکی مواد سنگی، انتشار امواج شوک در توده‌ی سنگ و پاسخ دینامیکی توده‌ی سنگ و سازه‌ها با استفاده از روش عنصر گسسته و... توسط نرم‌افزار UDEC پرداختند. مطالعات انجام شده شامل آزمایش ضربه آزمایشگاهی روی نمونه‌های سنگ دست نخورده و شکستگی‌های مصنوعی و طبیعی، آزمایش انفجار صحرایی، مدل‌سازی نظری و مدل‌سازی عددی است. نتایج مطالعات انجام شده نشان داد که اثر زمان و اثر موج تنش دو عامل مهم تأثیرگذار بر مشکلات دینامیک سنگ هستند. از نتایج به‌دست‌آمده در طراحی و ساخت پروژه استفاده شد. [۱۹].

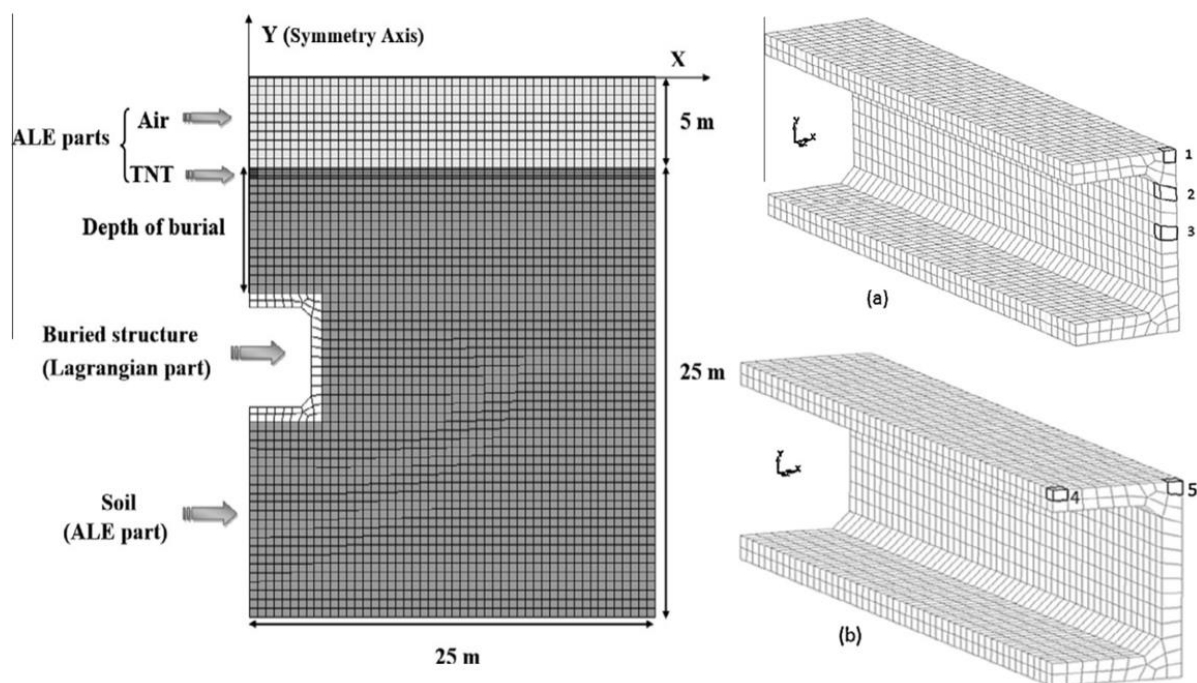
مطالعات عددی گسترده‌ای در مورد انفجارهای در محل انجام شده است. برخی فرمول‌های تجربی برای پیش‌بینی شوک‌های زمین چه در انفجارهای کوپل شده و چه در انفجار غیرکوپل انجام شده است. در مقایسه با مطالعات نظری و تجربی، مدل‌سازی عددی روشی مناسب، اقتصادی و نسبتاً دقیق برای مطالعه انفجارهای زیرزمینی فراهم می‌کند، به‌ویژه برای مواردی پیچیده که در آن آزمایش‌ها دشوار و پرهزینه هستند. به طور مثال یک انفجار بزرگ مقیاس در تونلی زیرزمینی که با سنگ‌های درزه‌دار احاطه شده است.

مقاله‌ی وو و همکاران در سال ۲۰۰۴ یک مدل عددی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی توده سنگ در معرض انفجار زیرسطحی بزرگ ارائه می‌دهد. از مدل عددی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی توده سنگ از لحاظ سرعت پیک ذره (PPV) و شتاب بیشینه ذرات (PPA)، ناحیه آسیب، تاریخچه زمانی سرعت ذرات و محتوای فرکانسی آن‌ها برای تست انفجار زیرزمینی استفاده شده است. نتایج محاسبه‌شده تطابق خوبی را با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد [۲۰].

لو و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی پاسخ دینامیکی سازه‌ی تونل تحت بار انفجار سطحی در تونل نانچینگ چین پرداختند. تاریخچه زمانی جابه‌جایی، سرعت و فشار برخی از نقاط اصلی تونل مترو در بخش‌های مختلف تحت شرایط مختلف و ارزیابی ایمنی سازه‌های مترو در زیر انفجارهای سطحی به مورد بررسی قرار گرفت. نتایج

عددی نشان می‌دهد که قسمت بالای تونل و همچنین مرکز آن در پایین تونل زیرزمینی بخش آسیب‌دیده هستند و تونل مترو وقتی که ۱۰۰ کیلوگرم تی ان تی در ارتفاع ۱.۵ متر منفجر می‌شود، ایمن است [۲۱].

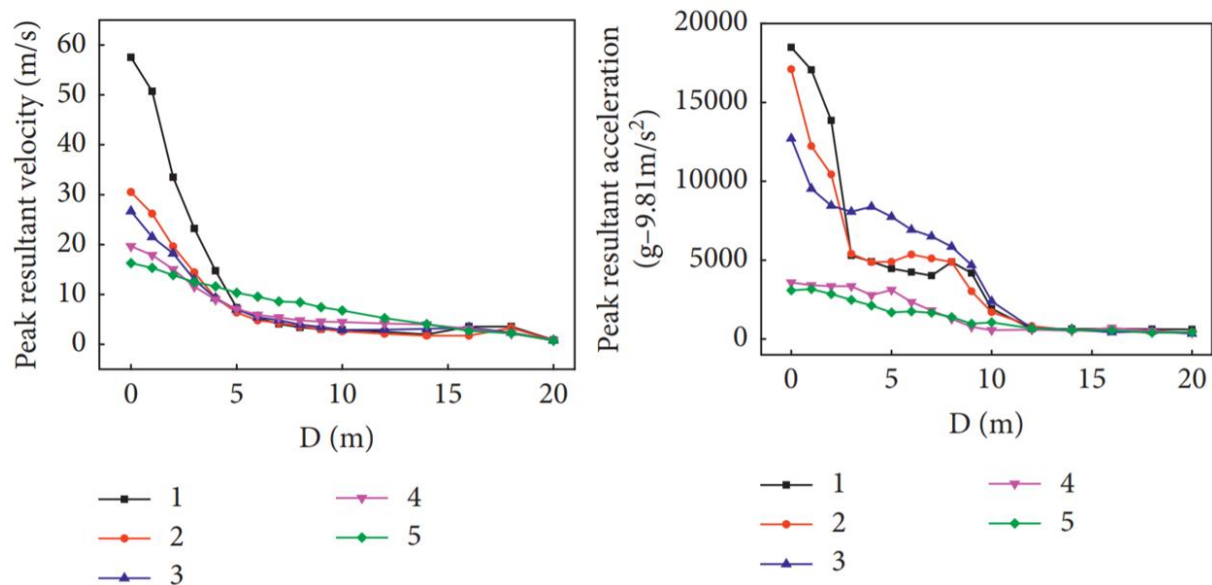
در میان تحقیقات انجام‌شده، مبارکی و همکاران با نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA به بررسی پاسخ دینامیکی تونل مترو مربع شکل کوبه (در یک خاک ماسه‌ای) در اعماق ۳.۵، ۷، ۱۰.۵ و ۱۴ متر که تحت تأثیر انفجار سطحی از ۱۰۰۰ کیلوگرم تی ان تی قرار گرفته است، پرداخته‌اند. به‌منظور تضمین صحت تجزیه و تحلیل، نتایج عددی با فرمول‌های تحلیلی گروه مهندسی ارتش ایالات متحده (TM-۸۵۵) مقایسه شده است. با توجه به معیار ماکزیمم سرعت ایجاد شده در المان‌های سازه‌ی تونل، میزان تخریب در نقاط مختلف تونل و در اعماق مختلف از سطح زمین، مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲]. مشخصات مدل‌سازی عددی و نقاط موردنظر جهت ارزیابی، در شکل ۲-۱۴ آورده شده است.



شکل ۲-۱۴ محیط مدل‌سازی و نقاط موردنظر جهت بررسی [۲۲].

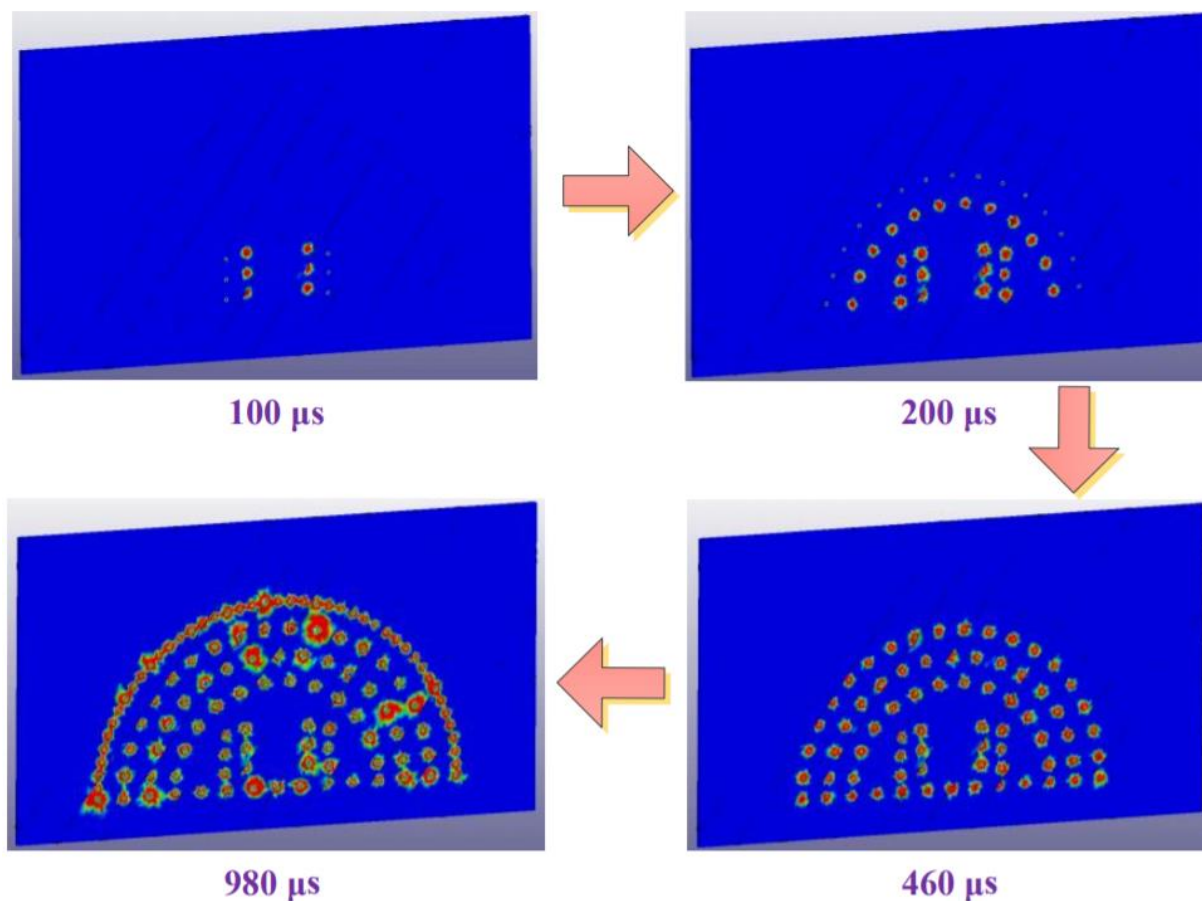
نان جیانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی انفجار ناشی از آتشباری تونل و تأثیر آن بر لوله‌ی گاز مدفون در خاک که با فاصله از محل انفجار مدفون شده است پرداخته‌اند. برای اطمینان از ایمنی خط لوله گاز هنگام حفر انفجار تونل، بررسی واکنش دینامیکی خط لوله گاز به لرزش انفجار در زیر حفر تونل بسیار مهم است. اثرات ارتعاش انفجار تونل مترو بر روی خط لوله گاز در شرایط مختلف انفجار تونل محاسبه شد و ویژگی‌های پاسخ دینامیکی خاک، لوله و خاک اطراف لوله مورد بحث قرار گرفت. سرانجام، برای ارزیابی و پیش‌بینی بهتر و راحت‌تر تأثیر لرزش انفجار، یک مدل پیش‌بینی سرعت ذره‌ای حداکثر (PPV) از خط لوله گاز در زیر انفجار حفاری تونل مترو برای این پروژه پیشنهاد شد [۲۳].

لی و همکاران نیز، به بررسی انفجار داخلی تونل چنگدو چین پرداخته‌اند. در این مقاله یک انفجار گاز شدید معادل وزن ۲۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مدل‌سازی شده و مکانیزم تخریب سازه و میزان گسترش آسیب در سازه مورد بررسی قرار گرفته شده است. تنش مؤثر و پاسخ‌های دینامیکی پوشش تحت بارگذاری ضربه انفجار تجزیه و تحلیل شده است. نتایج به دست آمده تأثیر انفجار ابتدا بر روی طاق قوسی و کف وارد شد و سپس در امتداد جهت شعاعی و طولی انتشار یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان شتاب و سرعت ایجاد شده در المان‌های تونل، در تاج آن است و کمترین مقدار آن در دیواره‌ی کناری تونل می‌باشد [۲۴]. میزان سرعت و شتاب ایجاد شده در المان‌های ۱ تا ۵ مورد نظر در مدل‌سازی لی و همکاران، در شکل ۱۵-۲ آورده شده است.



شکل ۲-۱۵ میزان ماکزیمم سرعت و شتاب ایجاد شده در نقاط مختلف تونل [۲۴].

در سال ۲۰۱۸، وانگ و همکاران به مدل‌سازی الگوی آتشباری در تونل سنگی ژینگائوجین چین پرداخته‌اند. کانتورهای خسارت از طریق مدل‌سازی به دست آورده شده است. حداکثر سرعت ذرات (PPV) برای تخمین دامنه آسیب و درجه آسیب برای توده سنگ اطراف تونل بر اساس معیارهای آسیب PPV استخراج شده است [۲۵]. الگوی آتشباری استفاده شده و انفجار چال‌های انفجاری در زمان‌های مختلف در شکل ۲-۱۶ آمده است.



شکل ۲-۱۶ الگوی آتشباری استفاده شده جهت مدل سازی در سنگ گرانیت.

همچنین پایان نامه هایی در زمینه بررسی بارهای انفجاری بر روی سازه های مختلف زیرزمینی انجام شده است. حمیدرضا بی طرفان در پایان نامه ی خود، به بررسی پارامترهای بارگذاری و شبیه سازی اثر پاسخ انفجار بر روی سازه زیرزمینی احاطه شده در محیط خاکی اشباع پرداخته است. به منظور کاهش اثر انفجار، مدل سازی ژئوفوم در میان سازه و ماده منفجره انجام شده است. تحقیقات در این پایان نامه به دنبال مشخص کردن تأثیر فاصله بر روی استهلاک انرژی انفجار، تنش و شتاب و استفاده از ژئوفوم در لایه های خاکی به منظور استهلاک اثرات

ناشی از انفجار شامل جابجایی، تنش و فشار می باشد. از نتایج تحلیل، دستاوردهای از جمله تعیین فاصله ایمن با استفاده از ژئوفوم و تعیین ماده منفجره برای آستانه تخریب با توجه به عملکرد سازه می توان ذکر کرد [۱۸].

محمدرضا ترکمانه، پاسخ تونل دایروی کم عمق تحت انفجار داخلی را مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق به بررسی تونل ماتروی شهری شانگهای پرداخته شده و تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار تونل تحت این نوع بارگذاری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. نتایج نشان می دهند که با افزایش تراکم پذیری خاک، تغییر شکل تونل کاهش یافته و سختی خاک تأثیر بسزایی در پاسخ تونل در برابر این نوع بارگذاری داشته ولی پاسخ تونل به طور ناچیزی متأثر از اندرکنش بین خاک و تونل می باشد. همچنین با افزایش مقدار خرج انفجار تونل، تغییر شکل مانای بیشتر در تونل ایجاد شده است [۲۶].

۳. فصل سوم - ارائه مفاهیم و مدل سازی عددی

۳-۱ مقدمه

در روش‌های عددی المان محدود، معادلات حاکم بر جسم تحت بارگذاری دینامیکی باید حل شوند. همچنین معادله رفتار ماده، معادله حالت، معیار شکست (در صورت نیاز) و اعمال شرایط اولیه و مرزی باید در نظر گرفته شوند.

در تحلیل هر مساله، جنس، نوع رفتار و پارامترهای مصالح باید به شکل مناسبی انتخاب گردد. برای تعیین عملکرد مواد منفجره در نواحی نزدیک به آن و همچنین در محیط ماده منجره، شبکه المان بندی از نوع ALE انتخاب می‌گردد. در این روش شبکه المان بندی همراه با ماده تغییر شکل خواهد داد.

در روش‌های عددی برای مدل‌سازی بی‌نهایت، برای جلوگیری از بازتاب امواج در مرزها و ایجاد اغتشاش در سیستم، از مدل‌های مرز جاذب استفاده می‌گردد.

در ادامه این فصل به توضیح موارد ذکر شده در بالا و فرآیند مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار پرداخته خواهد شد.

۳-۲ روش‌های عددی در تحلیل مسائل

نرم‌افزارهایی که جهت پیش‌بینی انفجار و پاسخ سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دو دسته کوپل و غیر کوپل تقسیم می‌شوند. در تحلیل کوپل، هم‌زمان با انجام محاسبات هیدرودینامیک مربوط به شبیه‌سازی انفجار، میزان تغییر شکل سازه نیز تخمین زده می‌شود. از جمله هیدروکدهایی که از این روش استفاده می‌کنند می‌توان به نرم‌افزارهای Autodyn و Ls-Dyna اشاره نمود. در روش غیر کوپل دو دسته برنامه وجود دارد. در دسته اول میدان فشار حاصل از انفجار با فرض صلب بودن سازه محاسبه می‌شود و سپس این فشار جهت محاسبه پاسخ سازه به مدل اعمال می‌شود. از نرم‌افزارهایی که از این روش استفاده می‌کنند، Autodesk CFD را می‌توان نام برد. گروه دوم در دسته غیر کوپل با استفاده از روابط تجربی و نیمه‌تجربی، میدان فشار محاسبه

شده را به صورت شرایط مرزی به مدل اعمال می‌کند و Abaqus از نرم‌افزارهایی است که از این روش استفاده می‌کنند.

باتوجه به اینکه اغلب مسائل مکانیکی نرخ بالا، با تغییر شکل‌های بسیار بزرگ همراه هستند، یکی از عوامل بسیار مهم در آماده‌سازی مسائل برای تحلیل، دقت به این عوامل است. در این بخش هدف، بررسی فرمولاسیون دقیق روش‌های عددی نیست، بلکه آشنایی اجمالی و کیفی برای مباحثی که پس از این مطرح می‌شوند، مدنظر است [۲۷].

۳-۲-۱ دیدگاه لاگرانژی

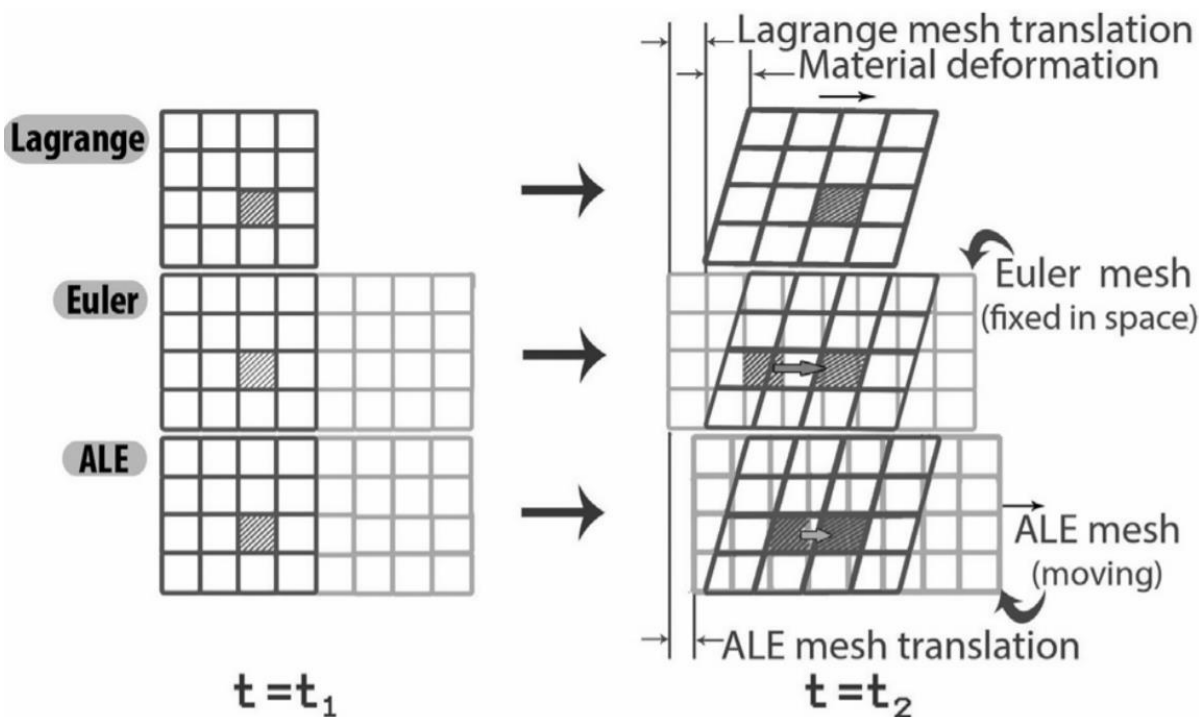
این روش تحلیل مسائل، بر اساس دیدگاه لاگرانژی بنا نهاده شده است. این دیدگاه بر اساس تعقیب مسیر حرکت ذرات ماده می‌باشد. پس انتظار اینکه این روش قدرت بالایی در پیش‌بینی محل مرزهای ماده و همچنین سرعت و جابه‌جایی مواد داشته باشد، دور از منطق نیست. در حقیقت این روش ایده‌آل‌ترین روش برای به‌دست‌آوردن تاریخچه حرکت ماده در طول تحلیل است. برای استفاده از این روش، محیط حل (ماده) به‌صورت یک سری المان تقسیم‌بندی می‌شود. نقاط گره‌ای این المان‌ها به ماده متصل هستند و با تغییر شکل ماده تغییر مکان می‌دهند. به همین دلیل شکل هندسی المان‌ها در هنگام تحلیل دستخوش تغییر خواهد شد.

روش لاگرانژی به دو صورت به‌روز رسانی و ثابت فرمولیته می‌شود. در هر کدام از این روش‌های دستگاه مختصات یا به‌روز می‌شود و یا در یک سیستم جهانی ثابت خواهد بود. در مسائل دینامیکی که اغلب با تغییر فرم‌های بزرگ همراه است، در صورت استفاده از این روش باید دقت نمود؛ زیرا با تغییر شکل بیش از حد المان‌ها، اضلاع المان‌ها همدیگر را قطع می‌نمایند و باعث منفی شدن ژاکوبین ماتریس نگاشت المان‌ها خواهند شد. بر این محدودیت باید تغییر و افزایش نسبت طول به عرض المان را نیز افزود. این عامل باعث بی‌کیفیت شدن المان و پاسخ‌های بدون دقت و دور از واقعیت آن خواهد شد. از این‌رو همیشه در مسائلی که در آن‌ها ماده دچار تغییر فرم‌های بسیار بزرگ می‌شود، باید به طریقی بر این مشکل فائق آمد. به‌عنوان مثال استفاده از المان‌های بیشتر،

یکی از راه‌حل‌های موجود است. البته باید خاطرنشان کرد که استفاده از این روش در مدل‌سازی جامدات بسیار گسترده می‌باشد، زیرا از این دسته از مواد به دلیل ماهیت خود در بارگذاری‌ها، دچار تغییر فرم کمتری خواهند شد.

۳-۲-۲ دیدگاه اوپلری

این دیدگاه در مقابل دیدگاه لاگرانژی است. از دیدگاه اوپلری برای شبیه‌سازی حرکت ماده استفاده می‌شود. در این روش ناظر، ساکن بوده و ماده از کنار آن عبور می‌کند. به عبارتی در این روش، شبکه‌بندی ماده در فضای تحلیل ثابت بوده و این ماده است که در میان شبکه‌بندی اجازه عبور دارد. به همین دلیل این روش محدودیت روش لاگرانژی را نداشته و در تغییر فرم‌های بسیار بزرگ به راحتی عمل می‌کند. این عامل باعث شده است که این روش در شبیه‌سازی حرکت سیالات به‌وفور مورد استفاده قرار گیرد. بیشتر فرمولاسیون دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای این روش نوشته شده است. در این روش معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی ارضا می‌شوند. درجات آزادی خروجی این روش، سرعت، فشار و دما هستند. جابه‌جایی‌ها در این روش بر اساس انتگرال‌گیری از سرعت به دست می‌آیند. این روش به خاطر ماهیت ویژه خود در پیش‌بینی مرزهای ماده دچار ضعف بزرگی است؛ به همین دلیل اغلب برای محاسبه نیروها و فشارهای عمل‌کننده بر روی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از کاربردهای گسترده‌ی این روش، شبیه‌سازی مسائل برهم‌کنش سیال و سازه (FSI) است. شکل ۱-۳ زیر نشانگر تفاوت دیدگاه‌های لاگرانژی و اوپلری می‌باشند.



شکل ۳-۱ تفاوت دیدگاه لاگرانژی و اویلری.

روش اویلری نیز به نوبه خود به دو دسته روش چند ماده و تک ماده تقسیم می‌شود. در روش اول امکان شبیه‌سازی چند ماده در یک شبکه‌بندی وجود داشته درحالی‌که نوع دوم امکان نسبت دادن تنها یک ماده را به شبکه‌بندی مهیا می‌سازد. روش دوم دارای دقت بالاتری است؛ چون برهم‌کنش مواد مختلف در آن وجود نخواهد داشت. به هر ترتیب در شبکه‌بندی اویلری امکان آن که در آن واحد در یک سلول خاص چند ماده وجود داشته باشد، بسیار بالاست. محاسبات سرعت و فشار و ... در این سلول تنها به کمک توابع شکل آن امکان دارد، در نتیجه برای محاسبات نیازمند یک ماده معادل در این سلول است.

۳-۲-۳ روش ALE

در بخش‌های قبل پیرامون ویژگی‌های هر کدام از روش‌های لاگرانژی و اویلری توضیحاتی داده شد. همان‌طور که در شکل ۳-۱ نشان داده شده، برای غلبه بر محدودیت‌های روش فوق، روشی مبتنی بر تلفیق این روش‌ها

به نام ALE بنا نهاده شده است. در این روش که خود مبتنی بر یک فرمولاسیون مکانیک محیط پیوسته منحصربه‌فرد است، هر وقت تغییر فرم المان‌های لاگرانژی از حدی بیشتر شود، با استفاده از روش اویلری ماده درون سلول‌ها جابه‌جا شده و مش بندی جدید لاگرانژی مطابق با محل جدید ماده مورد بررسی ایجاد می‌گردد. بدین ترتیب هم می‌توان از قابلیت منحصربه‌فرد روش اویلری در تغییر فرم‌های بسیار بزرگ بهره برد و هم مرزهای مواد را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. روش ALE به وفور در مدل‌سازی محیط‌های واسط در مسائل FSI مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، در مدل‌سازی آب یا هوا در اطراف ماده منفجره، در یک مسئله انفجار زیر آب، روش ALE در مسائل برخورد نیز کاربرد داشته و در آن امکان بررسی دقیق تغییر شکل نهایی دو قطعه در حال برخورد وجود دارد [۱۸].

۳-۳ معرفی نرم‌افزار LS-DYNA

یکی از حل‌گرهای بسیار قدرتمند برای روش اجزا محدود که در حال حاضر در شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، حل‌گر LS-DYNA است. این نرم‌افزار علاوه بر تحلیل‌های دینامیکی، قادر به حل مسائل گوناگون در حوزه‌های مختلف فیزیکی از جمله مکانیک جامدات، انتقال حرارت، دینامیک سیالات و هم‌چنین حل مستقل یا هم‌زمان با دیگر پدیده‌های فیزیکی می‌باشد. شیوه‌ی اصلی حل مسائل در آن نیز بر پایه‌ی روش صریح است، اگرچه یک روش حل ضمنی نیز با توانایی محدود در ساختارها و انتقال در دسترس می‌باشد.

تفاوت اصلی این هیدروکد با سایر نرم‌افزارهای المان محدود، قابلیت ویژه‌ی آن در شبیه‌سازی مسائلی است که در آن‌ها مواد (حتی جامدات) به دلیل شدت بارهای وارده به‌صورت سیال رفتار می‌کنند و در حال حاضر این نرم‌افزار به‌صورت فعال توسط شرکت آمریکایی LSTC در حال به‌روزرسانی است. بیشتر شهرت آن در زمینه‌ی شبیه‌سازی و تحلیل مسائل غیرخطی و گذرای دینامیکی با استفاده از المان محدود صریح می‌باشد. هیدروکد

LS-DYNA توسط صنایع مختلفی از قبیل صنعت خودرو، هوافضا، نظامی، کشتیرانی و مانند آن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷].

۳-۳-۱ تاریخچه پیدایش نرم‌افزار

منشأ نرم‌افزار LS-DYNA، نرم‌افزار اجزا محدود DYNA3D است که در سال ۱۹۷۶ میلادی عرضه شد. در آن زمان هیچ نرم‌افزاری جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی پدیده‌هایی چون برخورد وجود نداشت و نرم‌افزارهای دویبعدی نیز برای این منظور کافی نبودند. در سال ۱۹۷۸ کد منبع این نرم‌افزار طی درخواستی از طرف دولت فرانسه به‌صورت عمومی و بدون هیچ محدودیتی منتشر گشت. در سال ۱۹۸۸، شرکت LSTC پس از رایزنی، گروهی متشکل از ۶۰ شرکت مصرف‌کننده DYNA3D جهت توسعه‌ی این نرم‌افزار بنیاد نهاد. در نتیجه محصول نهایی با نام LS-DYNA3D که پس از مدتی نام آن به LS-DYNA کوتاه شد تا به امروز توسعه یافته و به‌روزرسانی می‌گردد [۲۷].

۳-۳-۲ توانمندی‌های نرم‌افزار

در نرم‌افزار LS-DYNA عملیات ساخت مدل و همچنین مشاهده‌ی نتایج یا به‌عبارت‌دیگر پیش‌پردازش و پس‌پردازش در برنامه LS-PREPOST صورت می‌گیرد و سپس کد خروجی حاصل به حل‌گر اصلی داده شده و محاسبات انجام می‌شود. لازم به ذکر است که ورودی حل‌گر فایللی است با پسوند K و یا dyn که از یک فایل متنی شامل دستورات یا همان Keyword تشکیل شده است. خط به خط این فایل شامل اطلاعاتی از قبیل شرایط کنترل حل مسئله و دریافت خروجی، نوع بارگذاری و قیدها، مختصات المان‌ها و گره‌ها، نوع الگوریتم برخورد و مانند آن است.

می‌توان گفت تفکیک بخش‌های مختلف جهت حل یک مسئله در محیط‌های مختلف به نوعی مزیت برای این نرم‌افزار تبدیل شده است. این امر موجب شکل‌گیری پیش‌پردازشگرهای مختلفی برای تولید کدهای این نرم‌افزار با امکانات گوناگون گردیده است. از آن جمله می‌توان به FEMB، HYPERMESH و LS-PREPOST اشاره نمود که مورد اخیر خود به‌تنهایی توسط شرکت LSTC منتشر می‌گردد [۲۷].

۳-۳-۳ انواع تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها

انواع تحلیل‌های قابل انجام در نرم‌افزار LS-DYNA عبارت‌اند از:

دینامیک غیرخطی، دینامیک اجسام صلب، شبیه‌سازی شبه استاتیکی، استاتیک خطی، تحلیل‌های حرارتی، تحلیل‌های سیالاتی، قابلیت‌های روش اویلری، روش ترکیبی اویلر لاگرانژی، برهم‌کنش سیال و جامد، کوپلینگ دینامیکی اجسام صلب، شوک در عمق آب، تحلیل شکست، رشد ترک، تحلیل صوتی، بهینه‌سازی طراحی، تحلیل توأم سازه‌ای – حرارتی، هیدرودینامیک ذرات روان [۲۷].

۳-۳-۴ الگوریتم کلی فرآیند شکل‌دهی در LS-DYNA

الگوریتم زیر معمولاً ثابت است و می‌توان با تغییرات جزئی اکثر آنالیزهای شکل‌دهی موجود را شبیه‌سازی نمود:

۱. تعیین نوع و محیط حل

۲. تعیین نوع المان

۳. تعیین نوع مواد و جنس

۴. روش المان بندی مدل

۵. مدل‌سازی اجزای مسئله

۶. تعریف سطوح تماس و برخورد قطعات

۷. تعریف بارهای اعمالی بر قطعه

۸. تعیین مشخصه‌های کنترل زمانی

۹. تعیین دیگر مشخصه‌های کنترلی حل مسئله

۱۰. انجام حل مسئله

۳-۴ مراحل مدل سازی

باتوجه به عرض استاندارد تعریف شده برای تونل‌های راه و راه‌آهن، میزان ۶ متر برای آن در نظر گرفته شده است. حداقل میزان مقطع عرضی تونل مطابق با استاندارد نروژ در شکل ۳-۱ برابر ۵.۵ متر برای تونل نوع A می‌باشد. همچنین باتوجه به جدول ۳-۲، مقطع عرضی تونل راه آهن تک خطه در استرالیا، برابر ۵.۵ است. از طرفی بلندی طاق تونل طبق آیین‌نامه‌های جهانی برابر حداقل ۵ متر گفته شده است. در این مدل سازی ارتفاع تونل برابر ۵ متر در نظر گرفته شده است [۲۸].

جدول ۳-۱ طبقه بندی مقطع عرضی تونل راه.

مقاطع تونل دوطرفه	خطوط عبوری (m)	شانه راه (m)	پیاده‌رو (m)
T۵.۵ طبقه A در راه‌های محلی یا فرعی	۲.۷۵×۲	-	-
T۸.۵ طبقه B و C در راه‌های اصلی	۳.۲۵×۲	۱×۲	-
T۹.۵ طبقه C یا D در راه‌های اصلی	۳.۲۵×۲	۱.۲۵×۲	-
T۱۱.۵ طبقه B، C و D هنگامی که سه خط عبوری یا خط عبوری اضطراری لازم باشد	۳×۳.۲۵+۱×۲	۱×۲	-

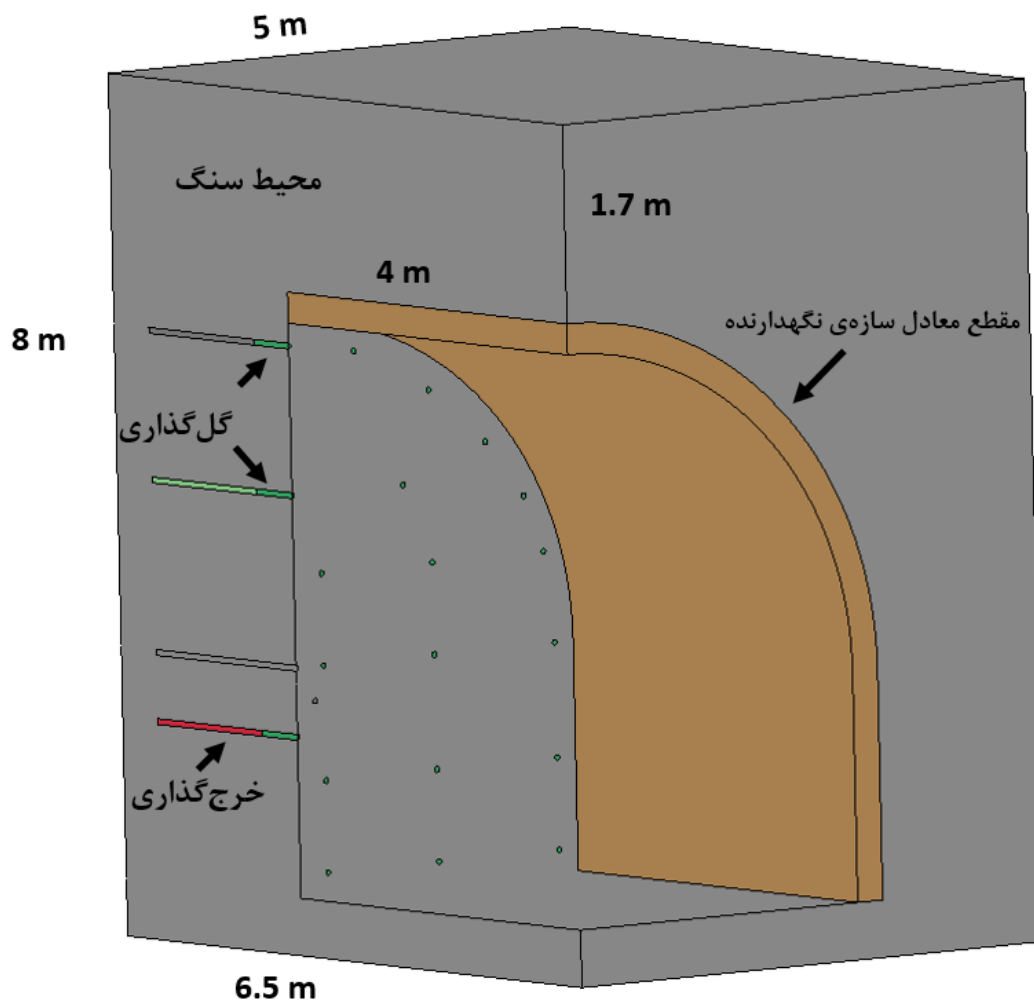
جدول ۳-۲ طبقه‌بندی مقطع عرضی تونل راه آهن.

نوع تونل	نام کشور	عرض تونل (m)	ارتفاع طاق تونل تا بالای ریل (m)
تونل تک خطه	ایتالیا	۴.۶	۵
	استرالیا	۵.۵	۵
	سوئیس	۵.۲	۵.۸
	هند	۴.۷۲	۶

اقدامات گام به گام مدل‌سازی به صورت زیر انجام شده است:

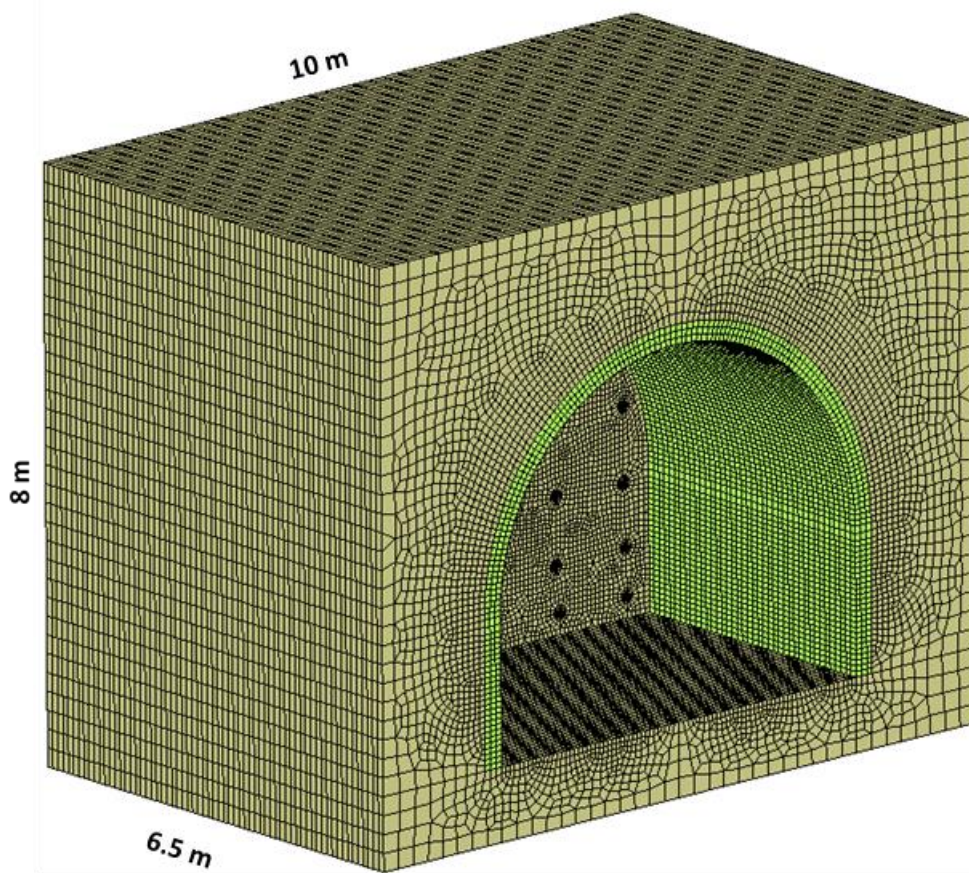
۳-۴-۱ هندسه مدل

مدل ایجاد شده جهت شبیه‌سازی، شامل محیط سنگی، هوا، چال‌های انفجاری، گل‌گذاری و مقطع معادل لتیس‌گیردر و شاتکریت می‌باشد. در شکل ۳-۲ شمای کلی از مدل متقارن شبیه‌سازی شده آمده است.



شکل ۲-۳ هندسه و شمای کلی متقارن مدل‌سازی.

ابعاد قسمت مدل‌سازی شده به صورت $6.5 \times 8 \times 10$ متر می‌باشد. مدل‌سازی به صورت کامل، همان‌طور که در شکل ۳-۳ نشان داده شده، انجام شده است. محیط تونل شامل هوا می‌باشد تا بار انفجار، علاوه بر سنگ، از طریق آن نیز بتواند انتقال پیدا کند.



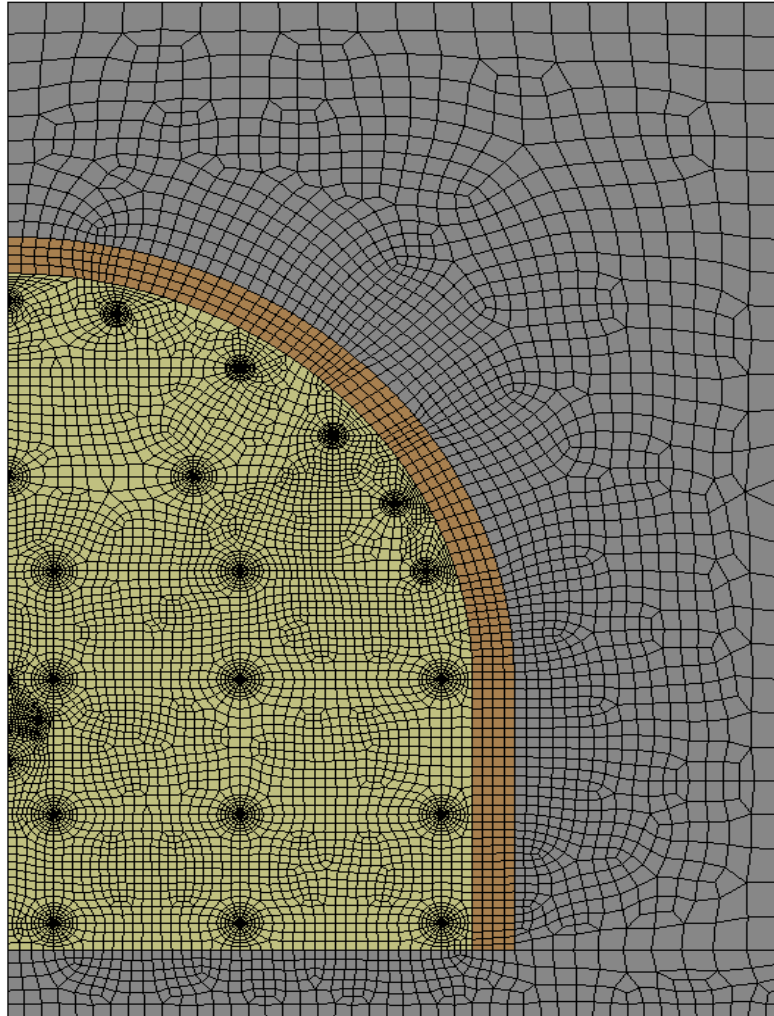
شکل ۳-۳ محیط کامل مدل سازی شده.

۳-۴-۲ مش بندی

مش بندی هندسه‌ی مدل، یکی از مهم‌ترین مراحل مدل سازی می‌باشد. مش بندی هدفمند مدل، باعث کاهش زمان محاسبات و تحلیل، و همچنین باعث ارائه‌ی نتایج دقیق‌تر می‌شود. مش بندی مدل، توسط نرم‌افزار LS- PREPOST انجام شده است. در شکل زیر مش بندی اطراف چال‌های انفجاری و مدل ماده‌ی سنگ و سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت مشاهده می‌شود.

المان‌های سنگ، سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل، هوا، خرج انفجاری و گل‌گذاری به‌صورت چهارضلعی SOLID می‌باشد. المان‌های SOLID، پرکاربردترین روش در تجزیه و تحلیل صریح می‌باشند که هر المان توسط هشت گره به المان دیگر متصل می‌گردد. ابعاد المان تأثیر زیادی در نتایج تحلیل دارند. اما با کوچک شدن آن‌ها، میزان زمان

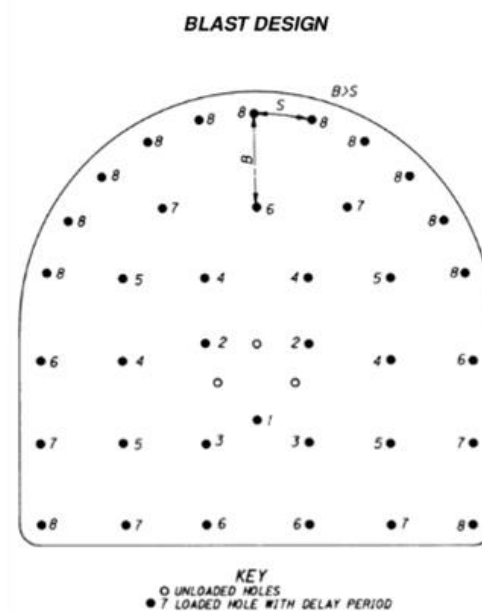
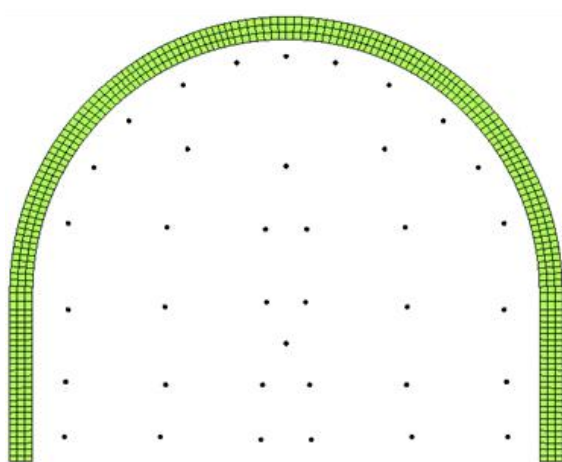
تحلیل بسیار بالا رفته و نیاز به سخت‌افزار قوی می‌باشد؛ لذا باید به‌صورت هدفمند مش بندی صورت گیرد. باتوجه‌به مقالات مختلف و مش بندی های انجام شده، در این مدل‌سازی، سائز المان‌های اطراف چال انفجاری حدود ۱ سانتی‌متر و در دورترین المان‌ها از محل انفجار، حدود ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. جزییات مش بندی، در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ مش بندی سنگ، سازه‌ی تونل و اطراف چال‌های انفجاری.

۳-۴-۳ الگوی انفجار

الگوی انفجاری موردنظر برای پیشروی سینه‌ی کار، جزو رایج‌ترین الگوهای قابل استفاده در زمین‌های سنگی است [۲۹]. شکل ۳-۵ نشان‌دهنده‌ی چینش چال‌های انفجاری و زمان تأخیر آن‌ها بر اساس موقعیت چال است. قطر چال‌ها برابر ۵ سانتی‌متر و عمق آن‌ها ۲ متر در نظر گرفته شده است که ۱.۵ متر انتهای آن خرج گذاری، و ۰.۵ متر ابتدای آن، گل گذاری می‌باشد. با توجه به وزن مخصوص ماده‌ی منفجره، این چال‌ها با ۴.۸ کیلوگرم ماده‌ی منفجره شارژ می‌شوند.



شکل ۳-۵ مقایسه‌ی الگوی آتشباری استفاده شده با مدل‌سازی نرم‌افزار.

این الگو شامل هفت تأخیر انفجاری با تأخیرهای ۱ میلی‌ثانیه‌ای است. انفجار اول، به صورت تک انفجار، در مرکز تونل می‌باشد و آخرین انفجار که در زمان ۸ میلی‌ثانیه است، شامل ۱۳ انفجار به صورت همزمان، در کناره‌های سینه‌ی کار تونل می‌باشد. همچنین ۳ چال خالی هوا نیز در آن وجود دارد.

عملیات آتشباری در معادن و تونل‌ها شامل طراحی الگوی آتشباری و اقدامات منجر به تولید سنگ‌های خرد شده با خردشدگی مطلوب به کمک مواد منفجره در داخل چال‌ها می‌باشد [۲۹].

شکل ۳-۵ تطابق الگوی آتشیباری موردنظر، با الگوی آتشیباری مدل شده در نرم افزار را نشان می دهد.

۳-۵ سیستم واحدها در نرم افزار

نرم افزار برای انجام عملیات، به صورت پیش فرض واحدی را در نظر نمی گیرد. بلکه باتوجه به اعدادی که وارد می شود و مطابقت آن با جدول زیر می توان واحد سیستم را مشخص کرد. طبق جدول زیر که در راهنمای نرم افزار و همچنین سایت رسمی نرم افزار آمده است، می توان واحدها را مشخص و اعمال کرد [۳۰]. در این پایان نامه از واحدهای SI (ردیف ۱) در جدول ۳-۳ استفاده شده است.

جدول ۳-۳ واحدهای قراردادی نرم افزار جهت پارامترهای ورودی و خروجی [۳۰].

گرانش	مدول یانگ	چگالی	انرژی	تنش	نیرو	زمان	طول	جرم	ردیف
9.806	2.07E11	7.83E3	J	Pa	N	s	m	kg	۱
9.81E2	2.07E9	7.83E-3			1E-2 N	s	cm	kg	۲
9.81E-4	2.07E3	7.83E-3			1E4	ms	cm	kg	۳
9.81E-10	2.07E-3	7.83E-3			1E10 N	us	cm	kg	۴
9.81E-3	2.07E2	7.83E-6	KN-mm	GPa	KN	ms	mm	kg	۵

۳-۶ معادلات حاکم

در این مطالعه از روش لاگرانژی برای مدل سازی مقطع معادل سازه موقت تونل استفاده شده است. همچنین از روش ALE برای مدل سازی هوا، سنگ، ماده منفجره و گل گذاری استفاده شده است. جهت اتصال گره های لاگرانژی و اوپلری، باتوجه به راهنمای نرم افزار، استفاده از کلیدواژه `CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID` الزامی است [۳۰]. جهت استفاده از این کلیدواژه، نیاز است

که حتماً گره‌های پارت های لاگرانژی و اوپلری با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند. جهت عدم توقف فرآیند تحلیل و جلوگیری از اعوجاج شدید قسمت لاگرانژی که شامل مقطع معادل سازه موقت می‌شود، به توصیه‌ی نرم‌افزار، باید از مدل ماده‌ی هوا در محیط تونل استفاده کرد تا هم‌پوشانی لازم با یکدیگر داشته باشند. همچنین باتوجه‌به مدل‌سازی های انجام شده، برای سطح تماس بین سازه‌ی تونل و محیط سنگ اطراف، باید از قسمت CONTACT و گزینه‌ی AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE نیز استفاده کرد [۲۳].

شرح کلی‌ای از مدل‌های ماده اختصاص داده شده برای سازه‌ی نگهدارنده موقت تونل، خرج TNT، هوا، سنگ و گل‌گذری در این بخش ارائه شده است.

۳-۶-۱ شرایط مدل‌سازی ماده منفجره، گل و هوا

باتوجه‌به اینکه در این مدل‌سازی برای مدل کردن ماده منفجره، سنگ، گل و هوا، از المان‌های ALE استفاده شده است. برای اعمال المان اوپلری، باید از قسمت SECTION، مقدار ELFORM را برابر ۱۱ قرار داد که به معنای 1_Point_ALE_multi_material_Element می‌باشد. از طرفی در قسمت ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP باید این ویژگی اعمال شود تا نرم‌افزار آن را تشخیص دهد [۳۱]. برای مدل‌سازی پارت لاگرانژی در قسمت SECTION، مقدار ELFORM را برابر ۱ قرار می‌دهیم.

۳-۷ معادلات رفتار ماده و معادلات حالت

برای تحلیل یک مسئله پاسخ مواد را به دو بخش حجمی و برشی تقسیم می‌کنند، پاسخ حجمی ماده مربوط به تنش‌های هیدرواستاتیک و پاسخ برشی مربوط به تنش‌های برشی می‌باشد. نرم‌افزارهای مبتنی بر هیدروکدها برای به‌دست‌آوردن پاسخ حجمی از معادلات حالت و برای پاسخ برشی از مدل ماده استفاده می‌کنند.

۳-۷-۱ مدل رفتار ماده معادل لتیس شاتکریت

میزان حداقل ضخامت شاتکریت، ۲۷ سانتی متر در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به فواصل ۱ متری لتیس ها از یکدیگر و تحقیقات انجام شده برای بررسی مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت، میزان ضخامت معادل مقطع، در صورت استفاده از لتیس های ۳ میلگردی نیز ۲۷ سانتی متر است و مشخصات آن در جدول ۳-۴، آمده است [۳۲]. برای مدلسازی، با توجه به اصل سختی معادل، مدل ماده‌ی (MAT_Plastic_Kinematic) که به طور گسترده در شبیه سازی ها استفاده می شود، به کار گرفته شده است.

جدول ۳-۴ مدل ماده مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت.

ρ (kg/m ³)	E(Gpa)	Poisson Ratio	Yield Stress(Mpa)	Tangent Modulus(Gpa)	Hardening parameter	Failure strain
2650	25.17	0.25	100	4	0.5	0.8

۳-۷-۲ مدل رفتار ماده منفجره و معادله حالت

معادله حالت، یک رابطه ساده بین چگالی و انرژی درونی شیء می باشد. برای مدل سازی ماده منفجره از مدل ماده‌ی MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN استفاده می شود. جدول ۳-۵ پارامترهای مربوط به آن را نشان می دهد. معادله حالت JWL برای مدل کردن فشار حاصل از انفجار می باشد و به طور گسترده در محاسبات مهندسی استفاده می شود. این معادله‌ی حالت به شکل معادله‌ی ۳-۱ نوشته می شود.

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3-1)$$

در رابطه ۳-۱، P نشان دهنده‌ی فشار، V نسبت حجم فعلی به حجم اولیه و E انرژی اولیه است. این معادله حالت معمولاً برای تشریح رفتار محصولات انفجار به کار می رود و همچنین ارتباط بین فشار، حجم متغیر و انرژی داخلی را بیان می نماید. A, B, R₁, R₂ و ω ثابت های مواد انفجاری خاص هستند [۲۴].

جدول ۳-۵ مدل ماده خرج انفجاری [۲۴].

ρ (kg/m ³)	V_D (m/s)	P_{cut} (Mpa)	A (Mpa)	B (Mpa)
1630	6930	2.1E4	3.738E5	3.747E3
R_1	R_2	ω	V_0	E_0 (Mpa)
4.15	0.9	0.35	1	6E3

۳-۷-۳ مدل رفتار ماده سنگ

سنگ ما در طبقه بندی، از نوع ۴ می باشد که به معنای ضعیف بودن آن در خودنگهداری است و لذا لزوم استفاده از قاب مشبک و شاتکریت در آن هست. مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ اطراف که از نوع ماسه سنگ می باشد، در جدول ۳-۶ آمده است. در این مطالعه، به دلیل اینکه هدف اصلی ما بررسی تأثیرات روی سازه ی تونل و عملکرد آن است، سنگ اطراف به عنوان یک ماده ی ایده آل الاستیک - پلاستیک، از مدل ماده ی (MAT_MOHR_COULOMB) که با توجه به راهنمای نرم افزار مناسب مدلسازی سنگ می باشد، استفاده شده است [۳۳].

جدول ۳-۶ مدل ماده سنگ.

Material	Density	E(GPa)	Poisson Ratio	Cohesive Force [C(KPa)]	Friction Angle	Lateral Earth Pressure Coefficient
Surrounding rock	2200	0.5	0.35	200	30	0.54

۳-۷-۴ مدل رفتار و معادله حالت هوا

برای محیط داخل تونل، باید مدل ماده ی هوا تعریف شود تا قسمتی از موج انفجار که از طریق هوا به سازه ی تونل وارد می شود، انتقال یابد؛ لذا برای هوا از مدل ماده ی شماره ۹ نرم افزار (MAT_NULL) و معادله ی حالت

LINEAR_POLYNOMIAL که مشخصات آن در جدول ۷-۳ آمده، استفاده شده است [۲۲]. انرژی داخلی

در واحد حجم، E و فشار P به صورت زیر آمده است:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2) E \quad (۳-۲)$$

و

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (۳-۳)$$

در معادله ۲-۳ و ۳-۳، $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ و ثابت‌های معادله و ρ/ρ_0 نسبت چگالی و E_0 انرژی داخلی واحد حجم می‌باشد. در جدول پارامترهای موردنظر برای هوا در مدل‌سازی عددی آمده است:

جدول ۷-۳ مدل ماده هوا.

$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_0(\text{Mpa})$	V_0
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25	1

۳-۷-۵ مدل ماده گل گذاری

برای گل گذاری چال‌های انفجاری، از مدل ماده MAT_SOIL_AND_FOAM که مشخصات آن در جدول

۳-۷ آمده، استفاده شده است. در اینجا ρ چگالی جرم، G مدول برشی، K_U مدول بالک می‌باشد [۲۲].

جدول ۸-۳ مدل ماده خاک.

$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	G(MPa)	$K_u(\text{Mpa})$	a_0	a_1	a_2	$P_{cut}(\text{MPa})$
1255	1.7240	5.51	0	0	0.8702	0

۳-۸ اعتبارسنجی مدل سازی نرم افزار LS-DYNA

۳-۸-۱ هوا

باتوجه به میزان خرج انفجاری مورد بررسی، عملاً صحت سنجی ماده‌ی منفجره در محیط واقعی امکان پذیر نمی باشد؛ لذا باتوجه به روابط تجربی موجود به بررسی این موضوع پرداخته شده است. باتوجه به اینکه موج انفجار از هوا نیز منتقل می شود، از رابطه‌ی تجربی توسعه داده شده توسط هنریچ و همکاران [۳۴] برای اطمینان از صحت مدل سازی استفاده شده است. در این رابطه هنریچ و همکاران میزان فشار حداکثر ناشی از انفجار را در فاصله‌ی مقیاس شده (Z) به دست آورده اند که به شرح زیر است:

$$\Delta P_f = \begin{cases} \frac{1.40717}{Z} + \frac{0.55397}{Z^2} - \frac{0.03572}{Z^3} + \frac{0.000625}{Z^4} & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ \frac{0.61938}{Z} - \frac{0.03262}{Z^2} + \frac{0.21324}{Z^3} & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.0662}{Z} + \frac{0.405}{Z^2} + \frac{0.3288}{Z^3} & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases}$$

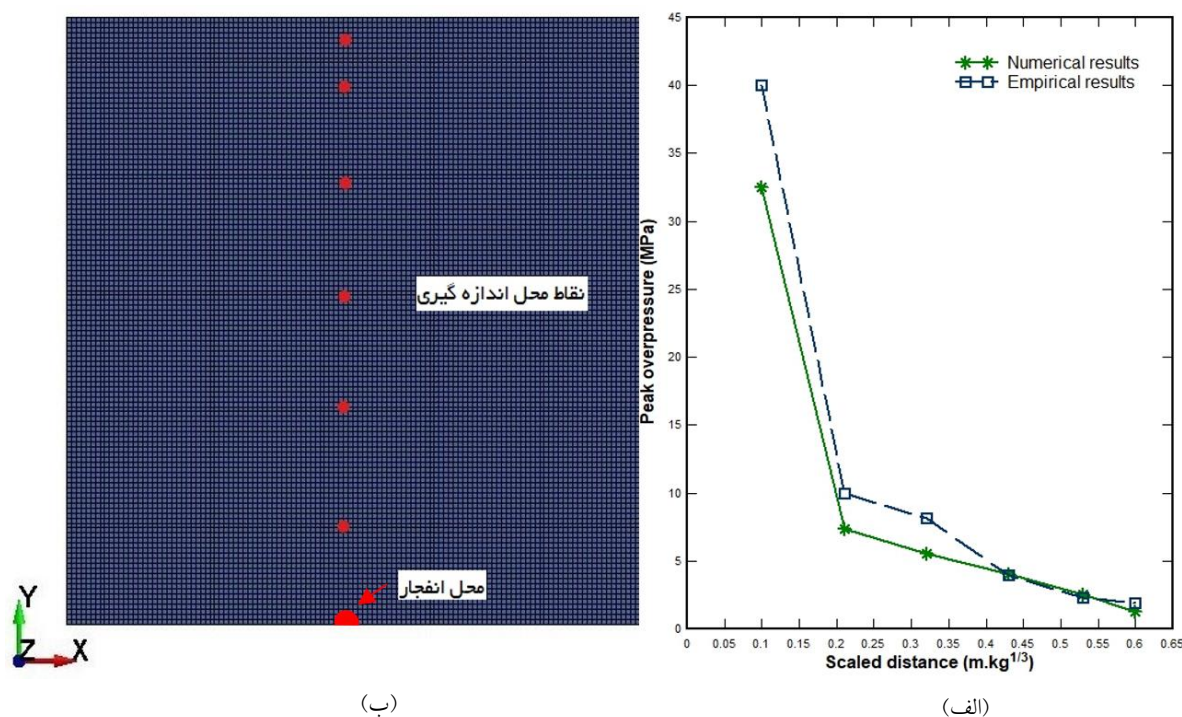
(۳-۴)

و

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (۳-۵)$$

در این رابطه ۳-۴ و ۳-۵، ΔP_f اضافه فشار ماکزیمم ناشی از موج انفجار، Z فاصله‌ی مقیاس شده، R فاصله از محل انفجار بر حسب متر و W میزان خرج انفجار بر حسب کیلوگرم می باشد. برای صحت سنجی مقادیر به دست آمده نتایج، در ابتدا مدل سازی خرج انفجاری در هوا صورت گرفته و با روابط تجربی مقایسه شده است. مدل هوا، مکعبی به ابعاد ۳ متر است و خرج ۱۰۰ کیلوگرم TNT به آن وارد شده است. در شکل ۳-۶-الف، نتایج حاصل از مدل سازی عددی و رابطه تجربی در نقاط اندازه گیری نشان داده شده، به صورت نمودار آورده شده است. چنانچه ملاحظه می شود از نظر مقادیر و روند تغییرات انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل سازی

عددی و رابطه تجربی وجود دارد و بنابراین صحت مدل سازی عددی بارگذاری انفجار تأیید می شود. در شکل ۳-۶ نقاط محل اندازه گیری با فاصله های مشخص نسبت به محل انفجار نشان داده شده است. این فاصله ها باتوجه به میزان خرج انفجاری در رابطه ی ۳-۴ گذاشته شده است و فاصله ی مقیاس شده ی آن به دست آمده است. باتوجه به این، میزان فشار در شکل ۳-۶-الف آورده شده است.



شکل ۳-۶ (الف) مقایسه نتایج مدل سازی عددی و نتایج تجربی (ب) محل نقاط اندازه گیری.

۳-۸-۲ سنگ

طبق تحقیق نان جیانگ و همکاران به منظور تجزیه و تحلیل تأثیرات ارتعاش انفجار بر روی ساختار تونل، مدل سازی انجام شده و سرعت لرزش ایجاد شده در سنگ اطراف در موقعیت های مختلف بر اساس آزمایش های میدانی تحلیل شده است و نتایج، باتوجه به فاصله ی آن از محل انفجار به دست آمده است [۳۵]. لذا با توجه به شرایط موجود، در این پایان نامه، مدلسازی صورت گرفته است. در جدول ۳-۹، مقایسه ی نتایج مدلسازی و نتایج تست میدانی مقاله نان جیانگ، نشان داده شده است.

جدول ۳-۹ مقایسه‌ی نتایج رابطه‌ی تجربی و مدل‌سازی عددی سنگ.

درصد اختلاف (%)	سرعت به‌دست آمده در مدل‌سازی (cm/s)	سرعت اندازه‌گیری شده (cm/s)	فاصله (m)	میزان خرج انفجاری (kg)
۱۰.۸۸	۱.۵	۱.۶۸۳	۶۹.۷	۴۵
۱۰.۷	۱.۸۱	۱.۶۳۴	۶۱.۲	۳۲
۵.۰۵	۱.۶۲	۱.۵۴۲	۶۳.۹	۳۲
۱۴.۴	۲.۱۹	۱.۹۱۹	۵۰.۹	۳۲
۲۵.۸	۱.۲۷	۱.۰۰۹	۶۲	۲۵.۸

مشاهده می‌شود میزان اختلاف مدل‌سازی عددی و سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه، به طور میانگین

۱۳ درصد است و این نشان‌دهنده‌ی خطای کم مدل‌سازی است.

۴. فصل چهارم- تحلیل و ارزیابی نتایج

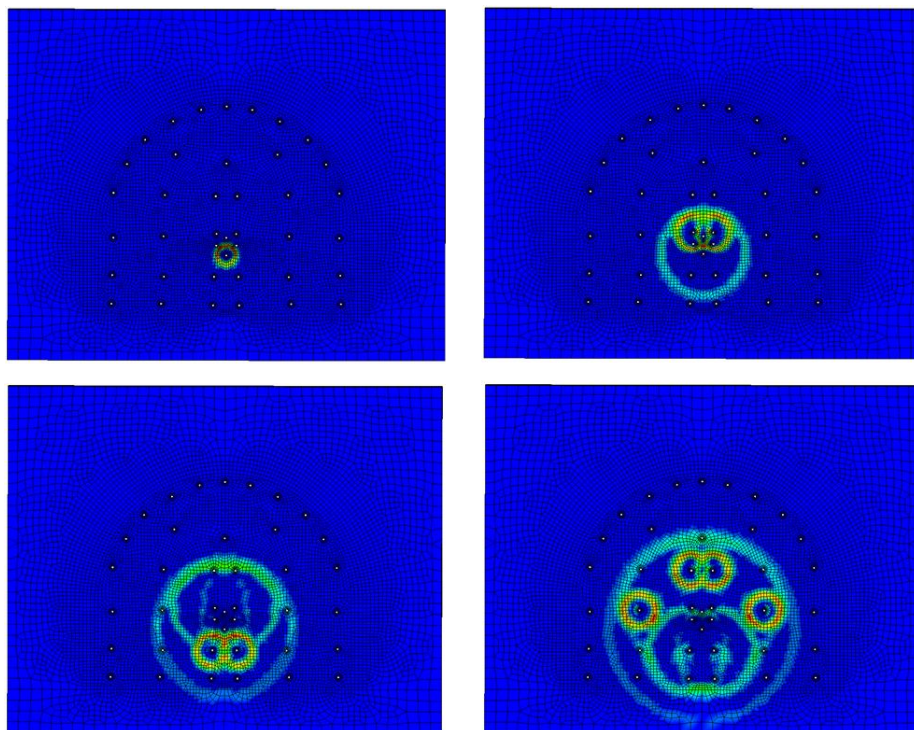
۴-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از تحلیل عددی نرم‌افزار LS-DYNA بر روی سازه‌ی نگهدارنده مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت پرداخته شده است. مدل المان محدود در زمین سنگی سست و ضعیف که در طبقه‌بندی رتبه‌ی ۴ قرار دارد و استفاده از لتیس گیردر و شاتکریت در آن نیاز می‌باشد.

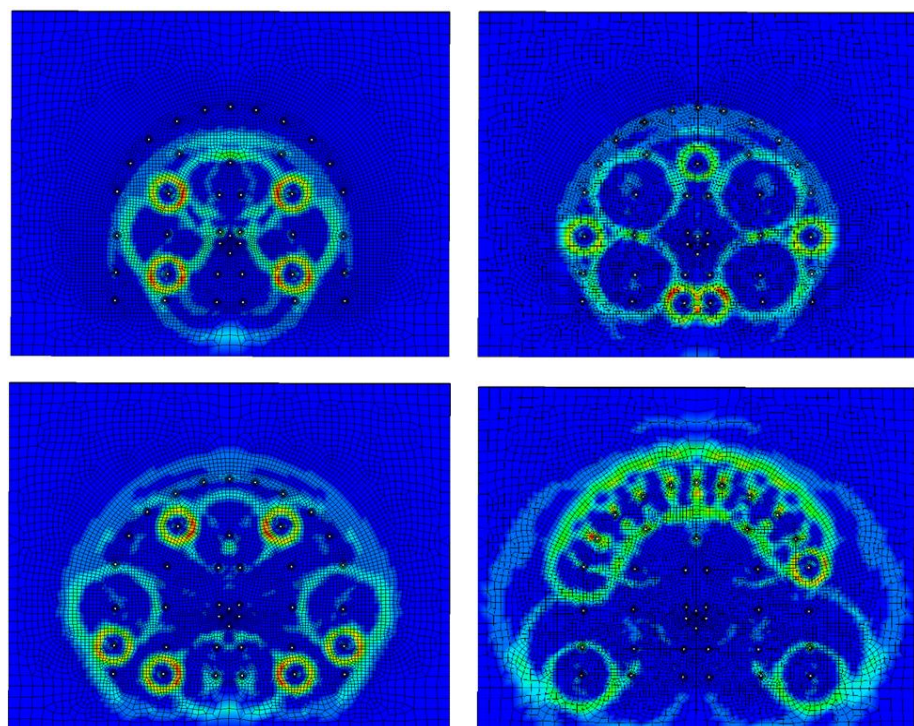
در این فصل، میزان سرعت، جابجایی، شتاب و تنش مؤثر ایجاد شده در نقاط نشانه مقطع معادل نگهدارنده‌ی تونل، نشان داده شده و بررسی این پارامترها پرداخته شده است.

۴-۲ کانتورهای گسترش تنش مؤثر اطراف چال

با توجه به الگوی آتشباری، پروسه‌ی انفجار در نقاط چال‌های انفجاری با اختلاف زمانی ۱ میلی‌ثانیه از یکدیگر، شروع می‌شود. تنش مؤثر نیروی است که ذرات را به‌صورت صلب در کنار یکدیگر نگه می‌دارد و با اعمال نیروهای اضافی به‌راحتی تغییر می‌کند. کانتور گسترش تنش مؤثر ناشی از بارهای انفجاری که در اطراف چال انفجاری ایجاد می‌شود در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲ به‌صورت کلی نشان داده شده است. میزان دقیق تنش مؤثر در المان‌های سازه‌ای در قسمت ۴-۵-۱ نمودارهای ۴-۲۹ تا ۴-۳۵ آورده شده است.



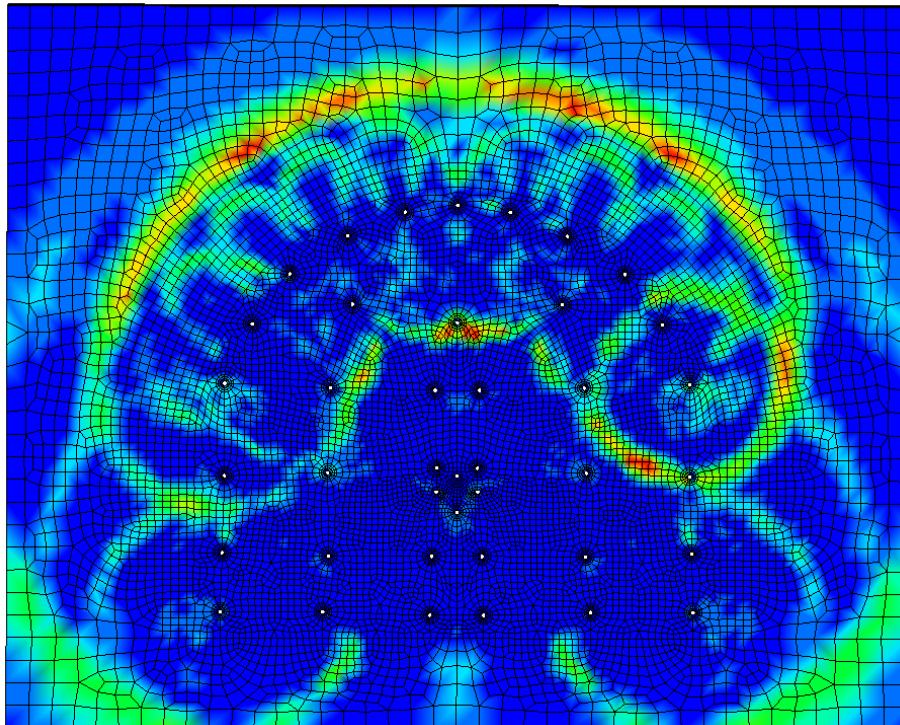
شکل ۴-۱ کانتور تنش اطراف چال‌های انفجاری در لحظه‌ی انفجار اولیه و زمان‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌ثانیه.



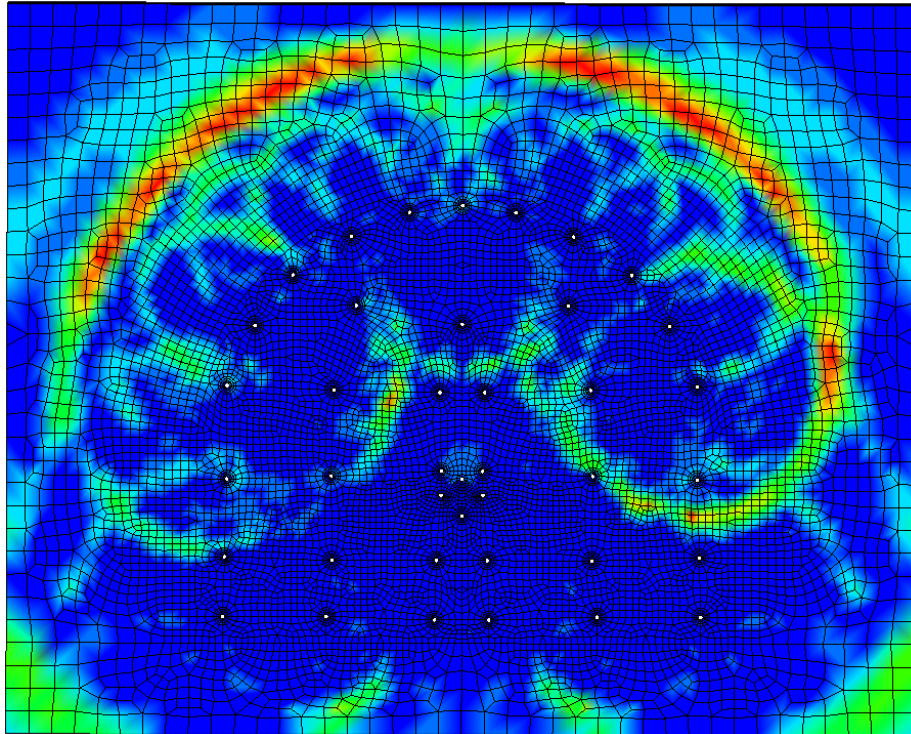
شکل ۴-۲ کانتور تنش اطراف چال‌های انفجاری در زمان‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ میلی‌ثانیه.

در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲، در کانتورهای تنش مشاهده می‌شود بعد از شروع انفجار در ثانیه‌ی صفر موج ناشی از انفجار به‌صورت کروی در سنگ اطراف چال‌ها انتشار می‌یابد. هر موج انفجار، با موج انفجارهای بعدی خود هم‌پوشانی و مداخلاتی دارد که به‌مرور و با دور شدن از محل انفجار، میرا شده و میزان ماکزیمم تنش کاهش می‌یابد.

همچنین گسترش تنش مؤثر ناشی از همه‌ی انفجارها، پس از پایان زمان‌بندی تأخیری چال‌های انفجاری در سنگ اطراف سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل در شکل ۴-۳ و ۴-۴ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۴-۳ گسترش تنش ناشی از انفجار در سنگ اطراف.



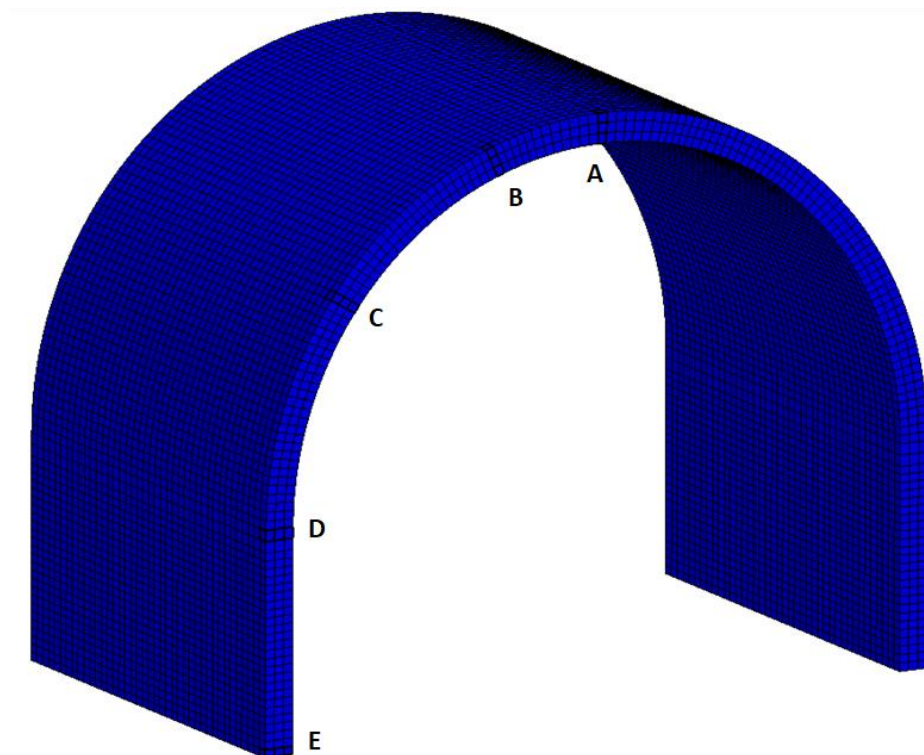
شکل ۴-۴ گسترش تنش ناشی از انفجار در سنگ اطراف.

۳-۴ بررسی پارامترهای دینامیکی سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل

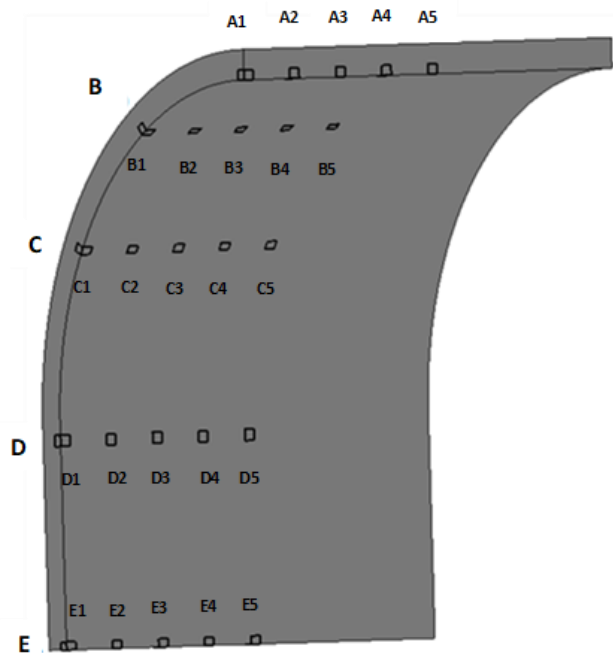
پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل، از نظر سرعت، جابه‌جایی، شتاب و تنش مؤثر نقاط اندازه‌گیری تجزیه و تحلیل شده و برای چندین نقطه نشانه بر روی سازه نگهدارنده، نتایج عددی در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این بخش، برخی از نقاط اندازه‌گیری بر روی پوشش نگهدارنده‌ی تونل در امتداد جهت‌های محیطی و طولی انتخاب شده‌اند تا پاسخ‌های دینامیکی پوشش، هنگام قرار گرفتن در معرض ضربه انفجار مورد بررسی قرار گیرد.

پنج نقطه از سازه‌ی تونل در فواصل مختلف از سینه‌ی کار جهت بررسی پارامترهای دینامیکی در نظر گرفته شده است. نقاط مورد نظر، در شکل ۴-۵ آمده است و این نقاط تا فاصله‌ی دو متری از سینه‌ی کار، به صورت هر نیم متر، مورد بررسی قرار گرفته است. در نقطه‌ی A، نزدیک‌ترین المان به محل انفجار با نام A1 نام‌گذاری

شده است و همچنین با فاصله‌های نیم متری از یکدیگر، دورترین المان مورد بررسی، با نام A5 در فاصله‌ی دو متری از سینه‌ی کار نام‌گذاری شده است. این رویه برای نقاط B، C، D و E هم به همین گونه می‌باشد. باتوجه‌به شکل زیر، نقاط A تا E از محل تاج تونل، تا پایین‌ترین نقطه از دیواره‌ی کناری تونل، در پنج نقطه‌ی مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴-۵ نقاط اصلی موردنظر در مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت.



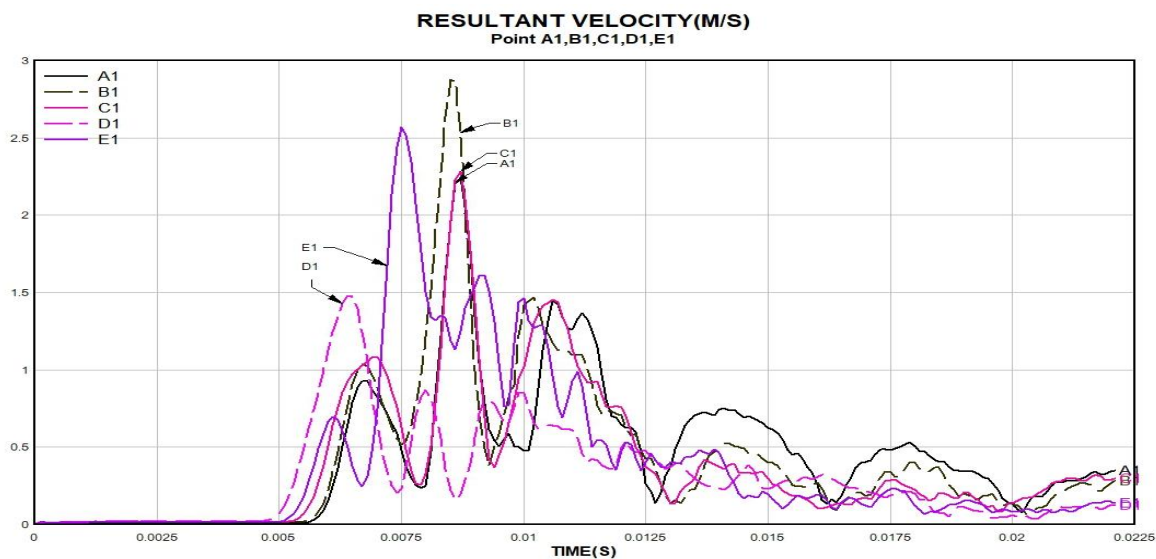
شکل ۴-۶ فواصل نیم متری نقاط موردنظر در مقطع معادل لتیس گیردر و شاتکریت.

در نتایج به دست آمده، به‌وضوح نشان داده شده است که مقادیر اوج این سه شاخص دینامیکی در منطقه ۱ محل انفجار، از مناطق دیگر مورد بررسی، بیشتر است. زیرا بیشترین بارگذاری ضربه انفجار بلافاصله در مجاورت محل انفجار قرار دارد. به دلیل کاهش بارگذاری انفجار با افزایش فاصله از مرکز انفجار، تمام مقادیر اوج این عوامل به‌سرعت تحلیل می‌روند و کاهش می‌یابند. منحنی‌های تغییرات پاسخ‌های دینامیکی سازه‌ی موقت تونل که آورده شده است، نشان می‌دهد که قسمت میانی و پایینی دیواره‌ی تونل واکنش کمتری نسبت به قسمت بالایی داشته است.

۴-۳-۱ بررسی پارامتر جنبش سرعت

همان‌طوری که قبلاً ذکر گردید به منظور بررسی تأثیر آتشباری و انفجار در سینه کار تونل مطابق با الگوی انفجار تعریف شده، بر روی سازه نگهدارنده‌ی موقت، چندین نقاط نشانه در فواصل مختلف و موقعیت‌های متفاوت از سینه کار تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا بررسی سرعت در المان‌های اطراف تونل بر روی

سازه نگهدارنده، در محل انفجار که طبق شکل شامل پنج نقطه‌ی نشانه A1,B1,C1,D1,E1 می‌باشد و به‌صورت زیر است در شکل ۷-۴ نشان داده شده است. بیشترین میزان سرعت مربوط به نقطه B1 و کمترین میزان، مربوط به D1 می‌باشد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، مقدار سرعت ایجاد شده، بالطبع باتوجه‌به موقعیت المان و فاصله‌ی المان از محل انفجار، از بیشینه‌ی سرعت موجود به دلیل افزایش مسافت و میرایی موج انفجار، کاسته می‌شود.

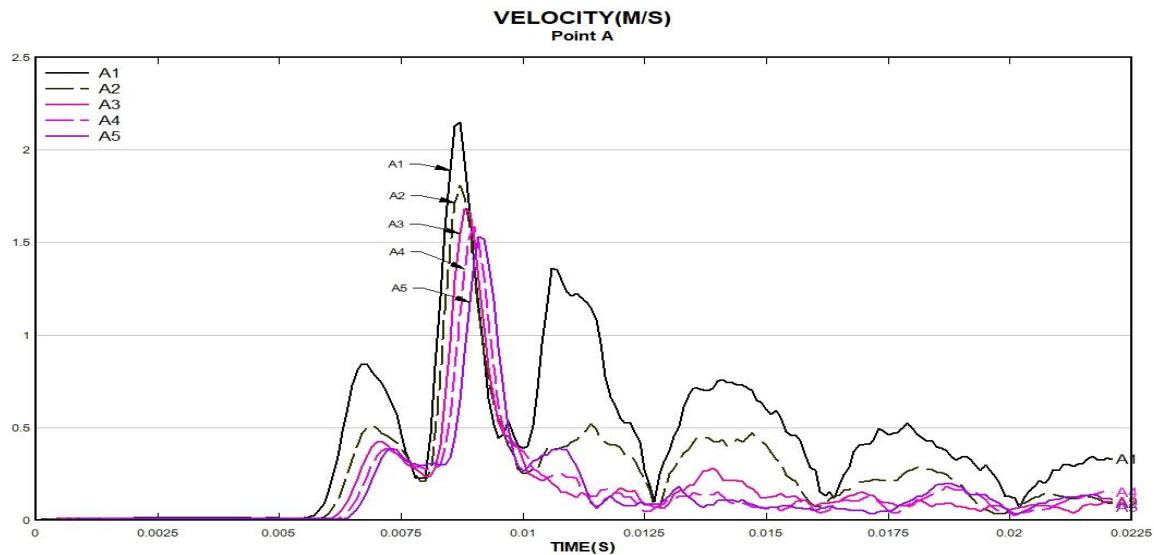


شکل ۷-۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط نشانه A1,B1,C1,D1,E1 .

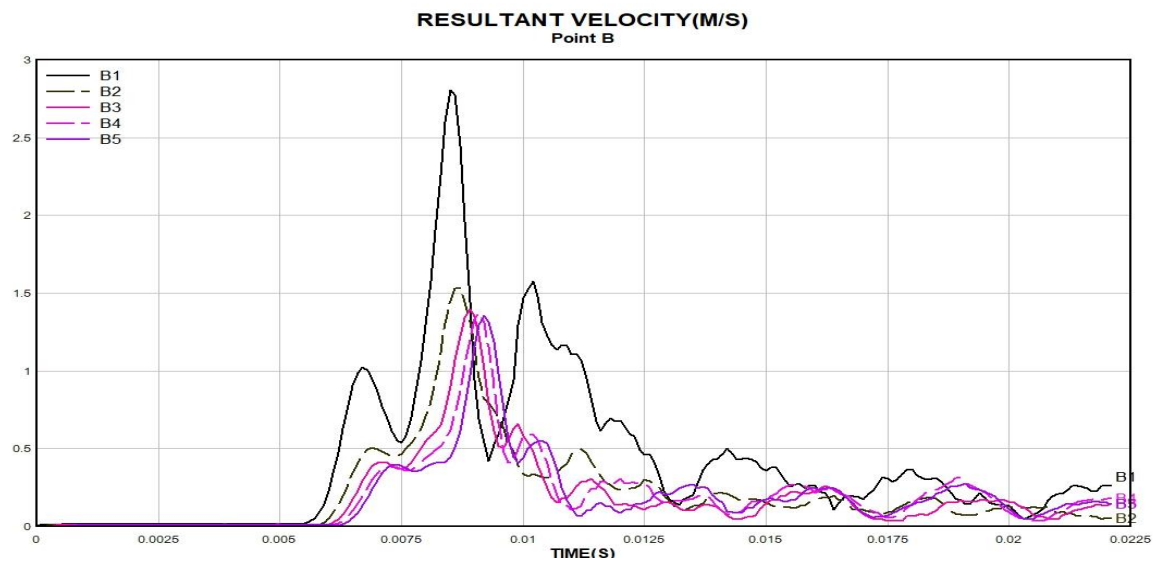
در نقطه‌ی A1 تا A5 که دارای فاصله‌ی نیم متری از یکدیگر هستند، از محل انفجار تا فاصله‌ی ۲ متری از آن. میزان سرعت در نقطه‌ی A که تاج تونل می‌باشد، ۴-۸ تا ۴-۱۲ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۴-۸ نشان داده شده است، PPV بین نقاط A1 تا A5 متفاوت است. روند کاهش سرعت ارتعاش برای نقاط A1 تا A5 نیز متفاوت است. این تفاوت نشان می‌دهد که نقطه A1 انرژی بیشتری از موج انفجار نسبت به نقطه A5 دریافت می‌کند و این جذب انرژی، برای نقاط دیگر نیز بدین صورت است [۲۲].

میزان سرعت حداکثر در نقطه‌ی A1 برابر ۲.۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد که این عدد در نقاط A2 تا A5 به ترتیب برابر ۱.۷۵، ۱.۶۵، ۱.۵۷ و ۱.۵۲ متر بر ثانیه می‌باشد. مشاهده می‌شود که میزان حداکثر سرعت ایجاد شده در المان‌های سازه‌ای نقطه‌ی از محل نقطه‌ی ۲ تا نقطه‌ی شماره ۵، نسبت به نقطه‌ی شماره‌ی ۱، میرا شده و به ترتیب ۱۹٪، ۲۴٪، ۲۷٪ و ۳۰٪ کاهش می‌یابد.

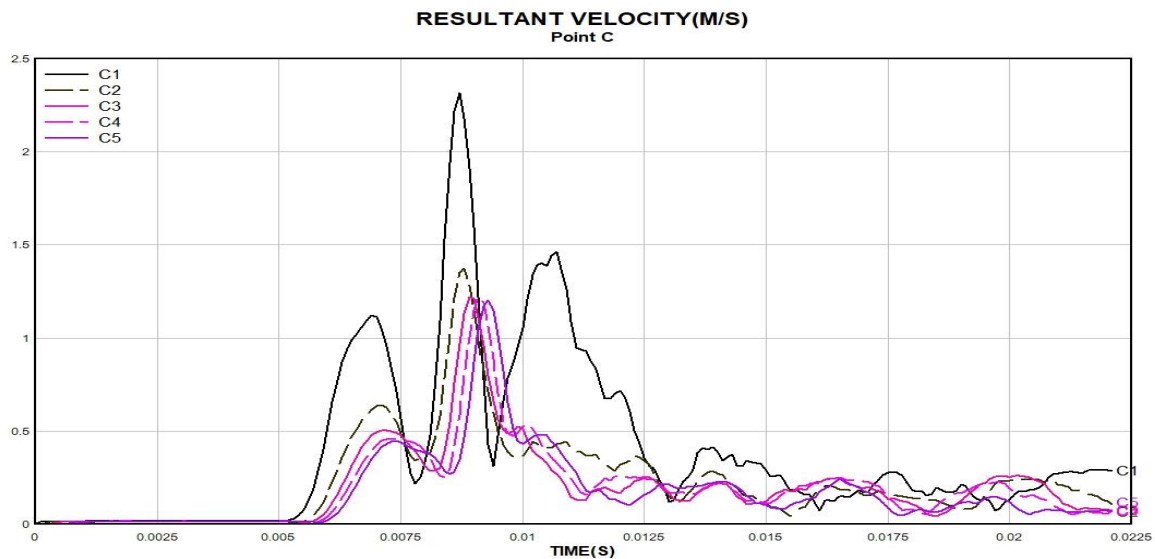


شکل ۴-۸ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط A1 تا A5.

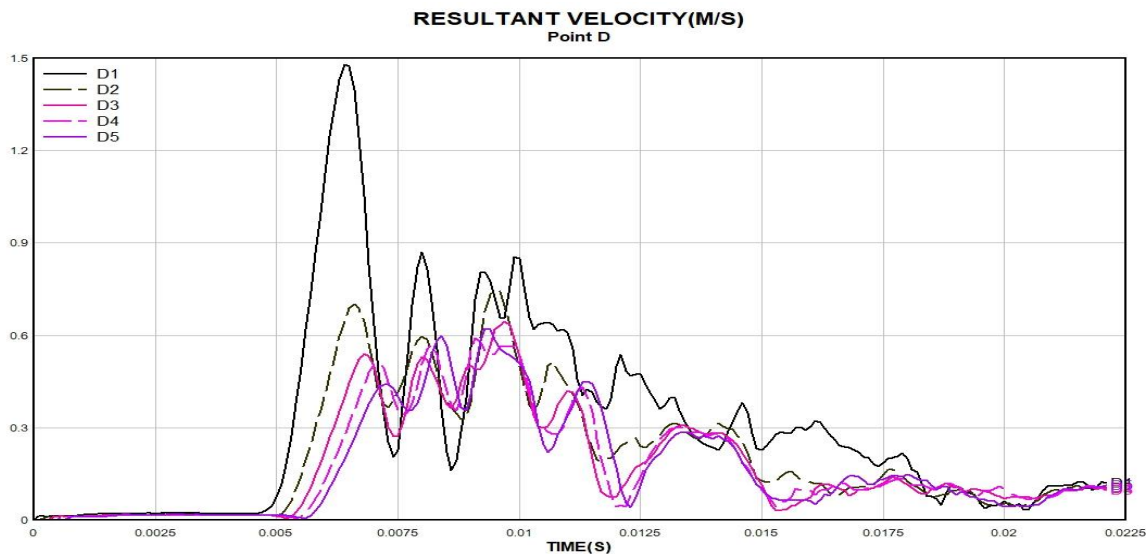


شکل ۴-۹ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط B1 تا B5.

در محدوده‌ی B، میزان حداکثر سرعت در المان، به ۲.۸ متر بر ثانیه در نقطه‌ی B1 می‌رسد. مطابق شکل ۴-۹ میزان حداکثر سرعت در B2 تا B5 به ترتیب برابر ۱.۵۲، ۱.۴، ۱.۳۸، ۱.۳۵ می‌باشد. از طرفی میزان حداکثر سرعت ناشی از موج دوم که در نقطه‌ی B1 ایجاد شده است، تقریباً برابر میزان حداکثر آن، در نقطه‌ی B2 است. مشاهده می‌شود میزان کاهش سرعت در نقاط B3، B4 و B5 چشم‌گیر نیست و کاهش کمی مشاهده می‌شود.



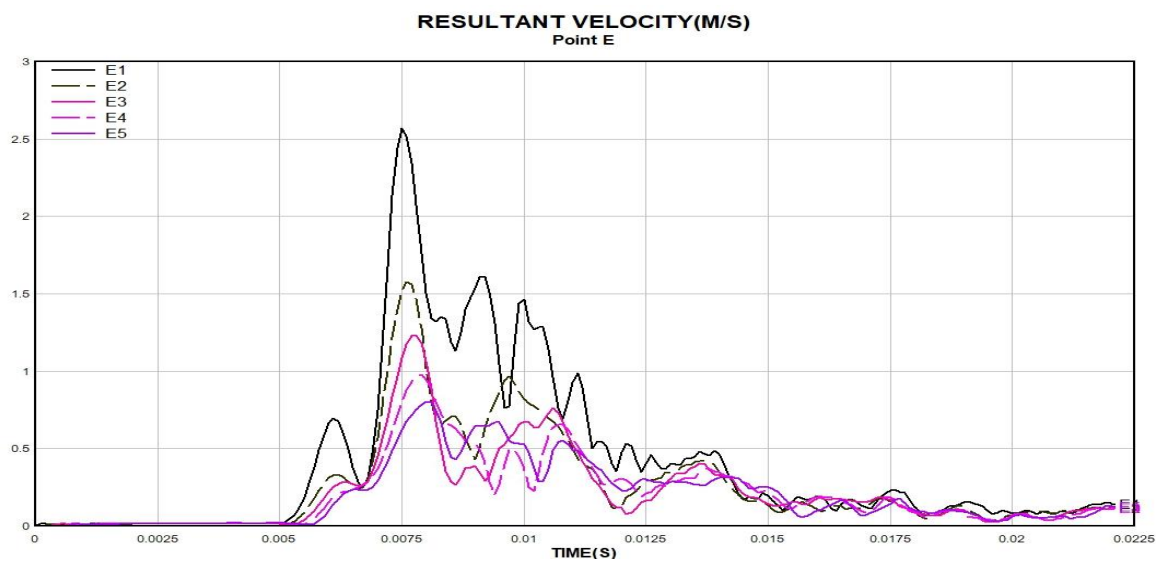
شکل ۴-۱۰ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط C1 تا C5.



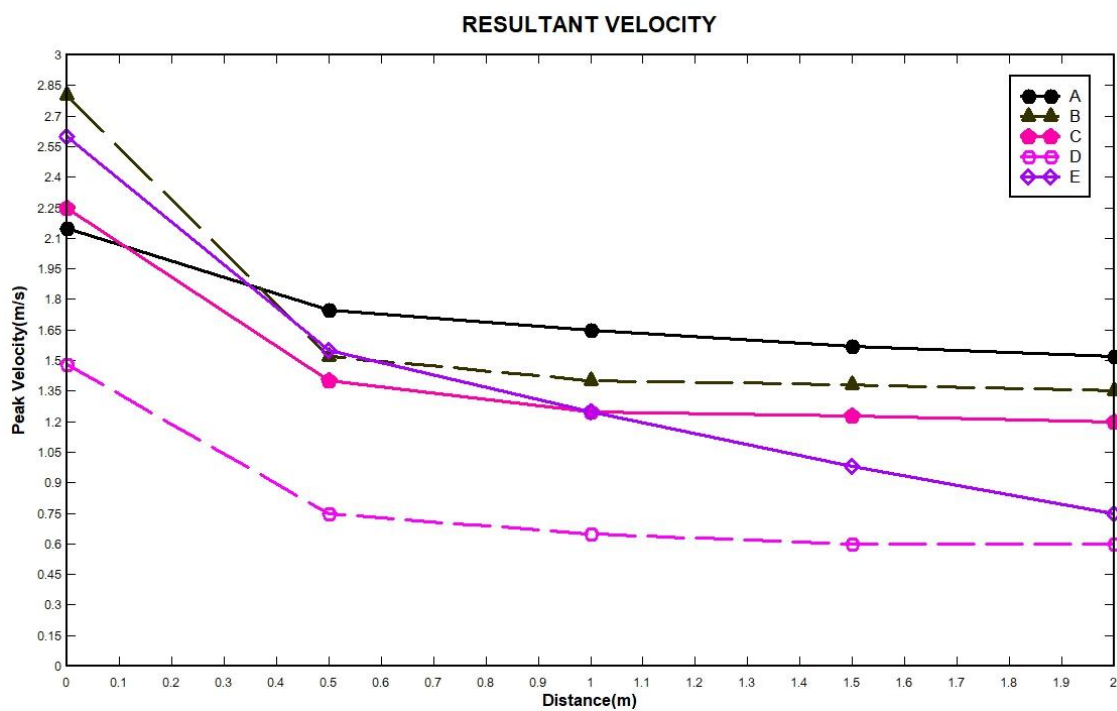
شکل ۴-۱۱ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط D1 تا D5.

همچنین در نقاط C2 تا C5 که نمودار آن‌ها در شکل ۴-۱۰ آمده، به ترتیب شاهد کاهش ۴۰٪، ۴۸٪، ۵۰٪ و ۵۲٪ نسبت به نقطه‌ی C1 هستیم. در شکل ۴-۱۱ در نقطه‌ی D1 تا D5 میزان حداکثر سرعت (PPV)، برابر ۱.۴۵، ۰.۷۵، ۰.۶۵، ۰.۶۲، ۰.۶ متر بر ثانیه می‌باشد. در محدوده‌ی D، به دلیل اینکه چال انفجاری نزدیک به آن، در زمان ۵ میلی‌ثانیه منفجر می‌شود، به همین دلیل سرعت ماکزیمم در زمان ۶ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد، در حالی که در محدوده‌های دیگر (A,B,C,E)، مقدار حداکثر، در زمان ۸ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد.

در شکل ۴-۱۲، PPV نقاط E1 تا E5 آورده شده است. حداکثر سرعت در المان E1 برابر ۲.۶ متر بر ثانیه و میزان کاهش سرعت در المان‌های E2 تا E5 نسبت به المان E1، به ترتیب برابر ۳۱٪، ۵۲٪، ۶۲٪ و ۷۰٪ می‌باشد. لذا موج انفجار میرا شده و انرژی خود را از دست داده و سرعت در طول سازه‌ی تونل کاهش می‌یابد. در شکل ۴-۱۳ میزان حداکثر سرعت المان‌ها به صورت نقطه‌ای در فاصله‌های تعیین شده آورده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان درک درستی از سرعت حداکثر ایجاد شده در المان‌ها و مقایسه‌ی نحوه‌ی انتشار موج انفجار در نقاط مختلف سازه‌ی نگهدارنده را داشت.



شکل ۴-۱۲ نمودار تاریخچه زمانی میزان سرعت در نقاط E1 تا E5.



شکل ۴-۱۳ میزان حداکثر سرعت نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر.

۴-۳-۲ بررسی پارامتر جابه‌جایی

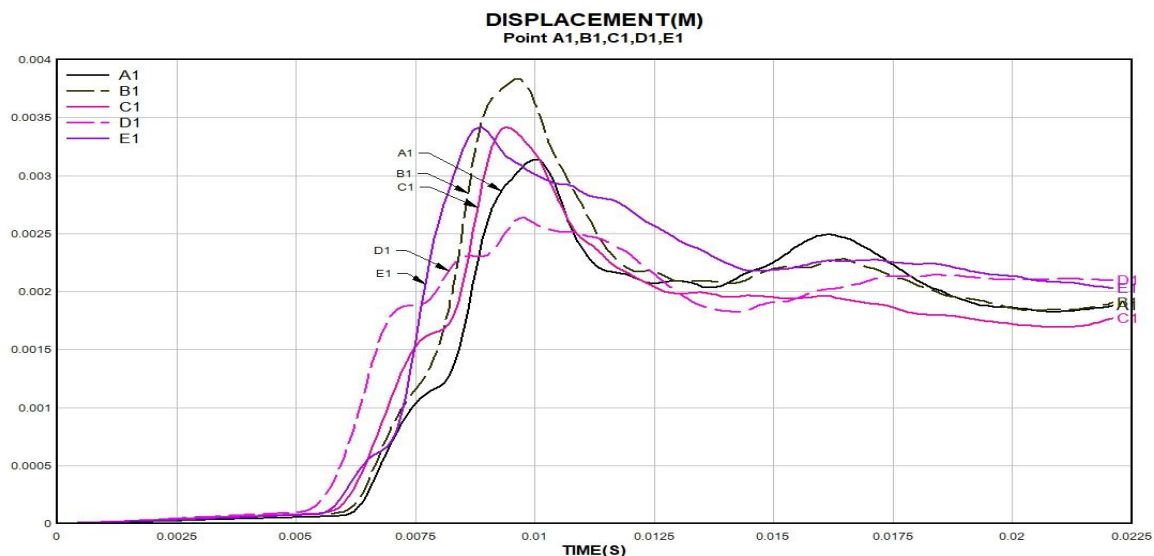
نمودارهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی نقاط موردنظر تونل در شکل ۴-۱۴ تا ۴-۲۰ آورده شده است. المان‌های نقاط دورتر از محل انفجار، به علت اینکه فشار انفجار کمتری را تجربه می‌کنند و تحت تأثیر خاصیت غیرخطی بتن قرار می‌گیرند، جابه‌جایی کمتری را تجربه می‌کنند.

همانند سرعت ایجاد شده در المان‌ها، همان‌طور که در شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود، جابه‌جایی در نقاط A1 تا E1، به دلیل نزدیکی به محل انفجار، دارای بیشینه مقدار است. روند تغییرات منحنی‌های سرعت، با منحنی‌های جابه‌جایی سازگار است. با توجه به موقعیت قرارگیری المان، که در کدام نقطه از سطح مقطع سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل قرار دارد، میزان جابه‌جایی متغیر است. مقدار جابه‌جایی در بدنه‌ی دیواره‌ی تونل (نقطه‌ی D1) برابر ۲.۶ میلی‌متر است که این مقدار در قوس بالای تونل (نقطه‌ی B1) به ۳.۸ میلی‌متر می‌رسد. همچنین مقدار جابه‌جایی در نقاط A1 و C1 و E1، به ترتیب برابر ۳.۲ میلی‌متر، ۳.۴۲ میلی‌متر و ۳.۴۱ میلی‌متر می‌باشد؛ بنابراین میزان حداکثر جابه‌جایی در محدوده‌ی B1 اتفاق می‌افتد. در محدوده‌های C1، E1، A1 و D1 میزان جابه‌جایی کاهش ۱۰٪، ۱۰٪، ۱۶٪ و ۳۲٪ نسبت به بالاترین میزان جابه‌جایی (نقطه‌ی B1) مشاهده می‌شود.

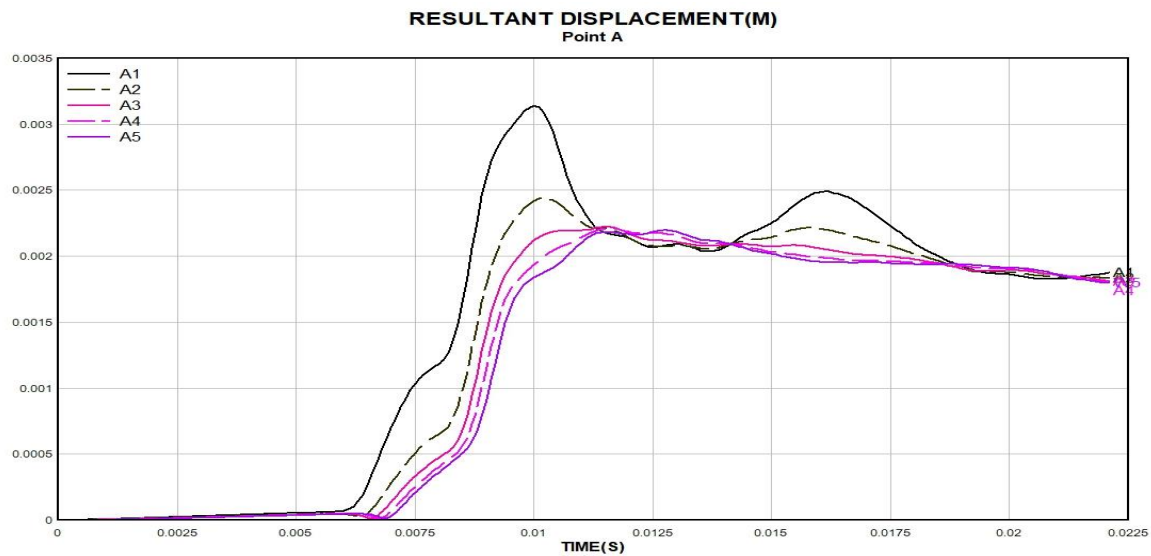
شکل ۴-۱۵ میزان جابه‌جایی در نقطه‌ی نشانه‌ی A را نشان می‌دهد. میزان حداکثر جابه‌جایی در نقطه‌ی A1 به مقدار ۳.۲ میلی‌متر و میزان کمترین جابه‌جایی در نقاط A3، A4 و A5 به مقدار ۲.۲ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴-۱۶ این میزان جابه‌جایی در نقطه‌ی B1 با ۱۸٪ افزایش نسبت به نقطه‌ی A1، به مقدار ۳.۸ میلی‌متر نشان داده شده است. مقدار جابه‌جایی در نقطه‌ی B2 برابر ۲.۶۵ میلی‌متر، در نقطه‌ی B3 برابر ۲.۴ میلی‌متر، در نقطه‌ی B4 برابر ۲.۳ میلی‌متر و در نقطه‌ی B5 برابر ۲.۲ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های نشانه‌ی A، در اینجا نیز در محدوده‌های ۳ و ۴ و ۵ اختلاف چندانی مشاهده نمی‌شود. میزان حداکثر و حداقل جابه‌جایی المان در نقطه‌ی C در شکل ۴-۱۷ آورده شده است. مقدار حداکثر در نقطه‌ی C1 برابر ۳.۴۲ میلی‌متر و میزان

حداقل در نقطه‌ی C5 برابر ۲.۲۵ میلی‌متر می‌باشد. بیشترین میزان در نقاط نشانه‌ی D و E در شکل‌های ۴-۱۸ و ۴-۱۹ آمده است که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۲.۶ و ۳.۴ می‌باشد.

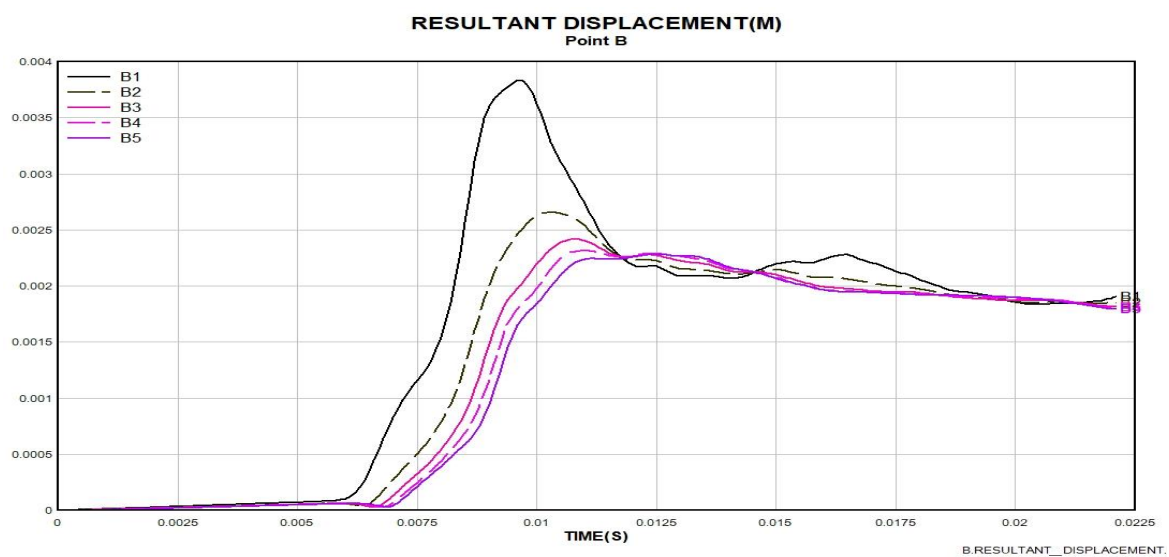
در شکل ۴-۲۰ مقدار دقیق حداکثر جابه‌جایی نقاط موردنظر و میزان کاهش آن‌ها در فاصله‌های مشخص آورده شده است. این نمودارها نشان می‌دهد که سازه‌ی تونل تحت انفجار سطح دچار تغییر شکل دائمی شده و حداکثر تغییر شکل باقیمانده، در نقطه B1 واقع در قوس بالای تونل رخ می‌دهد. تفاوت در رفتار تونل در این سه نقطه به دلیل تغییر فشار تولید شده توسط بارهای انفجار و همچنین به دلیل غیرخطی بودن بتن است. این تغییر مکان باقی‌مانده نشان‌دهنده‌ی وجود تغییر شکل پلاستیک در سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل تحت اثر بارهای انفجار است.



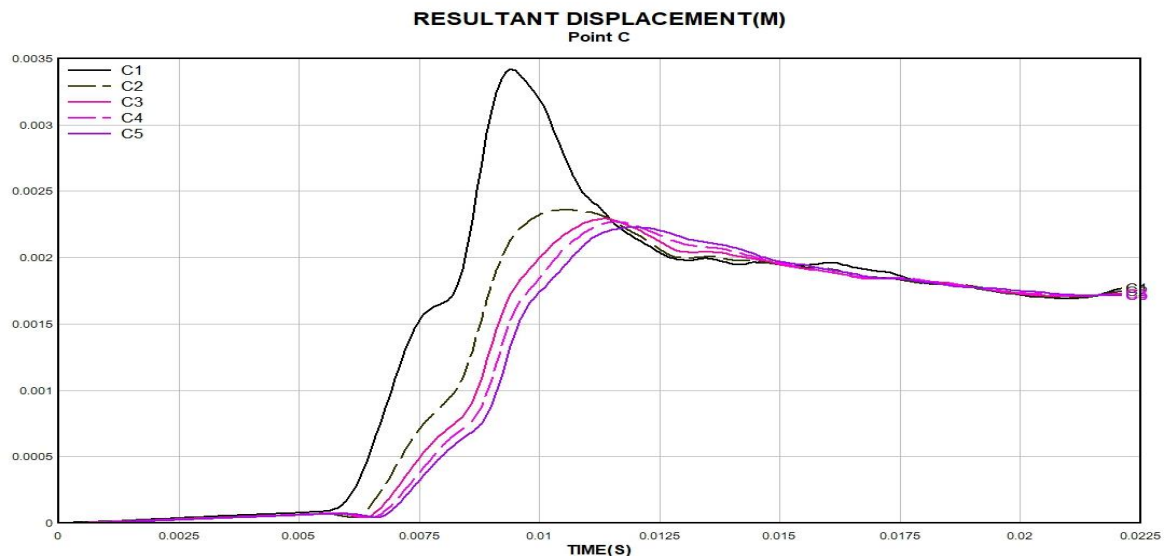
شکل ۴-۱۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط اصلی A1,B1,C1,D1,E1.



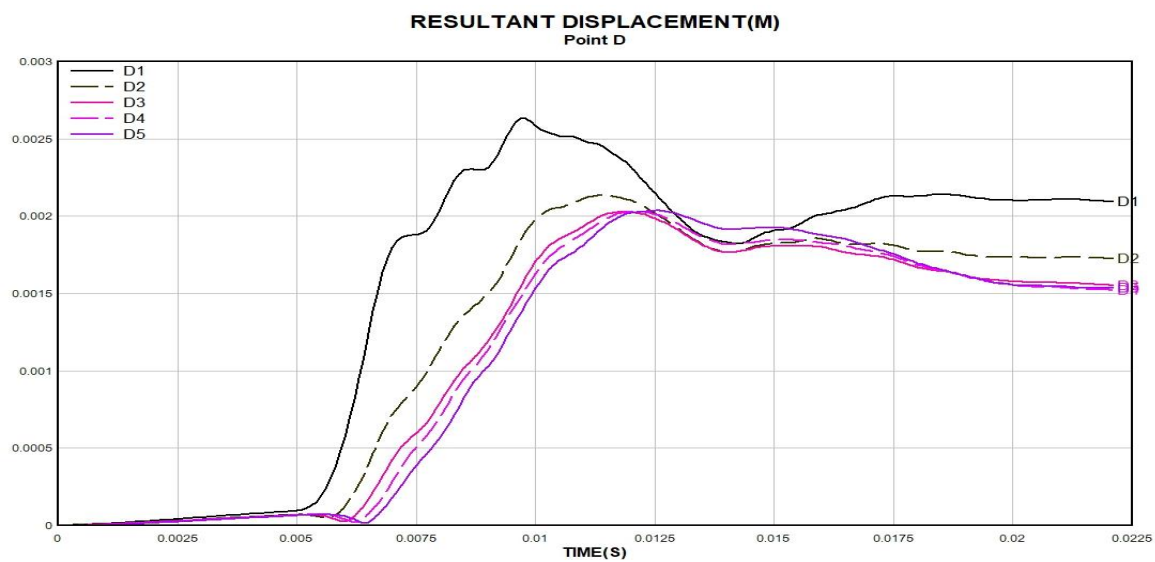
شکل ۴-۱۵ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط A1 تا A5.



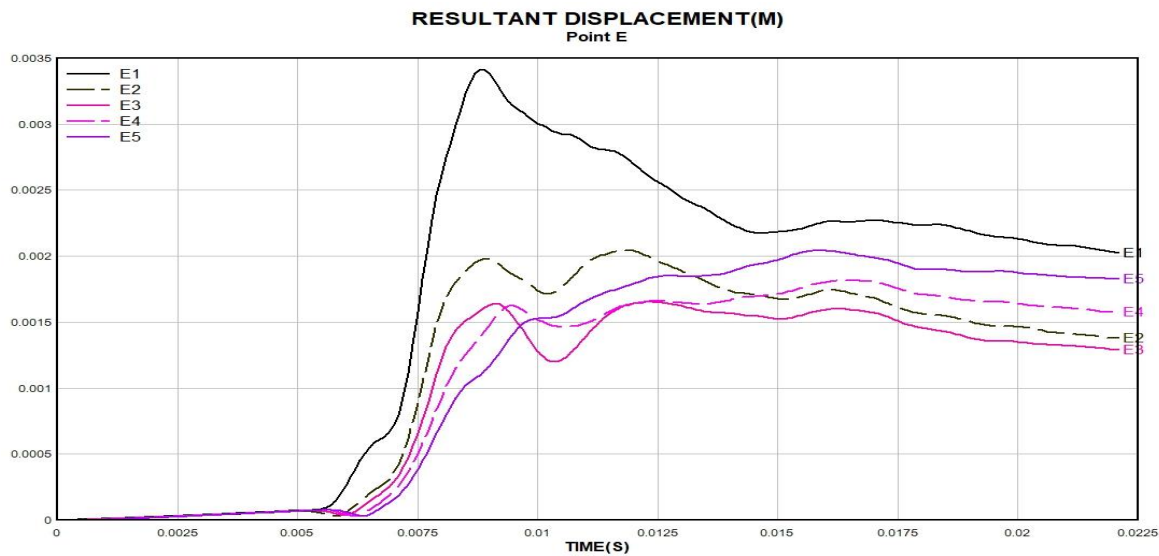
شکل ۴-۱۶ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط B1 تا B5.



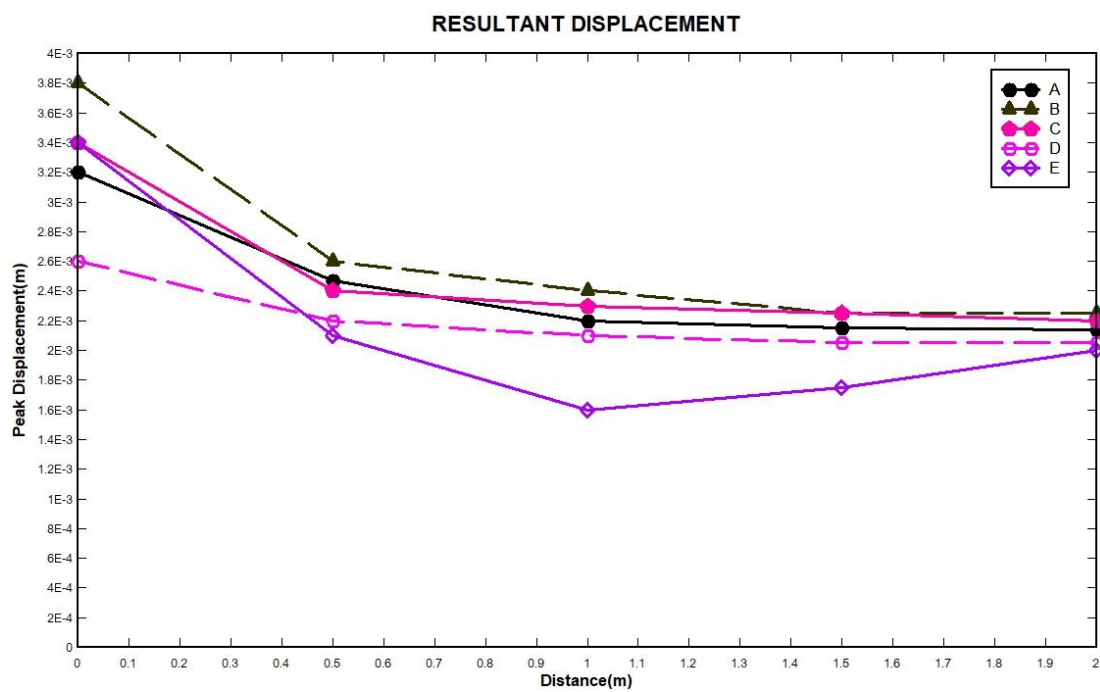
شکل ۴-۱۷ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط C1 تا C5.



شکل ۴-۱۸ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط D1 تا D5.



شکل ۴-۱۹ نمودار تاریخچه زمانی میزان جابه‌جایی در نقاط E1 تا E5.



شکل ۴-۲۰ میزان حداکثر جابه‌جایی نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر.

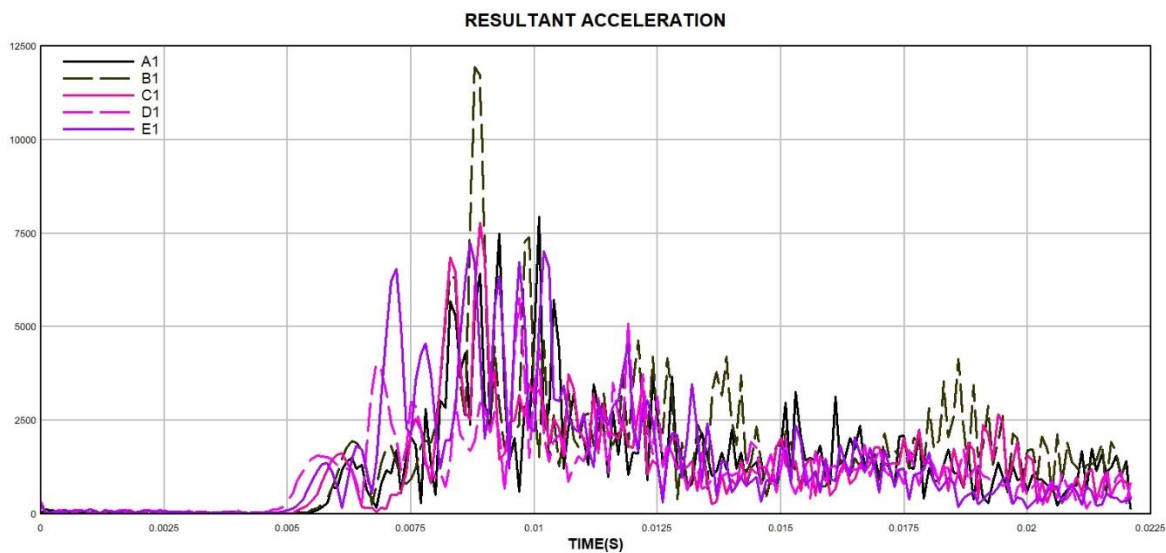
۴-۳-۳ بررسی پارامتر جنبش شتاب

علاوه بر بررسی پارامترهای سرعت و جابجایی، پارامتر جنبشی شتاب نیز برای المان‌های نشانه بررسی شده است که نشان می‌دهد بارگذاری ضربه‌ای که در این نقاط اعمال می‌شود به چه صورت است. پاسخ شتاب در نقاط موردنظر، در برابر انفجار نشان داده شده است. این شکل‌ها نشان‌دهنده ویژگی‌هایی مانند داشتن دامنه بالا، مدت زمان کوتاه و کاهندگی سریع تحت امواج ناشی از انفجار است.

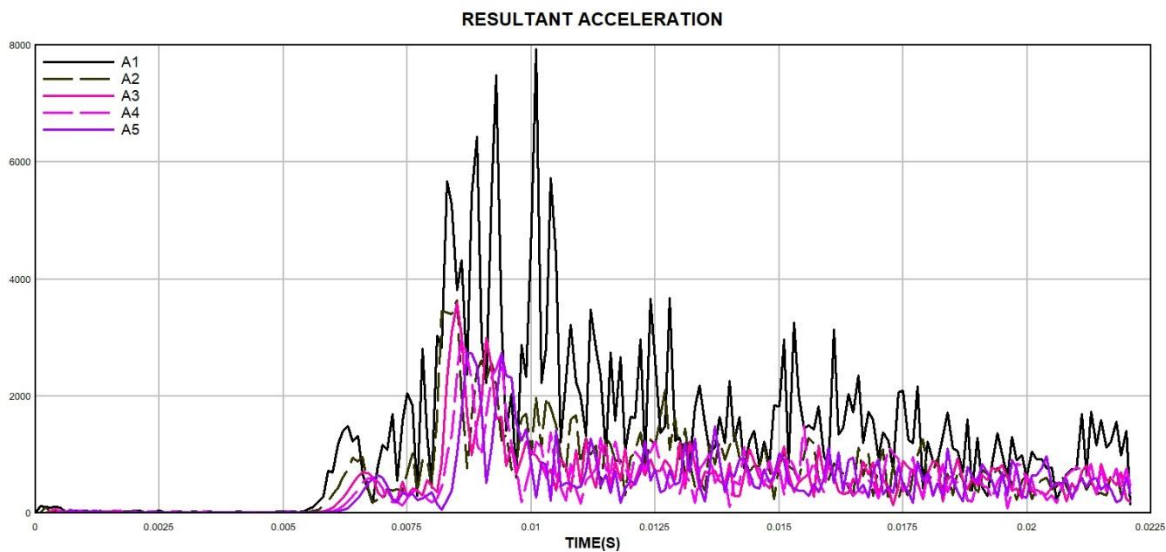
با توجه به شکل ۴-۲۱، میزان حداکثر شتاب در نقطه‌ی B1 که بیشترین مقدار را نسبت به نقاط دیگر دارد، به ۱۱۹۵۳ متر بر مجذور ثانیه در زمان ۸.۷ میلی‌ثانیه می‌رسد. میزان شتاب در نقطه‌ی A1 با کاهش ۳۴ درصدی، به ۷۹۳۳ متر بر مجذور ثانیه، در نقطه‌ی C1 با کاهش ۳۵ درصدی به ۷۷۸۶ متر بر ثانیه، در نقطه‌ی D1 با کاهش ۵۲ درصدی به ۵۷۵۸ متر بر مجذور ثانیه و در نقطه‌ی E1 با کاهش ۴۰ درصدی، به عدد ۷۲۴۸ متر بر مجذور ثانیه می‌رسد.

میزان شتاب در محدوده‌های A، B، C، D و E در شکل‌های ۴-۲۲ تا ۴-۲۶ آمده است. نتایج نشان می‌دهد، در محدوده‌ی ۲، کاهش شدید جنبش شتاب نسبت به محدوده‌ی ۱ وجود دارد. سپس این میزان شتاب دچار ثبات نسبی می‌شود و تفاوت چندانی نسبت به نقاط دیگر ندارد. در شکل ۴-۲۲ میزان شتاب از ۷۹۳۳ در نقطه‌ی A1 به ۲۷۵۰ در نقطه‌ی A5 می‌رسد. میزان پارامتر جنبش شتاب در نقطه‌ی B در شکل ۴-۲۳ آورده شده است. در نقطه B1، که بیشترین میزان شتاب سازه‌ی تونل می‌باشد، شتاب برابر ۱۱۹۵۳ و در نقطه‌ی B5، شتاب برابر ۲۷۰۰ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۴-۲۴، ۴-۲۵ و ۴-۲۶، همان‌طور که میزان شتاب حداکثر در محدوده‌ی ۱، در قسمت بالا آمده، میزان شتاب در نقاط C5، D5 و E5 با کاهش ۷۲٪، ۷۹٪ و ۶۸٪ به مقادیر ۲۲۲۰، ۱۲۵۰ و ۲۳۵۰ متر بر مجذور ثانیه می‌رسد. همانند نمودارهای سرعت ایجاد شده در المان، اولین مقادیر شتاب در المان، در زمان حدود ۶ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد و ولی مقدار آن کم می‌باشد، که این نشان‌دهنده‌ی رسیدن موج انفجار چال‌های میانی که در زمان‌های زودتر از ۶ میلی‌ثانیه منفجر

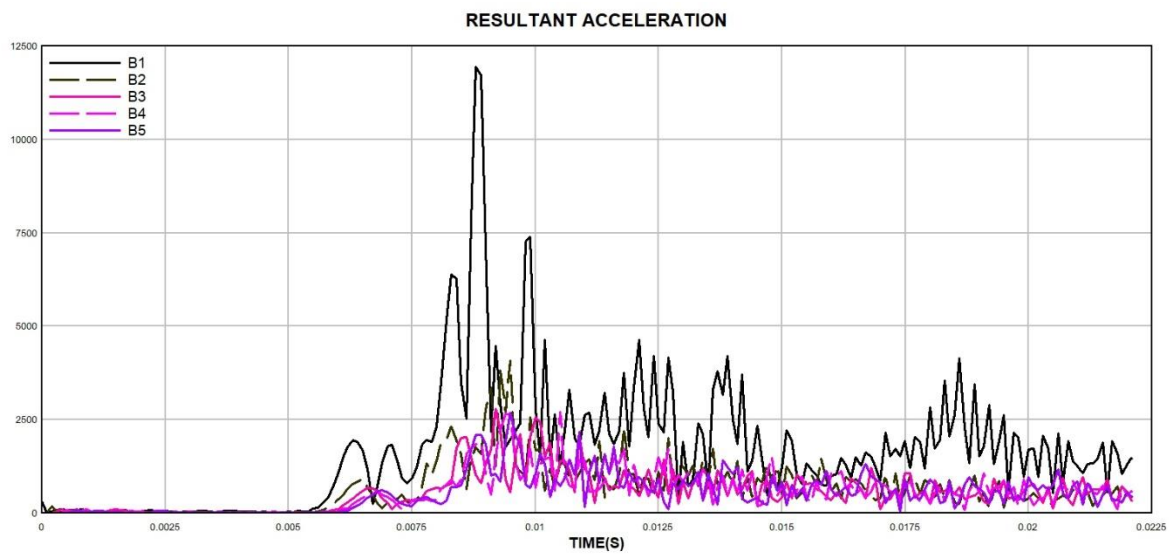
شده‌اند می‌باشد. اما مقادیر حداکثر شتاب، در زمان حدود ۸ میلی ثانیه، و پس از انفجار هفتم، که نزدیک‌ترین فاصله را به محل المان‌ها دارد و بیشترین حجم ماده‌ی منفجره، در این تأخیر، منفجر می‌شود، رخ می‌دهد.



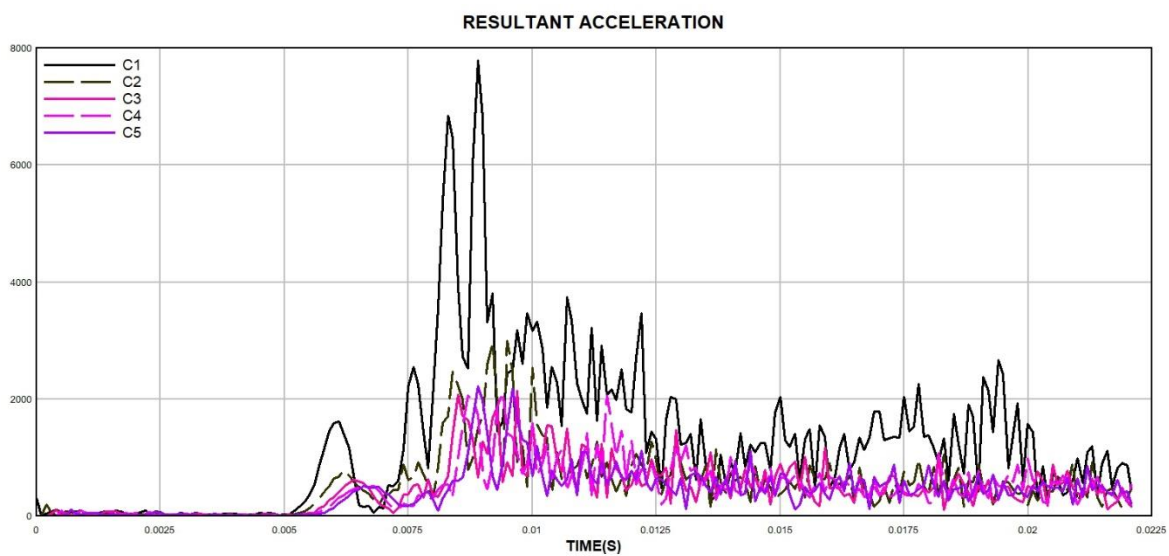
شکل ۴-۲۱ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط نشانه A1,B1,C1,D1,E1.



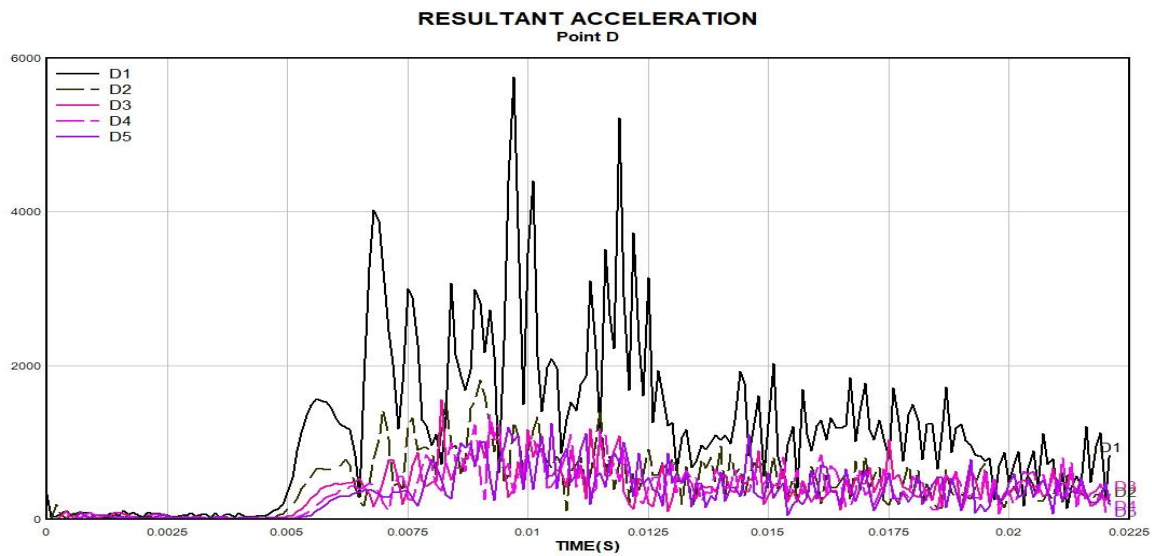
شکل ۴-۲۲ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط A1 تا A5.



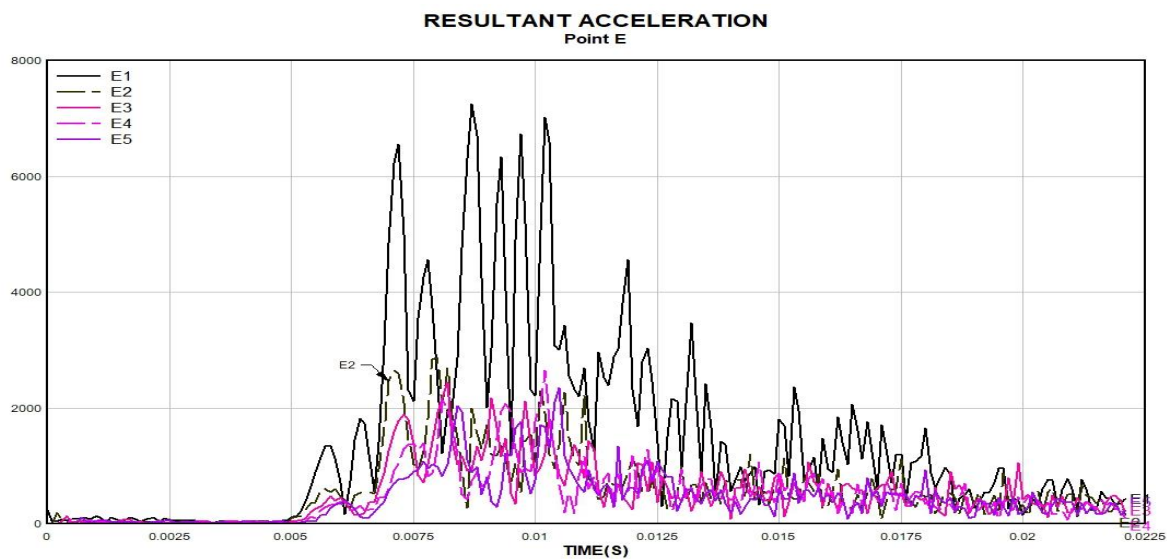
شکل ۴-۲۳ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط B1 تا B5.



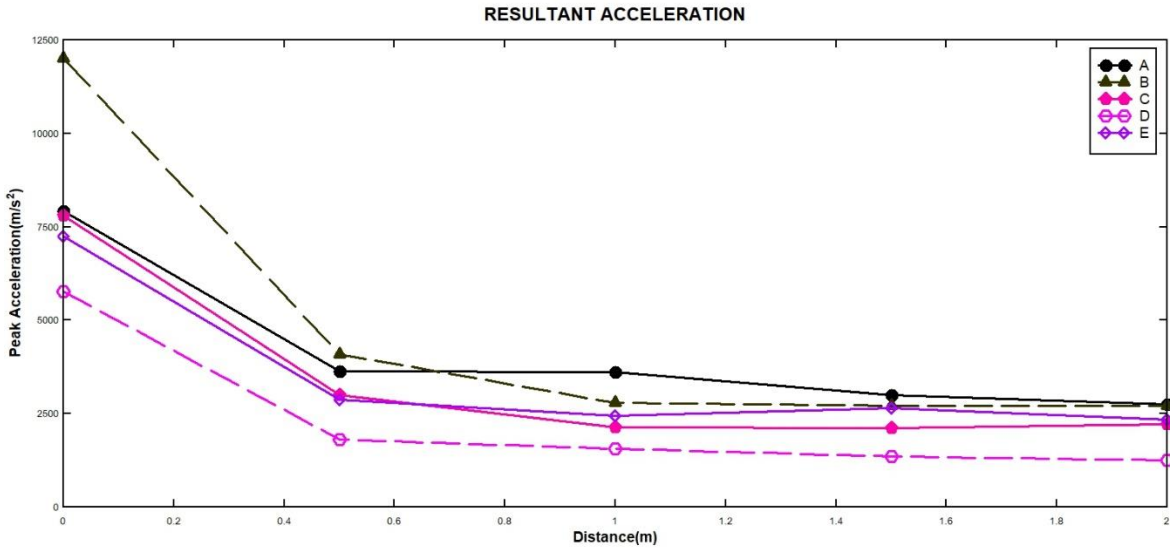
شکل ۴-۲۴ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط C1 تا C5.



شکل ۴-۲۵ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط D1 تا D5.



شکل ۴-۲۶ نمودار تاریخچه زمانی میزان شتاب در نقاط E1 تا E5.

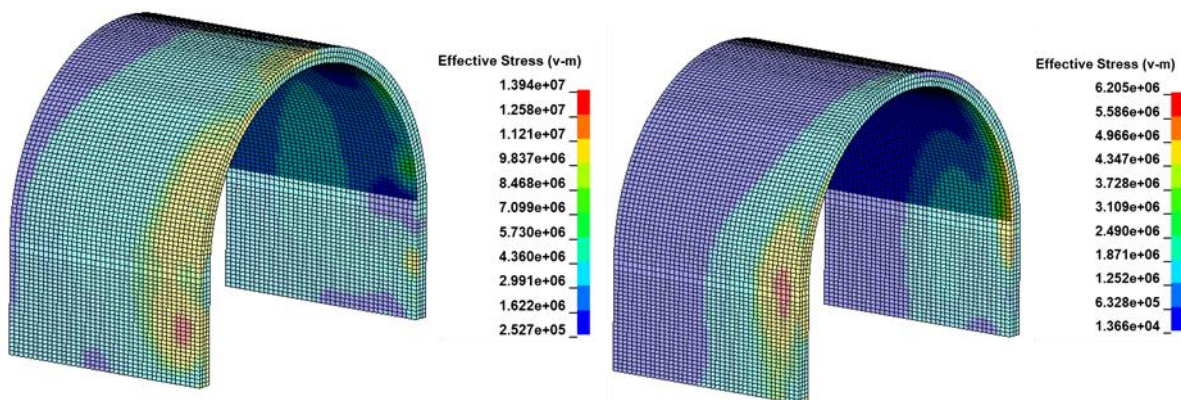


شکل ۴-۲۷ میزان حداکثر شتاب نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر.

۴-۳-۴ تنش مؤثر المان‌ها

تنش مؤثر ون مایسز به عنوان معادل غیر محوری برای تنش چند محوری در نظر گرفته شده در بسیاری از معیارهای تخریب و تسلیم استفاده می‌شود؛ بنابراین، اگر ماده‌ای در آزمایش فشار غیرمحوری (σ_1) تنها مؤلفه غیر صفر تنش باشد) به تخریب برسد، هنگامی که $\sigma_1 = \sigma_{crit}$ باشد، سازه‌ی موردنظر در بارهای چند محوری نیز تخریب خواهد شد [۳۶].

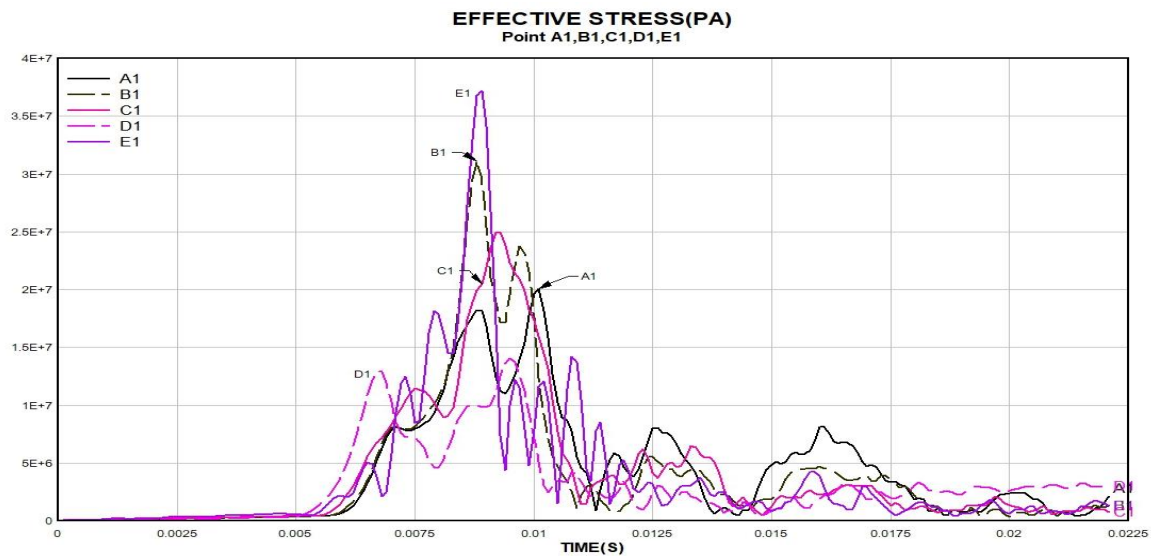
شکل ۴-۲۸ کانتور تنش مؤثر در پوشش سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل در معرض انفجار را نشان می‌دهد. تغییر رنگ از آبی به قرمز نشان‌دهنده افزایش تنش مؤثر است. در طول تعامل بین موج ضربه‌ی انفجار و سازه نگهدارنده‌ی موقت تونل، تنش در امتداد جهت‌های طولی و عرضی تونل گسترش می‌یابد تا زمانی که کل پوشش تحت بارگذاری‌های انفجار قرار می‌گیرد. تمرکز تنش عمدتاً به دلیل ساختار تونل در گوشه دیوار جانبی رخ می‌دهد. همچنین در برخی نقاط به طور قابل توجهی اثر بازتابش موج را تقویت می‌شود و در نتیجه قدرت موج ضربه انفجار را افزایش می‌یابد.



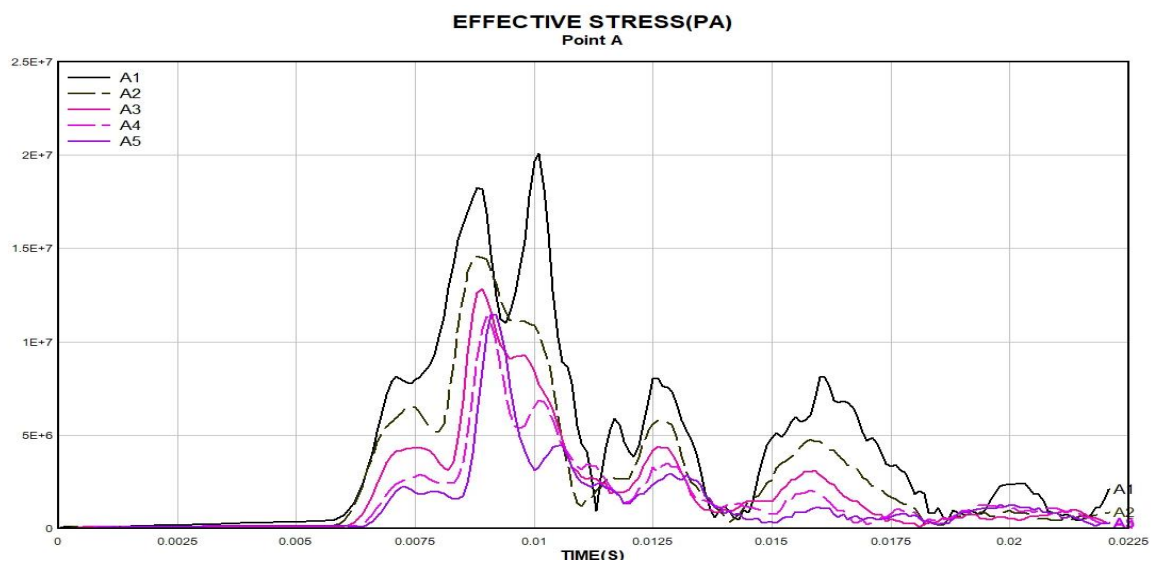
شکل ۴-۲۸ کانتور تنش مؤثر در پوشش سازه‌ی نگهدارنده‌ی موقت تونل.

در شکل ۴-۲۹ دیده می‌شود که قله دوم برای نقطه A1، بالاتر از قله اول برای این نقطه است. دلیل آن را می‌توان با فاصله نزدیک آن از منطقه سطح و انفجار توضیح داد. مقدار اوج اول توسط موج زمین ایجاد می‌شود و دومی توسط موج شوک هوا و موج منعکس شده زمین ایجاد می‌شود [۳۴].

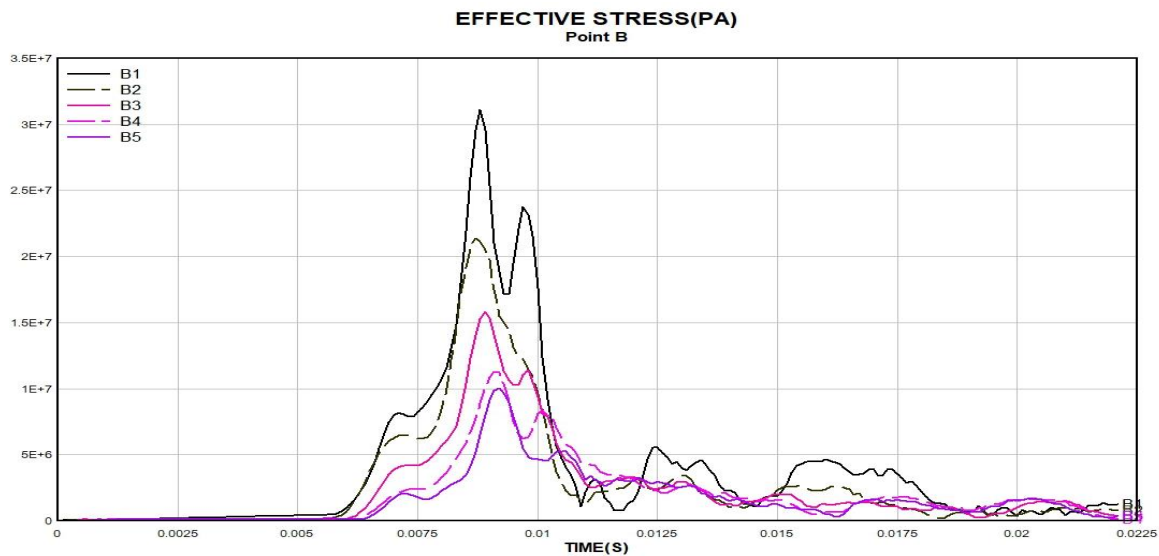
در بررسی‌های انجام شده، با توجه به شکل ۴-۳۵ بیشترین میزان تنش وون مایسز در نقطه‌ی E1 و کمترین میزان آن در نقطه‌ی A5 اتفاق می‌افتد. باتوجه به شکل ۴-۲۹ مشاهده می‌شود که میزان تنش وون مایسز در نقاط A1، B1، C1، D1 و E1 به ترتیب برابر ۲۰، ۳۱، ۲۴.۹، ۱۴ و ۳۷.۲ مگاپاسکال می‌باشد. در شکل ۴-۳۰ حداکثر تنش مؤثر به ۲۰ مگاپاسکال در نقطه‌ی A1 می‌رسد. نقاط A2، A3، A4 و A5 به ترتیب با کاهش ۲۷٪، ۳۶٪، ۴۳٪ و ۴۳٪ به مقادیر ۱۴.۶، ۱۲.۸، ۱۱.۴ و ۱۱.۴ مگاپاسکال می‌رسد. همچنین مقادیر تنش مؤثر در المان‌های B، C، D و E به ترتیب در شکل‌های ۴-۳۱ الی ۴-۳۵ آمده است. میزان کاهش تنش مؤثر در این نقاط، با توجه به بیشترین مقادیر ایجاد شده در المان‌ها، در نقطه‌ی B برابر ۶۸٪، در نقطه‌ی C برابر ۶۶٪، در نقطه‌ی D برابر ۵۶٪ و در نقطه‌ی E برابر ۸۵٪ می‌باشد. با توجه به اینکه بیشترین مقدار تنش مؤثر، در محدوده‌ی E اتفاق می‌افتد، بیشترین میزان کاهش هم در این نقطه قرار دارد.



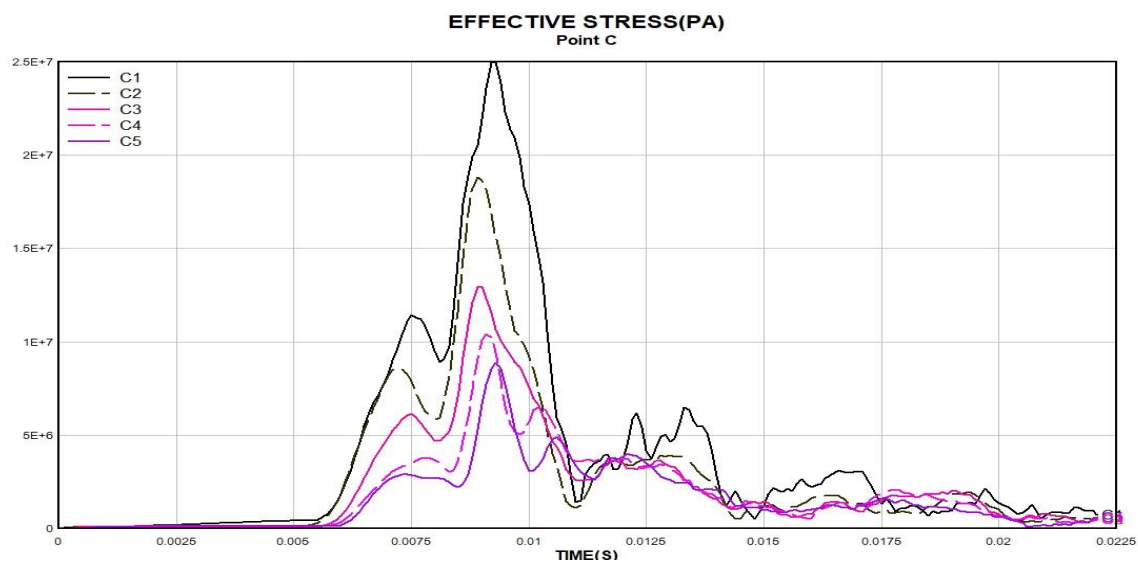
شکل ۴-۲۹ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط نشانه A1,B1,C1,D1,E1.



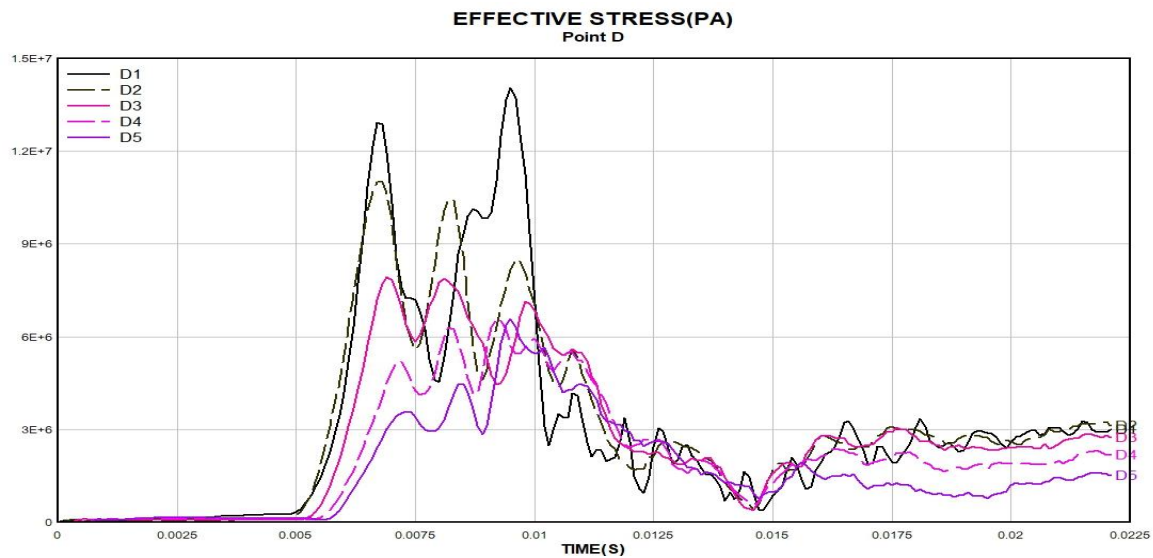
شکل ۴-۳۰ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط A1 تا A5.



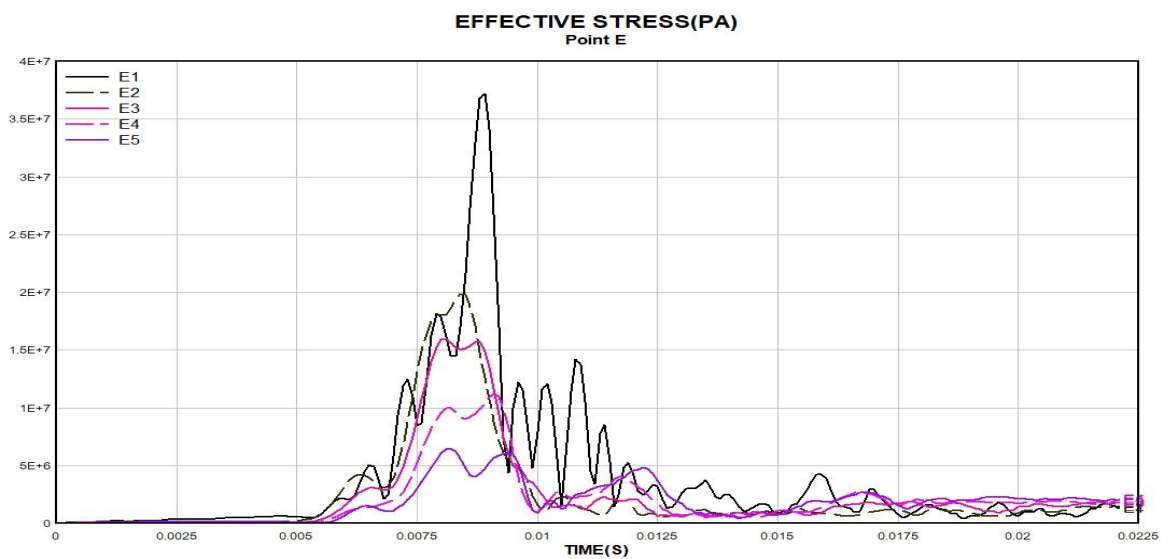
شکل ۴-۳۱ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط B1 تا B5.



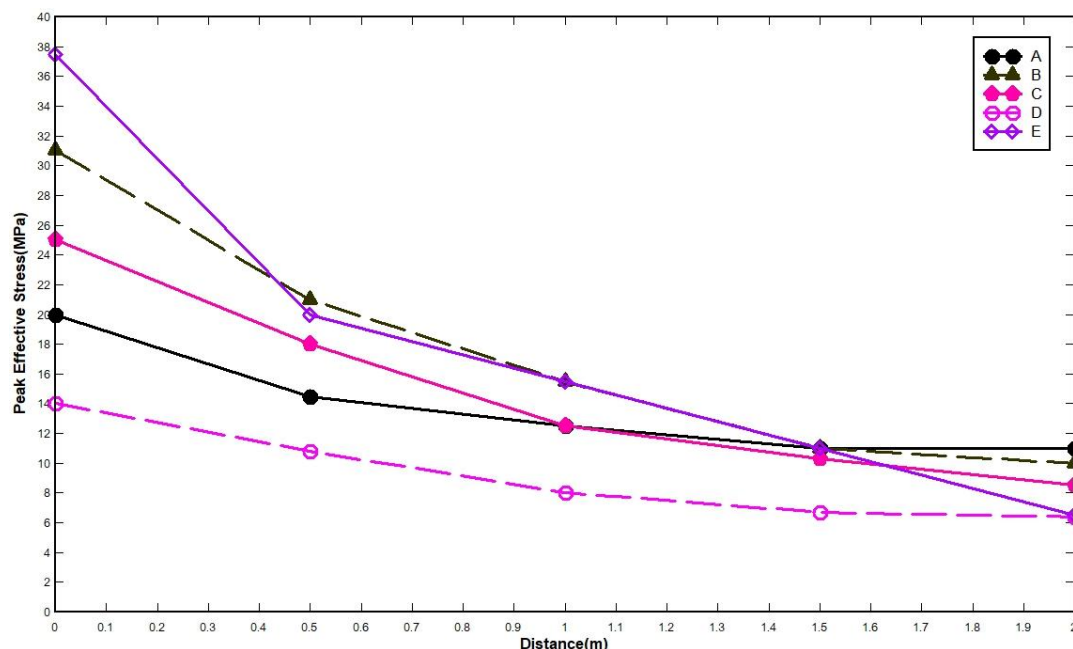
شکل ۴-۳۲ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط C1 تا C5.



شکل ۴-۳۳ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط D1 تا D5.



شکل ۴-۳۴ نمودار تاریخچه زمانی تنش مؤثر در نقاط E1 تا E5.



شکل ۴-۳۵ میزان حداکثر تنش مؤثر نقاط مورد بررسی در فواصل موردنظر.

۴-۴ ارزیابی آسیب

این مطالعه با هدف تعیین قابلیت اطمینان معیارهای خسارت با استفاده از روش حداکثر سرعت ذرات (PPV) و برای ارزیابی سطح آسیب این تونل زیرزمینی اتخاذ شده است. تحت تأثیر موج ناشی از انفجار، اگر تنش در دیواره تونل به مقاومت جرم سنگ برسد، ممکن است شکست شکننده ایجاد شود [۳۷]. به دست آوردن معیار آسیب پذیرفته شده به طور کلی بسیار دشوار است، زیرا شامل بسیاری از عوامل است. به طور کلی، درجه آسیب ناشی از انفجار به پارامترهای زیادی بستگی دارد که شامل مقدار ماده منفجره، شکل بار، عمق انفجار، نوع خاک و خصوصیات آن است. برخی معیارهای سرعت تجربی برای ارزیابی شکست احتمالی ساختار زیرزمینی وجود دارد. هندرون (۱۹۷۷) به جمع‌آوری داده‌های انفجارهای ارتش آمریکا در نزدیکی تونل‌های در محیط ماسه سنگی پرداخت. مشخص شد که به طور متوسط هیچ خرابی‌ای در تونل‌ها رخ نمی‌دهد تا اینکه سرعت از ۰.۹ متر بر ثانیه فراتر رود. در این گزارش، خسارت (آسیب) به چهار گروه تقسیم شد: خرابی غیردائمی، خرابی

موضعی ، خرابی کلی و از بین رفتن شدید. جدول نشان می‌دهد که معیار آسیب سرعت تونل برای مناطق مختلف آسیب دیده است [۳۸].

لذا با توجه به اندرکنش و چسبیدگی بین سنگ و سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل، میزان سرعت ایجاد شده در المان‌های سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل به بالاتر از ۰.۹ متر بر ثانیه برسد، مراتب خرابی در آن با توجه به جدول ۴-۱ ایجاد می‌شود [۲۲].

جدول ۴-۱ نوع آسیب سازه بر اساس سرعت بیشینه.

ناحیه آسیب	نوع آسیب	بیشینه سرعت ذره‌ای (متر بر ثانیه)
۱	خرابی کلی (GF)	۱۲
۲	خرابی موضعی (LF)	۴
۳	خرابی غیردائمی (IF)	۰.۹ - ۱.۸
۴	عدم خرابی (NF)	۰.۹ - ۰

با توجه به شکل ۴-۱۵ و همچنین جدول ۴-۱، میزان سرعت ایجاد شده در المان به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول در محدوده‌ی ناحیه آسیب ۲، دسته‌ی دوم در محدوده‌ی ناحیه آسیب ۳ و دسته‌ی سوم، المان‌هایی هستند که سرعتی کمتر از ۰.۹ متر بر ثانیه دارند.

با توجه به سرعت بالاتر از ۱.۸ متر بر ثانیه، در نقاط A1، A2، B1، C1 و E1، در دسته اول قرار دارند و ترک‌های متراکم درون پوشش آن‌ها گسترش یافته و تحت تنش‌های فشاری و کششی بالا این ترک‌ها به هم

متصل می‌شوند، و پوشش دست‌نخورده به ساختارهای بلوکی تقسیم می‌شود. در نتیجه منجر به از دست دادن ثبات کلی و تشکیل یک منطقه آسیب‌دیده می‌شود؛ لذا تخریب در این نقاط اتفاق می‌افتد.

در منطقه فراتر، مورد بررسی از محل انفجار، برای نقاط A3، A4، A5 و نقاط B2 تا B5 و نقاط C2 تا C5 و همچنین نقاط E2 تا E4، یک منطقه‌ی به‌طورکلی آسیب‌دیده تشکیل شده است که در آن ترک‌هایی در سراسر پوشش تشکیل شده است. از طرفی، بی‌ثباتی در سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل به طور عمده، به طاق آن مرتبط می‌شود؛ لذا این ناحیه دارای آسیب‌پذیری می‌باشد.

کمترین میزان آسیب، مربوط به نقاطی است که در دسته‌ی سوم، یعنی المان‌هایی با سرعت کمتر از ۰.۹ متر بر ثانیه، قرار دارند. شامل نقاط E5 و همچنین D2 تا D5 است که نشان‌دهنده‌ی دیواره‌ی کناری سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل است. در این نقاط تخریب در سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل تحت آتش‌باری سینه‌ی کار ایجاد نمی‌شود.

نوع خرابی ایجاد شده در نقاط مورد بررسی، با توجه به جدول ۴-۱ و همچنین توضیحات داده شده، در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲ درجه‌ی خسارت در نقاط مورد بررسی.

	محدوده				
	۱	۲	۳	۴	۵
A	LF	LF	IF	IF	IF
B	LF	IF	IF	IF	IF
C	LF	IF	IF	IF	IF
D	IF	NF	NF	NF	NF
E	LF	IF	IF	IF	NF

۵. فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

یک مدل عددی کامل برای شبیه سازی رفتار سازه ی نگهدارنده ی موقت تونل تحت تأثیر بارهای انفجاری آتشباری در محیط سنگی، توسعه یافته و در این پایان نامه ارائه شده است. تجزیه و تحلیل روند انفجار چال های انفجاری، انتشار امواج تنش از طریق محیط سنگ، سرعت و شتاب ایجاد شده در المان های سازه ی نگهدارنده و پاسخ آن، نشان می دهد یک پیشرفت قطعی نسبت به شبیه سازی های قبلی انجام شده است.

با بررسی و مقایسه انفجار در هوا و سنگ با مقالات موردنظر برای صحت سنجی، مشاهده می شود که

۱. در هوا، میزان اختلاف نتایج عددی و نتایج تجربی فشار به دست آمده، باتوجه به فاصله های ۰.۵، ۱،

۱.۵، ۲، ۲.۵ و ۲.۸ متری از محل انفجار به ترتیب برابر ۱۵، ۲۲، ۴۰، ۵، ۵ و ۷ درصد می باشد.

۲. در سنگ، باتوجه به فاصله ی نقطه ی اندازه گیری و مقایسه ی آن با نتایج عددی، به طور میانگین ۱۳

درصد اختلاف در میزان سرعت اندازه گیری شده، مشاهده می شود.

معیار سرعت حداکثر ذره ای (PPV) جهت ارزیابی ایمنی تونل تحت بارهای دینامیکی، در نظر گرفته شده است.

در صورتی که سرعت ایجاد شده در المان ها از ۰.۹ متر بر ثانیه بیشتر شود، مراتب تخریب آن ها ایجاد می شود.

طی بررسی المان های سازه ی نگهدارنده ی موقت تونل، مشاهده می شود که این سازه، در نزدیک ترین محل به

سینه ی کار تونل دچار تخریب، و تا فاصله ی ۲ متر از آن نیز، دچار آسیب می شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی مقطع معادل نگهدارنده ی تونل، که به صورت D شکل می باشد،

مشاهده می شود:

۱. بیشترین میزان سرعت ایجاد شده در سازه ی موقت نگهدارنده ی تونل، مربوط به نقطه ی B1، با سرعت

۲.۹ متر بر ثانیه است. باتوجه به ارزیابی ایمنی تونل، می توان در این نقطه خرابی موضعی داشت که

این امر، نیازمند تقویت مقطع یا استفاده از الگوی آتشیاری دیگری با بار انفجاری کمتر، می‌باشد. البته این اتفاق در نقاط E1، C1 و A1 با سرعت‌های به ترتیب برابر ۲.۶، ۲.۳ و ۲.۲۵ متر بر ثانیه نیز می‌افتد.

۲. جابجایی دیواره‌ی سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل در نقاط مورد نظر، اندازه‌گیری شد. حداکثر تغییر شکل باقیمانده در نقطه‌ی B اتفاق افتاده است. تفاوت رفتار تونل در این نقاط، متأثر از تغییر در فشار تولید شده توسط بارهای انفجاری است که ناشی از غیرخطی بودن شاکریت می‌باشد.

۳. سازه‌ی تونل تا فاصله‌ی ۲ متر از محل انفجار نسبت به فواصل بعد از آن، آسیب پذیر تر است. همچنین در نقاط A و B قطعاً دچار خرابی و ترک می‌شود؛ لذا پیشنهاد می‌شود ضخامت مقطع سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل در این قسمت، به خصوص محدوده‌ی تاج تونل است، افزایش یابد.

۴. تناسب پارامترهای اندازه‌گیری شده‌ی سرعت، جابجایی، شتاب و تنش موثر با یکدیگر مشهود است. این پارامترها، با توجه به فاصله از محل انفجار و میرایی موج انفجار در سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل، مورد کاهش قرار می‌گیرند.

۵. نتایج به دست آمده، اهمیت پاسخ سازه‌ی به اولین موج ناشی از بار انفجار در المان‌ها، که حداکثر مقدار وارده به المان‌ها هست را برجسته می‌کند.

۵-۲ پیشنهادها

برای بررسی کامل نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی با کیفیت خوب وجود دارد. با توجه به کارهای انجام شده، به منظور بررسی ابعاد بیشتر پژوهش موردنظر، می‌توان مدل‌سازی را به چند گروه تقسیم کرد و با توجه به آن گستردگی کار، آن را مورد بررسی قرار داد:

۱. استفاده از مدل‌های مختلف سنگ در طبقه بندی‌های RMR و Q

۲. با توجه به فاصله گذاری لیس ها، ضخامت مقطع معادل تغییر می کند؛ لذا می توان از لیس ها با فاصله گذاری های متفاوت استفاده کرد و تاثیر عملیات آتشباری بر سازه ی نگهدارنده را مورد بررسی قرار داد.

۳. عملیات آتشباری و الگوی مورد استفاده برای پیشروی در تونل، بسته به موقعیت تونل و نظر مهندس معدن، می تواند متفاوت با طراحی آتشباری باشد. با مطالعه در این مورد و استفاده از الگوی آتشباری متفاوت، می توان تاثیرات این الگوها را بر روی سازه ی نگهدارنده مورد بررسی قرار داد و الگوی مناسب تری جهت پیشروی سینه ی کار پیدا کرد.

همه ی پیشنهادات ذکر شده، می تواند باعث بسط و گسترش تحقیقات مربوط به عملیات حفاری تونل توسط مواد منفجره شود و همچنین می تواند به هرچه بهینه تر شد و ایمن تر شدن این عملیات در پروژه های مختلف کمک کند.

- [1] S. Kim, Y. J. Kang, T.-H. Han, J.-S. Baek, and Y.-J. Kang, "Evaluation of the Structural Performance of Tetragonal Lattice Girders Feasibility," *Int. J. Steel*, vol. 13, no. 1, pp. 31–47, 2013.
- [2] نشریه ۳۰۹. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۴.
- [3] ح. مدنی، تونل سازی، جلد سوم، طراحی و اجرای سیستم نگهداری، چاپ سوم. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [4] "New Austrian Tunneling Method (NATM) |." [Online]. Available: <http://www.railsystem.net/natm/>. [Accessed: 19-Nov-2020].
- [5] ح. مدنی، تونلسازی، چاپ یکم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۵.
- [6] C. C. Li, "Principles of rockbolting design," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 396–414, Jun. 2017.
- [7] S. Austin, P. Robins, and P. Robins, *Sprayed concrete: Properties, design and application*. 1995.
- [8] م. ش. ولی، "شبیه سازی بار دینامیکی ناشی از انفجار در سازه های زیرزمینی (مطالعه موردی: تونل متروی تهران)،" دانشگاه آزاد شاهرود، ۱۳۹۵.
- [9] F. Tahmasbi, S. Maleki, M. Shariati, N. H. Ramli Sulong, and M. M. Tahir, "Shear capacity of C-shaped and L-shaped angle shear connectors," *PLoS One*, vol. 11, no. 8, Aug. 2016.
- [10] A. Thomas, *Sprayed concrete lined tunnels*. 2008.
- [11] ح. مدنی، طراحی و اجرای سیستم نگهداری، تونلسازی، جلد چهارم، چاپ چهارم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۸.
- [12] E. Hoek, P. K. Kaiser, and W. F. Bawden, "Support of underground excavation in hard rock: Rotterdam," *AA Balkema*, 1995.

- [13] C. Komselis, ... N. B.-... 2002: M. T., and undefined 2002, "The use of lattice girders in the construction of tunnels," *search.informit.com.au*.
- [14] E. H. Hjálmarsson, "Tunnel Support. Use of Lattice Girders in Sedimentary Rock." 2011.
- [15] D. Labrie, C. Doucet, and M. Plouffe, "Design guidelines for the dynamic behaviour of ground support tendons: Phase 1, Technical information data sheets," *WSIB/RAC Bridg. Gap. CANMET-MMSL 08-008*, p. 2014, 2008.
- [16] ج. زمانی, مقدمه ای بر مکانیک انفجار, چاپ یکم. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی, ۱۳۹۱.
- [17] T. Krauthammer, *Modern protective structures*. 2008.
- [18] ج. بی طرفان, "بررسی پارامترهای بارگذاری و شبیه سازی اثر پاسخ انفجار بر روی سازه زیرزمینی احاطه شده در محیط خاکی اشباع," دانشگاه صنعتی شیراز, ۱۳۹۲.
- [19] J. Zhao *et al.*, "Rock dynamics research related to cavern development for ammunition storage," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 513–526, 1999.
- [20] C. Wu, Y. Lu, and H. Hao, "Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion," *Int. J. Numer. Anal. methods Geomech.*, vol. 28, no. 1, pp. 93–109, 2004.
- [21] K. S. Luo, Y. WANG, Y. ZHANG, and L. HUANG, "Numerical simulation of section subway tunnel under surface explosion," *J. PLA Univ. Sci. Technol. (Natural Sci. Ed.)*, vol. 6, 2007.
- [22] B. Mobaraki and M. Vaghefi, "Numerical study of the depth and cross-sectional shape of tunnel under surface explosion," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 47, no. February, pp. 114–122, 2015.
- [23] N. Jiang, T. Gao, C. Zhou, X. L.-T. and underground space, and undefined 2018, "Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel," *Elsevier*.
- [24] Z. Li, S. Wu, Z. Cheng, and Y. Jiang, "Numerical Investigation of the Dynamic Responses and Damage of Linings Subjected to Violent Gas Explosions inside Highway Tunnels," *Shock Vib.*, vol. 2018, 2018.

- [25] J. Wang, Y. Yin, and C. Luo, "Johnson–Holmquist-II (JH-2) constitutive model for rock materials: parameter determination and application in tunnel smooth blasting," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 9, p. 1675, 2018.
- [26] م. ترکمانه, "بررسی تاثیر تراکم پذیری خاک بر پاسخ تونل دایروی کم عمق تحت انفجار داخلی," "دانشگاه ملایر, ۱۳۹۶.
- [27] م. شهری و ا. رحمتی علایی, *آنالیز دینامیک غیرخطی به کمک نرم افزار LS-DYNA*. فدک ایستاتیس, ۱۳۹۳.
- [28] N. V. P. R. Administration, *Road Tunnels: Norwegian Design Guide*. Public Roads Administration, Norway, 1990.
- [29] U. S. B. of Reclamation, *Engineering geology field manual*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1991.
- [30] J. O. Hallquist, "LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL Volume I," *LSTC, Version*, vol. 971, 2009.
- [31] W. LSTC, "LS-DYNA Keyword user's manual Volume II." 2012.
- [32] ص. سلیمانی, "طراحی سیستم نگهداری شاکریت مسلح به لتیس گیردر و تحلیل خواص هندسی و مقاومتی لتیس گیردر در تونلهای ناتم (مطالعه موردی تونل حکیم)," "دانشگاه صنعتی شاهرود, ۱۳۹۵.
- [33] J. Fu, J. Xie, S. Wang, J. Yang, F. Yang, and H. Pu, "Cracking Performance of an Operational Tunnel Lining Due to Local Construction Defects," *Int. J. Geomech.*, vol. 19, no. 4, p. 04019019, Apr. 2019.
- [34] J. Henrych and R. Major, *The dynamics of explosion and its use*, vol. 569. Elsevier Amsterdam, 1979.
- [35] N. Jiang and C. Zhou, "Article in Tunnelling and Underground Space Technology," *Elsevier*, 2012.
- [36] پیمان, صفا و پارسا, "تحلیل اثرات انفجاری بر روی تونل های زیر زمینی," *پدافند غیرعامل*, vol. 8, no. 1, pp. 1–12.
- [37] J. C. Li, H. B. Li, G. W. Ma, and Y. X. Zhou, "Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 35, pp. 227–234, 2013.

- [38] A. J. Hendron, "Engineering of rock blasting on civil projects: Structural and Geotechnical Mechanics (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1977), P242–277," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, vol. 15, no. 3, p. 66.

Abstract

Nowadays, In addition to connecting two points, tunnels are also used in passive defense and explosion-proof structures. In the event of an explosion in the tunnels, whether it is an explosion of Excavation or an explosion inside the tunnel, there is a possibility of irreparable economic damage, and serious damage may be done to the structure supporting the tunnel. Both temporary and permanent tunnel support structures are used. . Support systems typically include steel profiles or lattice girders that integrate with shotcrete to provide resistance to control tunnel convergence and prevent damage. In this thesis, the dynamic parameters resulting from the explosion of the fire pattern on the temporary maintenance of the tunnel, which is in cross-section equivalent to lattice girder (mesh frame) and shotcrete, are investigated. It is very important to study the dynamic reaction of the structure to the vibration of the explosion. For this purpose, after selecting the appropriate rock in which the conditions of use of the equivalent cross-section of lattice girder and shotcrete are required, these effects are investigated under the forces caused by the explosion of the pattern used. Then, the characteristics of the dynamic response of the temporary tunnel structure were discussed. The particle peak velocity (PPV) criterion is used to evaluate tunnel safety under dynamic loads. If the element's velocity exceeds 0.9 meters per second, it will be destroyed. During the study of the elements of the temporary support structure of the tunnel, it is observed that this structure is damaged at the location closest to the core of the tunnel, and is damaged up to a distance of 2 meters from it. Fluid-structure interaction(FSI) to analyze the complexities of the shock wave of the explosion, the finite element software LS-DYNA is used.

Keywords: Tunnel, Concrete Cover, Numerical Modelling, Explosion, LS_DYNA.



Shahrood university of technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc Thesis in Civil Engineering

**The behavior of the temporary support made of lattice girder tunnel with
shotcrete against dynamic loads caused by Blasting**

By: Seyed Hamidreza Karimi Tabar

Supervisor:

Dr Farnoosh Basaligheh

Advisor:

Dr Majid Nikkhah

January 2021