

مدل سازی عددی انفجار در سازه های مدفون با استفاده از روش SPH

مقاله پژوهشی

مرتضی رایان^{۱*}؛ رضا نادری^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران ژئوتکنیک؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، morteza.ryan1990@gmail.com

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، r_naderi@shahroodut.ac.ir

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۳/۱۰/۲۴؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

شماره صفحات: ۱۴۹ تا ۱۷۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2025.15571.1496

واژگان کلیدی	چکیده
بارگذاری انفجاری فضاهای زیرزمینی تونل شبیه سازی عددی روش بدون شبکه SPH انسیس اتوداین	در عصر حاضر با افزایش حملات تروریستی به سازه ها و ساختمان های پرجمعیت که گاهی نیز جنبه دولتی و سیاسی دارد، موضوع انفجار بیشتر مورد توجه مهندسين و طراحان سازه قرار گرفته است. از سوی دیگر پدیده های طبیعی مانند انفجار گاز و یا آتش سوزی نیز می توانند بارهای مشابهی را به سازه وارد کنند. در این پژوهش به بررسی اثر بارگذاری انفجاری بر روی تونل های زیرزمینی پرداخته شده است. در این پژوهش انفجار ناشی از ۵۰۰ الی ۵۰۰۰ کیلوگرم TNT در اعماق ۱۰ الی ۲۰ متر از سطح زمین و تأثیر آن بر تونل زیرزمینی مورد تحلیل قرار گرفته است. برای مدل سازی از روش بدون شبکه SPH و نرم افزار اتوداین استفاده شده است. نتایج حاصل از مقایسه این نمودارها رابطه مستقیم اثر انفجار با جرم ماده منفجره و رابطه معکوس آن را با عمق انفجار نشان می دهد. همچنین استفاده از خاصیت تکیه گاهی خاک اطراف تونل و همچنین به حداقل رسیدن نیروی وزن سازه، با حفاری تونل در عمق مشخصی از زمین باعث کاهش محسوس نیروهای لختی می شود. از سوی دیگر هرچه میرایی و خاصیت ویسکوالاستیک خاک بیشتر باشد، دامنه موج شوک ناشی از انفجار سطحی و زیرسطحی کمتر خواهد شد. نتایج همچنین نشان داد که تنش فون میسز فشار وارد بر تاج تونل در تمامی حالت تا ۳ برابر مقدار وارد بر کف تونل بوده است. این مقادیر با افزایش عمق قرارگیری تونل، به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

۱- مقدمه

غیرعامل به موازات سیستم های پدافند عامل بیش از پیش مشخص می گردد. بررسی انفجار بر روی تونل ها به صورت آزمایشگاهی و تجربی مسیر نمی باشد؛ از این رو استفاده از شبیه سازی های عددی در این زمینه سودمند است. میزان تنش وارد بر جداره تونل در عمق های مختلف و حین انفجار با مقادیر مختلف از ماده منفجره و همچنین توزیع فشار و نیرو می تواند به مجریان کمک کند تا طراحی های محافظه کارانه تری داشته باشند. مفیدی و همکاران (۲۰۱۱)

پدافند غیرعامل نوعی دفاع غیرنظامی است و به مجموعه اقداماتی اطلاق می گردد که به جنگ افزار نیاز ندارد و با اجرای آن می توان از وارد شدن خسارات مالی به تجهیزات و تأسیسات حیاتی و حساس نظامی و غیرنظامی و تلفات انسانی جلوگیری نموده یا میزان این خسارات و تلفات را به حداقل ممکن کاهش داد. با توجه به موقعیت استراتژیک ایران در منطقه خاورمیانه لزوم توجه کشور به توسعه سیستم های پدافند

پرداخته‌اند. ایشان با استفاده از تکنیک‌های هیدرودینامیک ذرات صاف و تکنیک‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود، به بررسی پاسخ انفجار تونل‌های ناهموار مورد استفاده قرار دادند. یافته‌ها نشان می‌دهد که تعدادی از پیچ و مهره‌های محل اتصال سگمنت‌ها در جهت طولی به علت توزیع بار انفجار به حلقه‌های مجاور تونل شکست خورده است (Koneshwaran *et al.*, 2014). کریمی فرزقی و نادری (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از روش عددی بدون شبکه *sph* و دیدگاه‌های اولبری و لاگرانژی به مدلسازی انفجار در آب پرداختند و بیان داشتند که باتوجه به ماهیت بارهای انفجاری و زمان کوتاه تأثیر این نوع بارهای ضربه‌ای، تفاوت‌های عمده‌ای بین رفتار این نوع بارها با سایر بارهای متداول وجود دارد. در این مقاله سعی شده است نتایج تجربی با مدلسازی عددی با دو روش دارای شبکه‌بندی (از دو دیدگاه اولبری و لاگرانژی) و بدون شبکه ذرات هموارساز (*sph*) مورد مقایسه قرار گیرد. برای مدلسازی از نرم‌افزار عددی *ls-dyna* استفاده شده و مقدار حداکثر فشار تولیدی با فاصله از مرکز انفجار، منحنی‌های تاریخچه زمانی فشار در نقاط مختلف و تغییرات سطح آب در روش‌های عددی مقایسه شده است. با بررسی نتایج مشخص شد که نتایج حاصل از روش بدون شبکه و دیدگاه لاگرانژی در تعیین فشار ناشی از انفجار مقادیری بیش از دیدگاه اولبری ارائه می‌نمایند. همچنین با استفاده از روش بدون شبکه، می‌توان فشار انفجار را تا فاصله کمتری از مرکز انفجار نسبت به روش‌های دارای شبکه‌بندی تعیین کرد (Karimi & Naderi, 2015). باقری و همکاران (۲۰۱۵) به شبیه‌سازی موج بلست انفجار پرداختند. این مقاله علاوه بر بررسی روش‌های عددی مانند روش حجم محدود، المان محدود، المان مرزی، روش‌های بدون شبکه (*SPH*) و ... عوامل مؤثر بر نتایج شبیه‌سازی عددی موج بلست انفجار را مورد بررسی قرار داده و تلاش‌های محققین در این زمینه را مرور کرده است. در این مطالعه، مشخص گردید که استفاده از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی موج بلست می‌تواند تا حدود ۵٪ خطا با استفاده از روش حجم محدود و کمتر ۳٪ با استفاده از روش المان محدود داشته باشد. همچنین اضافه کردن ترم چشمه به معادله انرژی، دقیق‌ترین نتایج را با استفاده از این روش خصوصاً برای مواد منفجره حاوی پودر فلزی ارائه می‌دهد (Bagheri *et al.*, 2015). هوفو فان و شائوفان لی (۲۰۱۷) به شبیه‌سازی

در مقاله خود به شبیه‌سازی امواج ناشی از زمین لغزش زیرسطحی با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر (*i-sph*) پرداختند. روش هیدرودینامیک ذرات هموار به‌عنوان روش عددی مناسبی برای مدلسازی هیدرودینامیکی جریان‌های همراه با تغییر شکل‌های بزرگ شناخته شده است. این روش به دو صورت مورد توجه قرار گرفته است: روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر یا *c-sph* و روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم ناپذیر یا *i-sph*. در این تحقیق ضمن معرفی روش عددی *sph* و نحوه گسسته سازی معادلات با این روش، امواج ناشی از زمین لغزش زیرسطحی با استفاده از روش عددی *i-sph* شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده برای صحت سنجی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج حاکی از نزدیک‌تر بودن پروفیل موج به‌دست‌آمده از روش عددی *i-sph* به نتایج آزمایشگاهی نسبت به روش‌های *nasa-vof* و *c-sph* است (Mofidi *et al.*, 2011). حسن استاد حسین و سهیل محمدی (۲۰۱۴) بهبود روش بدون المان *SPH* در حل سیستم‌های دینامیکی را بررسی کردند. یکی از روش‌های عددی از گروه روش‌های تحلیل بدون المان است. در روش‌های *Smoothed Particle Hydrodynamics* روش تحلیل بدون المان، برخلاف روش اجزاء محدود نیاز به تعریف یک المان استاندارد برای تفسیر رفتار فیزیکی نمی‌باشد و در این روش‌ها گروهی از گره‌ها جایگزین شبکه المان‌ها می‌شوند. اساساً علت استقبال از این روش‌ها کاهش زمان زیادی است که صرف تولید شبکه بر پایه بیان مقادیر عددی گره‌ها *SPH* می‌شود. روش سازگار در روش اجزاء محدود، مخصوصاً در تحلیل‌های دینامیکی وفق پذیر به‌صورت میانگین وزنی از مقادیر عددی گره‌های مجاور است. برتری این روش نسبت به روش تفاضل‌های محدود، قابلیت مدلسازی و بکارگیری آن در برازش *SPH* محیط‌هایی با هندسه پیچیده و توزیع نامنظم گره‌ها است. در این مقاله ضمن بیان اصول روش یک تابع و محاسبه مقادیر مشتقات مرتبه یک و بالاتر آن، مشکلات این روش، بخصوص دقت این روش در مرزهای محدوده برازش، مورد بررسی قرار گرفته است و راه‌حلی برای افزایش دقت در این نقاط معرفی شده است (Ostad Hosein *et al.*, 2014). سیوالینگام کونشواران و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی واکنش تونل خسته شده به‌وسیله روش ترکیبی *SPH-FE*

محاسبه دقیق انتگرال خطی مشکل است، زیرا داشتن اطلاعاتی از شرایط اولیه و نیز رابطه فشار - حجم معمولاً وجود ندارد. راه‌حل منطقی‌تر کاربرد آنالیزهای کلی ترمودینامیکی است. یکی از این آنالیزها، انرژی آزاد هلمهولتز یا تابع A است. این تابع، یک تابع نقطه‌ای (اسکالر) است که شامل جملات TS و انرژی داخلی E است و لذا:

$$A = E - TS \quad (۱)$$

انرژی انفجاری از طریق رابطه زیر به تغییرات انرژی آزاد هلمهولتز (A) حین فرآیند انبساطی انفجار مرتبط می‌گردد و برای انرژی انفجاری به شرح زیر است:

$$\int_1^2 pvd \approx -\Delta A \approx -\Delta E = T \Delta S \quad (۲)$$

در محاسبه گرمای انفجار، انرژی مربوط به انبساط، به هدر رفته است. اما در انفجارهای واقعی، در اتمسفر، این انبساط به صورت انرژی در موج انفجار ظاهر شده است. در مورد تی‌ان‌تی، انرژی انفجار اندازه‌گیری شده ۴۸۶۰ J/gr است و گرمای انفجار آن ۲۸۰۰ J/gr است. این تفاوت مرتبط با افزایش آنتروپی یا ΔS است (zamani, 2012).

۳- آنتروپی انفجار

آنتروپی انفجار حاصل افزایش آنتروپی از قبل به بعد از انفجار است:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (۳)$$

آنتروپی محصولات انفجار را می‌توان از جمع آنتروپی تک‌تک مواد یافت. آنتروپی محصولات به صورت مخلوط با مجموع آنتروپی تک‌تک محصولات متفاوت است. به طوری که این تفاوت از طریق رابطه زیر قابل بیان است:

$$S_{mixthre} = -R_m \ln y \quad (۴)$$

در رابطه فوق y نسبت مولی مخلوط و R_m ثابت مولی گازها ($۸/۳۱۴۳۴ \text{ J/mol K}$) در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین برای به‌دست‌آمده آوردن آنتروپی مخلوط محصولات انفجار می‌توان رابطه زیر را به کار برد:

$$S = S^0 + S_{mix} = S^0 - R_m \ln y \quad (۵)$$

$$S_{mix} = 9\Delta n \quad (۶)$$

در اینجا Δn میزان افزایش تعداد مول محصولات گازی

انفجار تحت بارهای انفجاری دفن شده با استفاده از روش $Peridynamics-SPH$ پرداختند. نتایج عددی شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشی اندازه‌گیری شده مقایسه شده و تطابق کلی بین نتایج شبیه‌سازی با روش فرمول اصلاح شده SPH و داده‌های تجربی وجود دارد، و مدل رفتاری حاضر توان خوبی را در پیش‌بینی رفتار انفجار دارد (Houfo et al., 2017). خاتمی و مومن‌آبادی (۲۰۲۲) با استفاده از نرم‌افزار ال-داینا به بررسی تأثیر سرعت حداکثر ذرات بر میزان آسیب تونل‌های دایروی تحت بار ۵۰۰ کیلوگرم و فاصله ۴ متر از تونل پرداخته و نشان دادند که بیشترین آسیب به تاج تونل دایروی وارد شده و این آسیب در سرعت بیشینه ذرات برابر با ۱۹ سانتی-متر بر ثانیه، بیشتر از سایر حالت‌ها است (khatami & momenabadi, 2022). لی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از نرم‌افزار ال-داینا به بررسی انفجار در تونل‌های زیرزمینی پرداخته و برای این کار روش جدیدی تحت عنوان $FEM-SPH$ یا روش SPH مبتنی بر اجزای محدود را توسعه دادند. ایشان انفجار را در فاصله ۱۰ تا ۲۵ متر بررسی کرده و نشان دادند که روش توسعه‌یافته میزان اختلاف نتایج با مطالعات آزمایشگاهی را تا مقدار ۷٫۷۵٪ کاهش داده و دقت بالایی را برای شبیه‌سازی سرعت و شدت موج ایجادشده و نیز محاسبه آسیب وارد بر تونل دارد (Li et al., 2024). در پژوهش‌های قبلی کمتر به بررسی انفجار بر روی تونل‌های زیرزمینی و بررسی تأثیر عمق بهینه تونل نسبت به میزان بار وارده، با روش بدون شبکه پرداخته شده است؛ از این رو، در این پژوهش با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار و به‌وسیله نرم‌افزار $ANSYS AUTODYN$ اثرات انفجار روی تونل‌های زیرزمینی و همچنین آسیب‌پذیری تونل در برابر میزان بار وارده و همچنین عمق بهینه تونل نیز بررسی شده است.

۲- انرژی انفجار

مقدار انرژی منتقل شده از یک انفجار به موج انفجاری آنکه انرژی انفجار نامیده می‌شود، کلید اصلی در مطالعه امواج ناشی از انفجار و شوک است. این انرژی انفجاری به هر دو شکل دمایی و مکانیکی وجود دارد. به صورت تئوری، انرژی انفجار با محاسبه حجم محصولات منبسط‌شده (V) منطبق با فشار آن‌ها (P) و محاسبه انتگرال $\int_1^2 pdv$ به‌دست‌آمده می‌آید.

است.

۵- روش ذرات هموار متحرک (SPH)

روش ذرات هموار متحرک (SPH) برای اولین بار در سال ۱۹۷۷ برای حل مسائل اخترشناسی، مانند برخورد ستارگان و حرکت اجرام آسمانی در نزدیکی سیاه‌چاله‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این دیدگاه بر مبنای روش بدون مش ارائه شده است. به این ترتیب که محیط پیوسته به یک سری ذرات که به صورت منظم پخش شده‌اند، تقسیم‌بندی می‌شوند. توزیع درجات آزادی مجهول نیز بر اساس توابع خاص آماری است. این روش در کاربردهایی که در اثر بارگذاری شدید و با نرخ بالا، به صورت ذرات متلاشی می‌شوند، بسیار مناسب است. وجود قابلیت‌های منحصربه‌فرد این روش موجب شد علی‌رغم بروز اشکالاتی نظیر عدم دقت و ناپایداری، تاکنون در حل بسیاری از مسائل فیزیکی که ماهیت دینامیکی دارند مورد استفاده قرار گیرد (khayatzaheh, 2012). رویکرد به این روش در دهه نود میلادی در زمینه‌های پاسخ دینامیکی مصالح، مدل‌سازی ترک‌خوردگی، مدل‌سازی برخورد، مصالح ترد، شکل‌دهی فلزات، دینامیک سیالات، پدیده انفجار و انفجار در زیر آب بوده است. روش SPH مبتنی بر تخمین مقدار تابع و یا مقادیر مشتقات آن در یک ذره برحسب مقادیر موجود در ذرات هم‌جوار است که با استفاده از آن می‌توان فرم عددی مشتقات را در معادلات دیفرانسیل جایگزین فرم دقیق نموده و معادله را به صورت عددی حل نمود. ایده اساسی SPH برپای خاصیتی از تابع دلتای دیراک است تابع دلتای دیراک تابعی است که در تمام نقاط دامنه دارای مقدار صفر است و تنها در نقطه $x_i = x_j^k$ مقدار بی‌نهایت را دارد و لذا:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \zeta) d\zeta = 1 \quad (12)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(\zeta) \delta(x_i - \zeta) d\zeta = u(x_i) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x_i - \zeta) d\zeta = u(x_i) \quad (13)$$

در اینجا $U(x_i)$ مقدار تابع u در نقطه x_i است. برای کاربردی نمودن خاصیت تابع دلتای دیراک، در روش SPH این تابع با تابع وزن w جایگزین می‌گردد. تابع وزن مورد

است. آنتروپی بسیاری از ترکیبات مواد منفجره، موجود نیست، به همین دلیل ناگزیر، راه‌حل‌های تخمینی استفاده می‌شود، برای اغلب مواد منفجره متداول در فاز چگال (جامد یا مایع)، این مقدار تقریباً برابر است با:

$$S^0 = 65 + \frac{20nj}{mol} K \quad (7)$$

که n تعداد اتم‌های موجود به جز هیدروژن و اکسیژن است. به علت فرآیند ذوب، آنتروپی مایع معمولاً از آنتروپی جامد همان ماده بیشتر است. آنتروپی مواد در حالت گازی، خیلی از فاز چگال آن‌ها بیشتر است، یعنی آنتروپی انفجار شدیداً وابسته به تولید محصولات گازی است؛ بنابراین هنگامی که عمده محصولات انفجار حالت گازی باشند تغییر آنتروپی فاز چگال قابل صرف‌نظر کردن است (zamani, 2012).

۴- قدرت انفجار (تخمین بر تلویت)

رابطه بر تلویت تخمینی برای قدرت انفجاری مواد منفجره ارائه داده است. به طوری که این قدرت انفجاری هر دو جنبه انرژی آزادشده توسط انفجار یعنی گرمای انفجار و انرژی مکانیکی (فرآیند انبساط گازها) را لحاظ می‌نماید. قدرت انفجاری به صورت درصدی از قدرت انفجاری جرم معادل مواد منفجره استاندارد بوده و لذا:

$$(\%TNT) = 840 \times \Delta n \times \frac{-\Delta E}{FM} \quad (8)$$

در این رابطه، Δn تعداد مول‌های گازی تولیدشده (آب در فاز گاز فرض می‌شود)، گرمای مولی انفجار (Kj/mol) و FM جرم مولی است (zamani, 2012). گسترش امواج حاصل از یک انفجار در هوای آزاد، تراکم هوا را به همراه خواهد داشت. چنانچه هوا به عنوان یک گاز ایده‌آل در نظر گرفته شود معادله حالت مرتبط با آن را به صورت مقابل می‌توان در نظر گرفت:

$$PV = R_m T \quad (9)$$

$$p\theta = RT \quad (10)$$

$$P = \rho RT \quad (11)$$

در اینجا، P فشار مطلق، V حجم یک مولکول از گاز ایده‌آل و T دمای مطلق گاز هوا است و R_m ثابت مولی گاز است که در سیستم متریک مقدار آن $8/314394 \text{ j/mol}$

۵-۱- توابع وزن SPH

در مورد انتخاب و ساختن توابع وزن تحقیقات زیادی انجام شده است. لوسی (۱۹۷۷) در مطالعه خود از تابع زنگوله‌ای به شکل زیر استفاده کرده بود (Lucy, 1977):

$$W(x - x^2, h) = W(R, h) = a_d \begin{cases} (1 + 3R)(1 - R)^3 & \text{for } R \leq 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۱۷)$$

در اینجا a_d تابع هموارساز بوده که در حالت یک-بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب دارای مقادیر $\frac{105}{16\pi h^3}, \frac{5}{\pi h^3}, \frac{5}{4h}$ خواهد بود و $R = \frac{r_{ij}}{h}$ است (saedi, darian, 2012). برای فاصله نسبی بین دو ذره به شرح زیر است:

$$r_{ij} = |x_j - x_i| = |x_{ij}| \quad (۱۸)$$

$$s = \frac{r_{ij}}{h}$$

چندی بعد موناقان (۱۹۹۲) نشان داد که هسته تابع هموارساز SPH می‌بایست دارای تعبیر فیزیکی باشد و بدین منظور استفاده از تابع گاوسی را پیشنهاد نمود (Monaghan, 1992):

$$w(R, h) = a_d e^{-R^2} \quad (۱۹)$$

در اینجا نیز a_d تابع هموارساز در حالات یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی به ترتیب دارای مقادیر $\frac{1}{h^3\sqrt{\pi^3}}, \frac{1}{\pi h^2}, \frac{1}{h\sqrt{\pi}}$ خواهد بود. در نهایت، تابع هموارسازی برپایه‌ی کثیرال جمله‌های درجه سه مشابه با رابطه (۲۰) ارائه می‌شود (Monaghan and Lattanzio, 1985):

$$w(R, h) = a_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - R)^3 & 1 \leq R < 2 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۲۰)$$

در اینجا a_d در حالات یک، دو و سه‌بعدی به ترتیب دارای مقادیر $\frac{3}{2h^3\pi}, \frac{15}{7\pi h^2}, \frac{1}{h}$ خواهد بود (lopez, 1995). به دلایل پرشماری از جمله شباهت به هسته گاوسی، اثرات کمتر فشردگی در مرزها و هموار باقی ماندن تابع هموارساز در برخی مشتقات مراتب بالاتر (برخلاف تابع گاوسی)، تابع اخیر را به‌عنوان متداول‌ترین هسته SPH می‌شناسند که اغلب در

استفاده باید مثبت باشد و مقادیر غیر صفر تابع در همسایگی نقطه مرکزی قرار داشته باشند. این همسایگی، دامنه هموارسازی نام دارد و در خارج از این همسایگی تابع وزن دارای مقدار صفر است. شکل این تابع به‌صورت زنگوله‌ای است و سطح زیر نمودار آن مشابه خاصیت دلتای دیراک باید برابر یک باشد و لذا:

- 1) $w > 0$ over Ω_i (Positivity)
- 2) $x = 0$ Outside Ω_i (Compact)
- 3) $\int_{\Omega_i} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i = 1$ (unity) (۱۴)
- 4) Monotonically decreasing function (Decay)
- 5) $w \rightarrow \delta$ (Delta function behavior)

که در اینجا Ω_i دامنه هموارسازی با دامنه تأثیر و $w(|x - x_i|, h)$ مقدار تابع وزن است که تابع فاصله بین ذره i ، z و طول هموارسازی h است. شعاع این محدوده ضریبی از طول هموارسازی h (یعنی k_i) در نظر گرفته می‌شود. مسائل حل‌شده در این پژوهش مقدار $k=1$ در نظر گرفته شده است. $d\Omega_i$ نیز، جزء حجم اشغال‌شده در اطراف نقطه x است و عبارت $|x - x_i|$ مبین فاصله نقطه x واقع در دامنه هموارسازی تا ذره مرکزی i است. با به‌کارگیری تابع وزن مناسب، مقدار دقیق $u(x_i)$ با مقدار تقریبی جای $u^h(x_i)$ گزین می‌شود و لذا:

$$u(x_i) \approx u^h(x_i) = \int_{\Omega_i} u(z) w(|x - x_i|, h) d\Omega_i \quad (۱۵)$$

فرم ناپیوسته رابطه (۱۵) مشابه یک میانگین‌گیری وزنی از مقادیر تابع در ذرات موجود در دامنه تأثیر ذره i است و لذا:

$$u^h(x_i) \approx \sum_{j=1}^N u_j w(|x_j - x_i|, h) \Delta v_j \quad (۱۶)$$

که در اینجا N تعداد ذرات هم‌جوار موجود در دامنه هموارسازی Ω_i و Δv_j فضای اشغال‌شده توسط ذره j است. در مسائل یک‌بعدی Δv_j به Δx_j تبدیل می‌شود که متوسطی از فاصله ذره j تا نقاط هم‌جوار است.

مشتق این تابع نسبت به متغیرهای مستقل X_a پادمقتارن است. این نکته به‌عنوان یک آزمون برای صحت روابط مشتق‌گیری می‌تواند به کار رود. به این صورت که افزودن مقدار ثابت c به مقادیر تابع در نقاط دامنه در مقدار مشتق در نقطه i تأثیر نخواهد گذارد و لذا:

$$\frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} = \frac{\partial s}{\partial x_a} \cdot \frac{dw(s, h)}{ds} \quad (23)$$

$$s = |x - x_i|/h = r/h$$

$$r = \sqrt{(x_a - (x_a)_i)^2 + (x_\beta - (x_\beta)_i)^2 + (x_\gamma - (x_\gamma)_i)^2}$$

$$\frac{\partial s}{\partial x_a} = \frac{1}{h} \cdot \frac{x_a - (x_a)_i}{r}$$

$$\frac{dw(s, h)}{ds} = \begin{cases} -2s + 2/3s^2 & 0 \leq s < 1 \\ -0.5(2 - s)^2 & 1 \leq s \leq 2 \\ 0 & s > 2 \end{cases} \quad (24)$$

$$\left(\frac{\partial(u+c)}{\partial x_a}\right)_i^h = - \sum_{j=1}^N (u_j + c) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j \approx - \sum_{j=1}^N \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} = \left(\frac{\partial u}{\partial x_a}\right)_i^h \quad (25)$$

در رابطه فوق و روابط آتی ساده شدن بیان روابط، مقدار عددی تابع در یک نقطه مانند z به‌جای z با نشان داده می‌شود. مشابه عملیات درون‌یابی، برآورد مشتقات مرتبه اول با استفاده از روش ذرات هموار متحرک به دلیل عدم ارضاء شرط یکتایی تابع وزن در نواحی مرزی توأم با عدم دقت است (khayat-zadeh, 2012). برای محاسبه مشتق دوم نیز مجدداً از روش انتگرال‌گیری جزء‌به‌جزء استفاده می‌گردد.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h &\approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h = \int_{\Omega_i} \frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_a^2} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i = \\ &\left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right) \cdot w(|x - x_i|, h)|_0^{kh} - \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} d\Omega_i = \\ &\frac{\partial u(x)}{\partial x_a} \cdot w(|x - x_i|, h)|_0^{kh} - u(x) \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} \\ &+ \int_{\Omega_i} u(x) \cdot \frac{\partial^2 w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a^2} d\Omega_i \end{aligned}$$

توابع وزن به‌گونه‌ای انتخاب می‌گردد که دو جمله اول رابطه بالا حتی‌المقدور حذف گردد. از سویی برخلاف روند محاسبه مشتق اول، حذف تمامی جملات مرزی با استفاده از

مقالات و پژوهش‌ها از آن استفاده می‌شود در این پژوهش نیز از همین روش استفاده گردیده است.

۵-۲- محاسبه مقدار مشتق اول و دوم توابع با استفاده از روش SPH

در روش اجزای محدود مشتق میدان متغیر به‌صورت مقادیر گرهی ضربدر مشتق توابع شکل تقریب زده می‌شود. به‌طور مشابه در روش ذرات متحرک نیز محاسبه مشتق یک تابع عددی معلوم در نقاط دامنه با دانستن مقادیر مشتق تابع وزن در نقاط واقع در دامنه هموارسازی ممکن می‌گردد. یکی از شرایط حصول مشتقات مراتب بالاتر مشتق‌پذیری مراتب بالاتر تابع وزن می‌باشد؛ در صورتی که مختصات گره مرکزی x_i باشد، برآورد مقدار مشتق نسبت به متغیر x_a در نقطه i با استفاده از روش انتگرال‌گیری جزء‌به‌جزء امکان‌پذیر است لذا:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right)_i^h &\approx \left(\frac{\partial u(x)}{\partial x_a}\right)_i^h \\ &= \int_{\Omega_i} \frac{\partial u(x)}{\partial x_a} w(|x - x_i|, h) d\Omega_i \\ &= u(x) \cdot w(|x - x_i|, h)|_0^{kh} \\ &- \int_{\Omega_i} u(x) \cdot \frac{\partial w(|x - x_i|, h)}{\partial x_a} d\Omega_i \end{aligned} \quad (21)$$

در صورتی که تابع وزن به‌گونه‌ای انتخاب شود که مقدار آن در مرز دامنه هموارسازی صفر باشد (مشابه مدل‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش)، جمله اول رابطه فوق صفر می‌شود و فرم گسسته این رابطه را می‌توان به فرم رابطه (۲۲) نوشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x_a} \approx \left(\frac{\partial u}{\partial x_a}\right)_i^h = - \sum_{j=1}^n u(x_j) \frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a} \Delta v_j \quad (22)$$

در رابطه فوق منظور از $\frac{\partial w_{ij}}{\partial x_a}$ مقدار عددی مشتق تابع

وزن نسبت به متغیر x_a در نقطه واقع در مختصات $x_j = (x_\alpha, x_\beta, x_\gamma)_j$ که در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی به مختصات $x_i = (x_\alpha, x_\beta, x_\gamma)_i$ است. در عمل برای محاسبه مشتق تابع وزن نسبت به متغیر مستقل x_a با توجه به‌قاعده زنجیری مشتق، از رابطه (۲۳) استفاده می‌شود:

بدین ترتیب مشتق تابع وزن معرفی شده در رابطه (۲۱) بر اساس رابطه (۲۳) قابل محاسبه است: باتوجه‌به شکل زنگوله‌ای تابع وزن و فرم متقارن آن

(۲۰۱۱) و همچنین آمبروسینی و همکاران (۲۰۰۲) صحت سنجی شده است. بتن مفروض دارای مدول الاستیسیته ۳۰ گیگاپاسکال، پواسون ۰/۲ و وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و مقاومت فشاری و کششی آن به ترتیب ۴۰ و ۴ مگاپاسکال است. زاویه اصطکاک داخلی بتن نیز ۳۵ درجه فرض شده است. خاک نیز از نوع ماسه‌ای با وزن مخصوص ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده و مقاومت فشاری ۲ مگاپاسکال است. زاویه اصطکاک داخلی بتن نیز ۳۵ درجه فرض شده است. برای این خاک مدول الاستیسیته ۳۰ مگاپاسکال و پواسون ۰/۳ می‌باشد. این ۹ حالت در جدول ۱، مشخص شده‌اند.

جدول ۱- حالت‌های مختلف بارگذاری انفجاری

نام مدل	عمق قرارگیری تونل	جرم ماده منفجره
حالت ۱		۵۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۲	تونل در عمق ۱۰ متری از سطح زمین	۱۰۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۳		۵۰۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۴		۵۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۵	تونل در عمق ۱۵ متری از سطح زمین	۱۰۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۶		۵۰۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۷		۵۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۸	تونل در عمق ۲۰ متری از سطح زمین	۱۰۰۰ کیلوگرم TNT
حالت ۹		۵۰۰۰ کیلوگرم TNT

همان‌طور که در جدول ۱، مشخص است، ۹ حالت برای شبیه‌سازی‌ها در آزمایش‌ها در سه عمق مختلف و هر حالت با سه جرم مختلف از ماده منفجره مدل‌سازی انجام شده‌اند. مدل‌سازی به کمک روش SPH و در محیط انسیس و تحلیل مدل‌ها در محیط اتوداین انجام شده است. برای تحلیل هرکدام از مدل‌ها تعداد ۲۰۰۰ سیکل در نرم‌افزار اتوداین در نظر گرفته شده است گرفته شده است. شکل ۱، سیکل‌های مختلف تحلیل و تغییر مدل با گذشت زمان در نرم‌افزار اتوداین را در

انتخاب تابع وزن مناسب برای محاسبه مشتق دوم دشوار است؛ بنابراین در نظر گرفتن رابطه مشتق دوم تابع u به صورت زیر با تقریب همراه است.

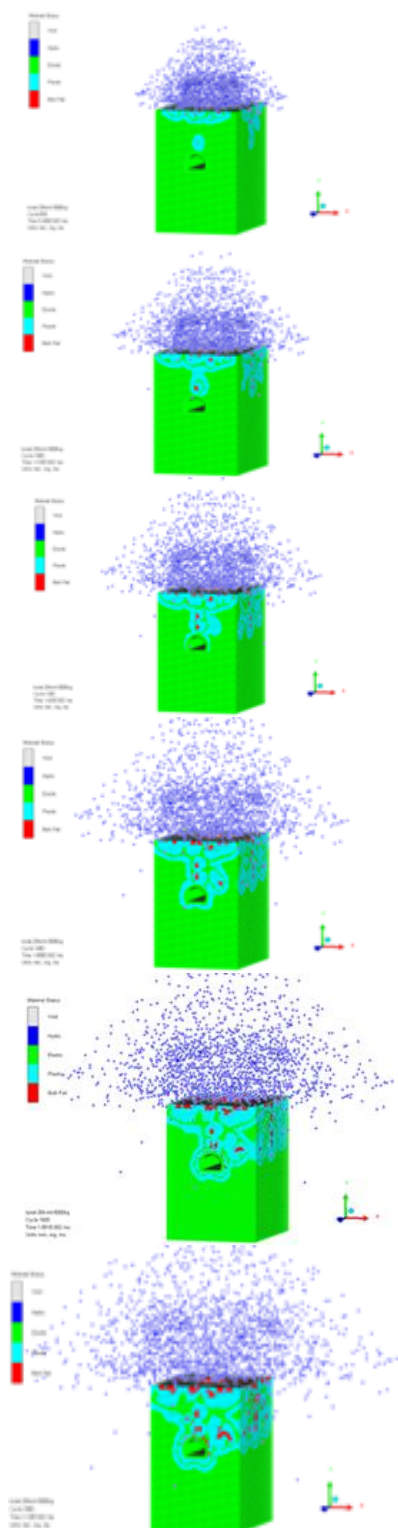
$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right) \approx \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_a^2}\right)_i^h = \sum_{j=1}^N u_j \frac{\partial w^{2ij}}{\partial x_a^2} \Delta v_j \quad (27)$$

در رابطه فوق منظور از $\frac{\partial w^{2ij}}{\partial x_a^2}$ مقدار عددی مشتق دوم تابع وزن نسبت به متغیر x_a در نقطه j واقع در دامنه هموارسازی نقطه مرکزی i است که از رابطه (۲۷) محاسبه می‌گردد.

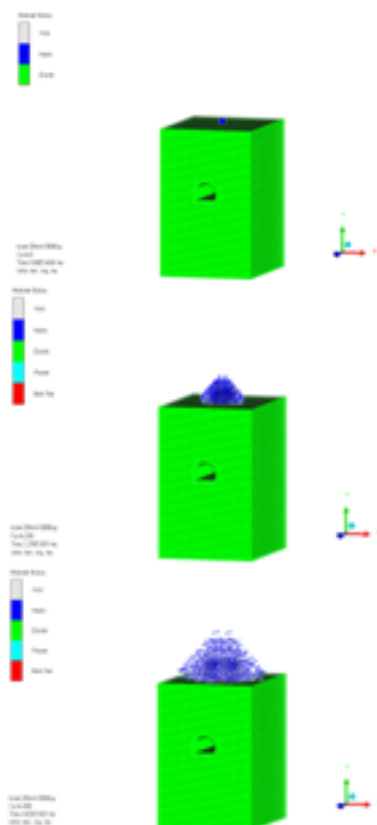
۶- مدل‌های توسعه یافته

در این پژوهش، آزمایش شبیه‌سازی عددی بارگذاری انفجاری بر روی تونل به کمک هایدروکد اتوداین در ۹ حالت مختلف انجام شده است. آزمایش‌ها در سه عمق مختلف و هر حالت با سه جرم مختلف از ماده منفجره مدل‌سازی انجام شده‌اند. مدل‌سازی به کمک روش SPH و در محیط انسیس و تحلیل مدل‌ها در محیط اتوداین انجام شده است. در این پژوهش، مدل‌های رفتاری انتخاب‌شده برای خاک و تونل منطبق بر قابلیت‌های نرم‌افزار ANSYS Autodyn و روش SPH بوده است؛ از این‌رو برای خاک، از مدل EOS Compaction همراه با معیار تسلیم Drucker-Prager استفاده شده است که رفتار تراکمی و پلاستیک خاک را تحت انفجار مدل‌سازی می‌کند. برای بتن تونل، از مدل RHT Concrete استفاده شده که شامل سخت‌شوندگی کرنشی، نرم‌شوندگی تنش و معیار شکست بتن می‌باشد و قابلیت مدل‌سازی گسیختگی دینامیکی بتن را دارد. مدل‌های رفتاری انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی موج انفجاری و تخریب مواد در زمان کوتاه مناسب هستند که در روش SPH بسیار مهم است. در این نرم‌افزار، مرزهای پیش‌فرض به صورت صلب هستند که می‌توانند باعث بازتاب غیرواقعی امواج شوند. در این مقاله شرایط مرزی جاذب نیز در اطراف دامنه تنظیم شده است تا از انعکاس امواج جلوگیری گردد. همچنین تماس بین تونل و خاک به صورت اصطکاکی تنظیم شده تا انتقال نیروها بین تونل و خاک را شبیه‌سازی کند. برای تحلیل هرکدام از مدل‌ها تعداد ۲۰۰۰ سیکل در نرم‌افزار اتوداین در نظر گرفته شده است. از سویی پیش از فرآیند مدل‌سازی، جهت اطمینان از عملکرد نرم افزار، مدل‌های ارائه شده از انفجار در مقاله‌ی وانگ و همکاران

یکی از حالت‌های مدل‌سازی (تونل در عمق ۲۰ متری با ۵۰۰۰ کیلوگرم TNT) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، با گذر زمان و افزایش سیکل‌ها ذرات SPH ماده منفجره از هم گسیخته شده و در فضای اطراف پراکنده شده‌اند. انرژی حاصل از این انفجار به خاک و از طریق آن به تونل و بخش‌های مختلف آن منتقل شده و این انرژی باعث به وجود آمدن نواحی الاستیک و پلاستیک و بخش‌های از بین رفته می‌شود. این نواحی در بخش‌های مختلف مدل با رنگ‌های سبز (الاستیک)، آبی (پلاستیک) و قرمز (بخش‌های از بین رفته) مشخص شده‌اند. در واقع با گذر زمان تعداد نقاطی که در آن خاک پلاستیک شده یا از گسیختگی حجمی کامل در آن‌ها رخ داده است بیشتر شده است. نحوه توزیع انرژی حاصل از ماده منفجره در بخش‌های مختلف مدل در سایر حالت‌ها نیز مشابه شکل (۱) است. در ادامه به بررسی تأثیر بارگذاری بر بخش‌های مختلف تونل پرداخته شده است.

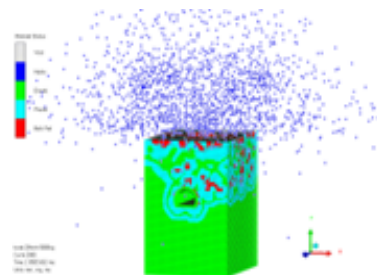


ادامه شکل ۱- سیکل‌های مختلف تحلیل در تونل به عمق ۲۰ متری تحت انفجار با ۵۰۰۰ کیلوگرم

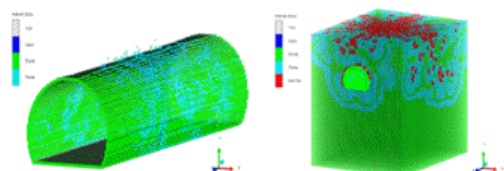


شکل ۱- سیکل‌های مختلف تحلیل در تونل به عمق ۲۰ متری تحت انفجار با ۵۰۰۰ کیلوگرم

فاصله از نقطه شروع انفجار اثر بارگذاری کمتر خواهد شد. همچنین تعداد نقاط پلاستیک شده و نقاط به گسیختگی کامل نیز با افزایش بار انفجاری، بیشتر شده و با افزایش عمق، تأثیر آن بر روی تونل کمتر شده است. در بخش بعد تأثیر انفجار بر روی تاج تونل مقایسه شده است.



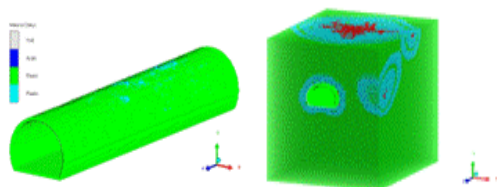
ادامه شکل ۱- سیکل‌های مختلف تحلیل در تونل به عمق ۲۰ متری تحت انفجار با ۵۰۰۰ کیلوگرم



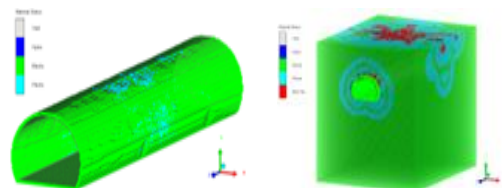
شکل ۴- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۱۰ متر و بار انفجاری ۵۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه

۷- اثر بارگذاری بر بخش‌های مختلف تونل

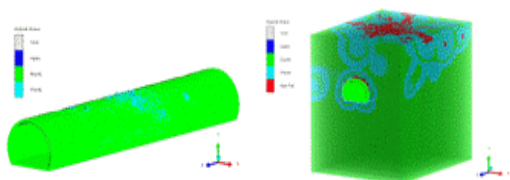
یکی دیگر از مواردی که در تحلیل و طراحی تونل‌ها اهمیت دارد، نحوه توزیع آسیب در شکل ۲، اثر بارگذاری انفجاری بر روی سطح زمین (نقطه انفجار) و بخش‌های مختلف تونل پس از گذشت ۲۰۰۰ سیکل معادل ۰/۰۲ میلی ثانیه پس از انفجار را نشان می‌دهد.



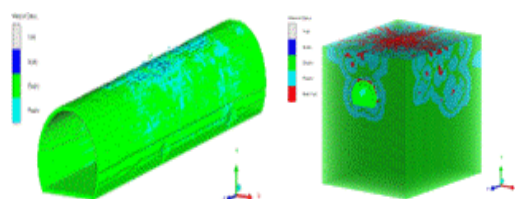
شکل ۵- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۱۵ متر و بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



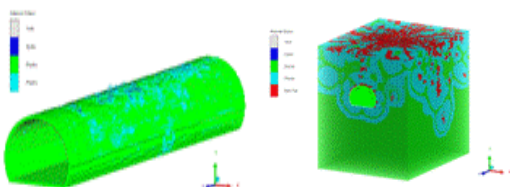
شکل ۲- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۱۰ متر و بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



شکل ۶- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۱۵ متر و بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



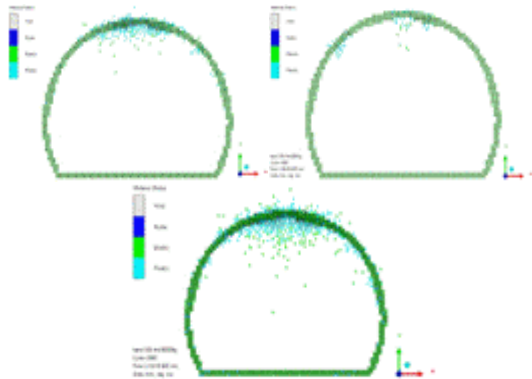
شکل ۳- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۱۰ متر و بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



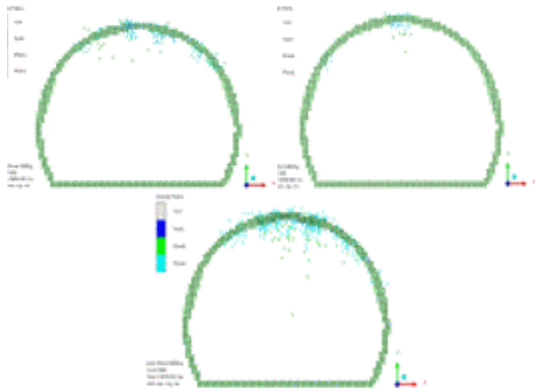
شکل ۷- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۱۵ متر و بار انفجاری ۵۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه

همان‌طور که در شکل ۲ تا شکل ۱۰، مشخص است، جرم ماده منفجره و فاصله از نقطه شروع انفجار تأثیر مستقیمی بر اثر بارگذاری انفجاری بر روی تونل دارد. با افزایش جرم ماده منفجره و کاهش فاصله از نقطه شروع انفجار اثر بارگذاری بیشتر و با کاهش جرم ماده منفجره و افزایش

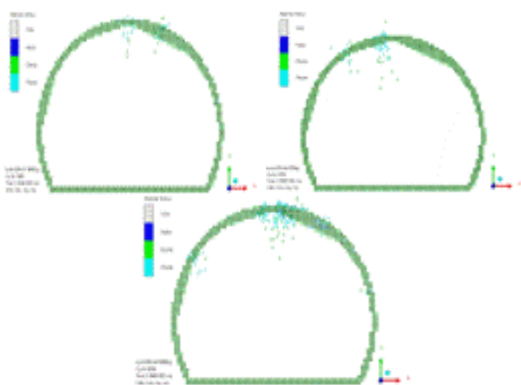
است.



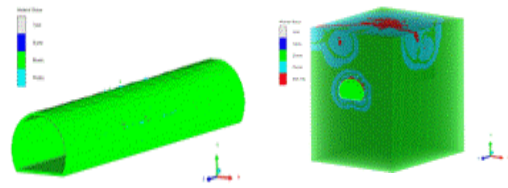
شکل ۱۱- انفجار و تأثیر آن بر تاج تونل در عمق ۱۰ متر و بار ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



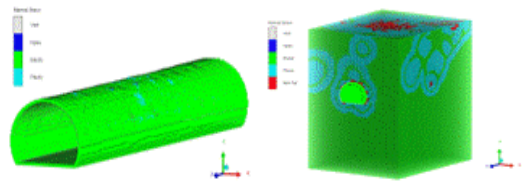
شکل ۱۲- انفجار و تأثیر آن بر تاج تونل در عمق ۱۵ متر و بار ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



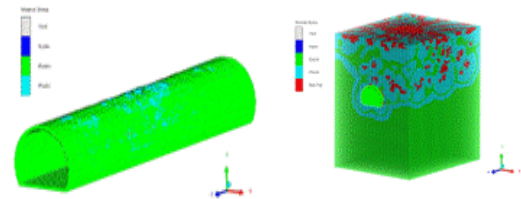
شکل ۱۳- انفجار و تأثیر آن بر تاج تونل در عمق ۲۰ متر و بار ۵۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



شکل ۸- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۲۰ متر و بار انفجاری ۵۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



شکل ۹- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۲۰ متر و بار انفجاری ۱۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه



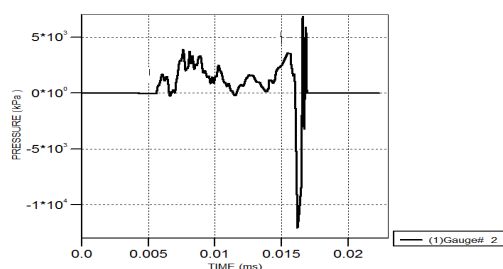
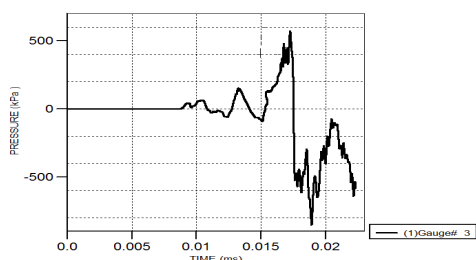
شکل ۱۰- انفجار بر روی سطح زمین و تونل به عمق ۲۰ متر و بار انفجاری ۵۰۰۰ کیلوگرم در لحظه ۰/۰۲ میلی ثانیه

۸- بررسی اثر بارگذاری در سقف تونل

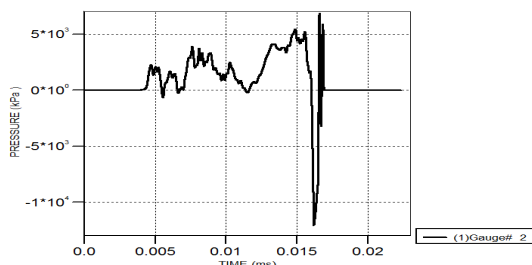
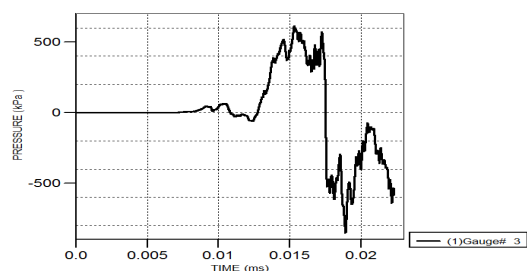
پرواضح است که تاج تونل مهم‌ترین بخش از تونل بوده به صورتی که تخریب در این بخش می‌تواند باعث ریزش سایر بخش‌ها و افزایش آسیب‌ها و خسارت‌ها بشود. در مطالعات پیشین نیز بیشترین میزان آسیب‌دیدگی در بخش سقف تونل گزارش شده است. شکل ۱۱ تا شکل ۱۳، آسیب وارد بر بخش مرکزی تونل را تحت بارهای مختلف در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۱۱ تا شکل ۱۳، مشاهده می‌شود، بیشترین آسیب در بخش مرکزی تاج در هندسه‌ی نعل اسبی تونل حاضر است. همچنین تعداد نقاط پلاستیک شده و نقاط به گسیختگی کامل نیز با افزایش بار انفجاری، بیشتر شده و با افزایش عمق، تأثیر آن بر روی تونل کمتر شده است. در بخش بعد تأثیر انفجار بر روی تاج تونل مقایسه شده است. در بخش بعد فشار وارد در نقاط با آسیب حداکثری، بررسی شده

کاملاً مشخص است؛ مطابق با شکل ۱۵، تا زمان همچنین در ادامه ثانیه در در سقف تونل و تا زمان ۰,۰۱۵ ثانیه در کف تونل فشار مثبت به جداره وارد شده است و پس از آن حالت خلاء باعث اعمال فشار منفی به سازه می‌شود؛ شار انفجار پس از مدت‌زمانی حدود ۰/۰۱ میلی‌ثانیه به کف تونل رسیده است. ماکزیمم مقدار ثبت‌شده فشار انفجار در کف تونل حدود ۱۰۰ کیلو پاسکال است. در ادامه فشار انفجار در سقف و کف تونل در شکل ۱۶ تا شکل ۲۳، نمایش داده شده است.



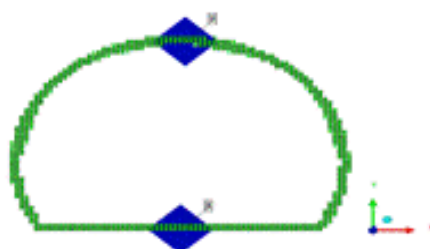
شکل ۱۶- تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۱۰ متر و بار ۱۰۰۰ کیلوگرم



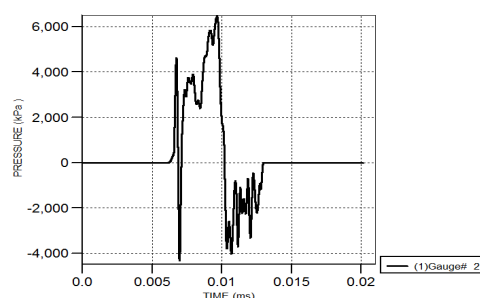
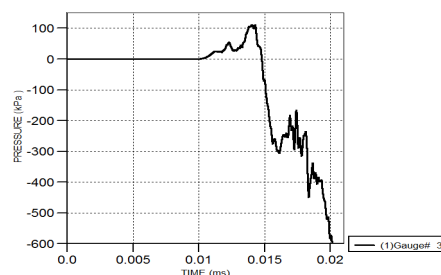
شکل ۱۷- تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۱۰ متر و بار ۵۰۰۰ کیلوگرم

۹- تاریخچه فشار ثبت شده توسط سنجه‌ها

مطابق شکل ۱۴، برای ثبت تاریخچه پارامترهای حاصل از موج انفجار تعداد ۲ سنجه در سقف و کف تونل در زیر نقطه انفجار در نظر گرفته شده است تا بتوان فشار وارد بر این نقاط را در طول مدت‌زمان بارگذاری با یکدیگر مقایسه کرد. شکل ۱۵ تا شکل ۲۳، تاریخچه فشار ثبت‌شده توسط سنجه‌ها را در دو موقعیت ذکرشده برای حالت‌های مختلف مدل‌سازی نشان می‌دهد.



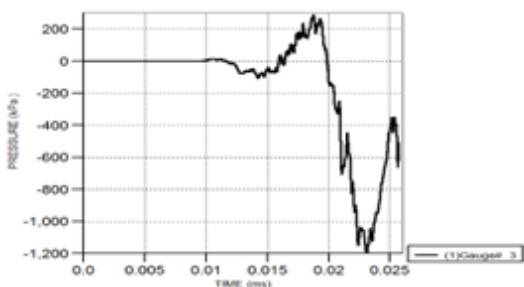
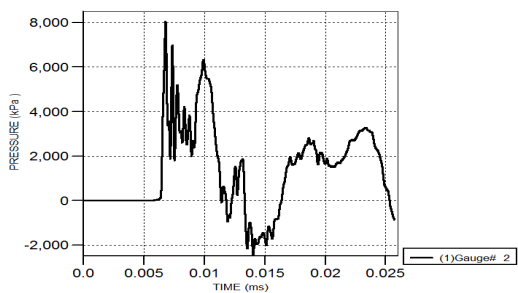
شکل ۱۴- محل قرارگیری سنجه‌ها جهت اندازه‌گیری فشار



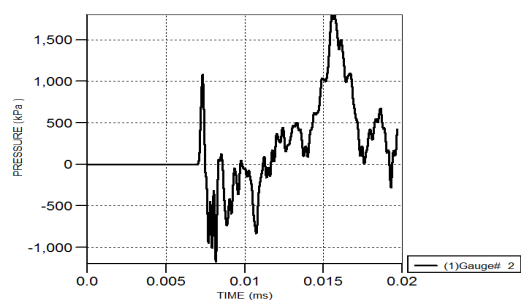
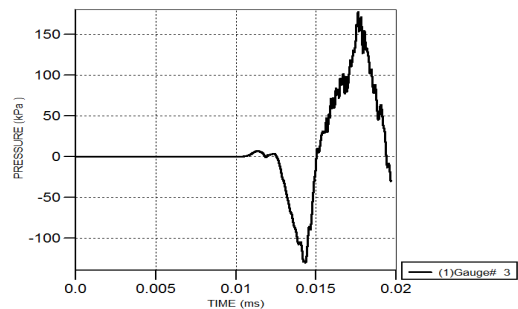
شکل ۱۵- تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف

تونل (راست) در عمق ۱۰ متر و بار ۵۰۰ کیلوگرم

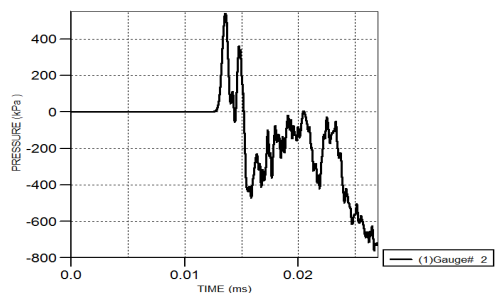
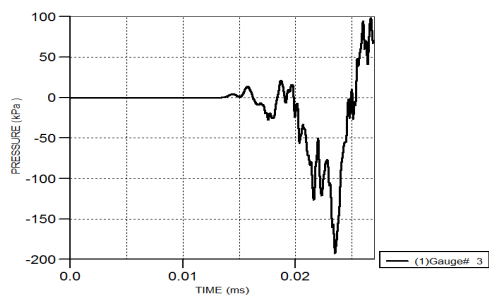
همان‌طور که از منحنی‌های شکل ۱۵، مشخص است، فشار حاصل از انفجار مدت‌زمانی حدود ۰/۰۰۷ میلی‌ثانیه را گذرانده و پس از طی کردن عمق ۱۰ متر به سقف تونل، زیر محل انفجار رسیده است. ماکزیمم فشار ثبت‌شده در این نقطه حدود ۶۰۰۰ کیلو پاسکال است که در لحظه (حدوداً) ۰/۰۱ میلی‌ثانیه ثبت شده است. فاز مثبت و منفی موج شوک انفجار



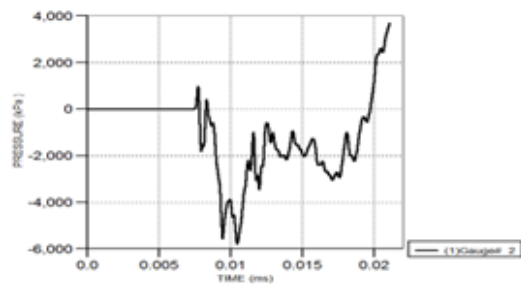
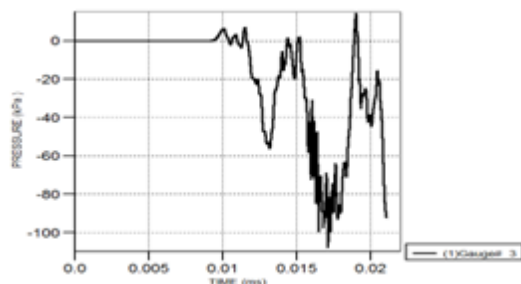
شکل ۲۰- تاربخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۱۵ متر و بار ۵۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۱۸- تاربخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۱۵ متر و بار ۵۰۰ کیلوگرم



شکل ۲۱- تاربخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۲۰ متر و بار ۵۰۰ کیلوگرم



شکل ۱۹- تاربخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۱۵ متر و بار ۱۰۰۰ کیلوگرم

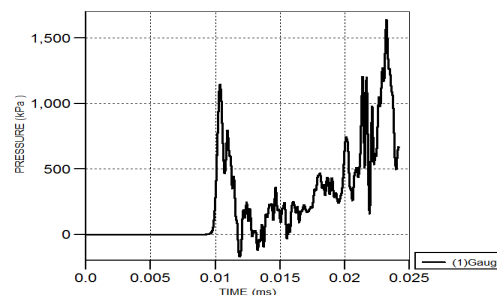
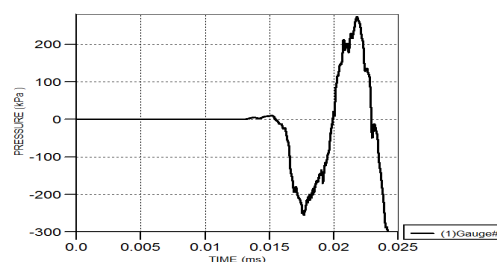
۳، زمان رسیدن اولین موج شوک به سقف و کف تونل نشان‌داده شده است.

جدول ۲- لحظه رسیدن اولین موج شوک به سقف تونل در حالت‌های مختلف بارگذاری با توجه به جرم TNT

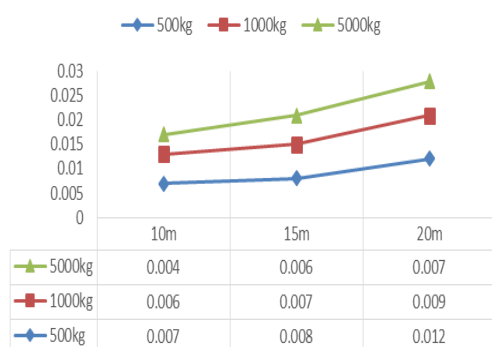
عمق	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم	۵۰۰۰ کیلوگرم
۱۰ متر	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴
۱۵ متر	۰/۰۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶
۲۰ متر	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷

جدول ۳- لحظه رسیدن اولین موج شوک به کف تونل در حالت‌های مختلف بارگذاری با توجه به جرم TNT

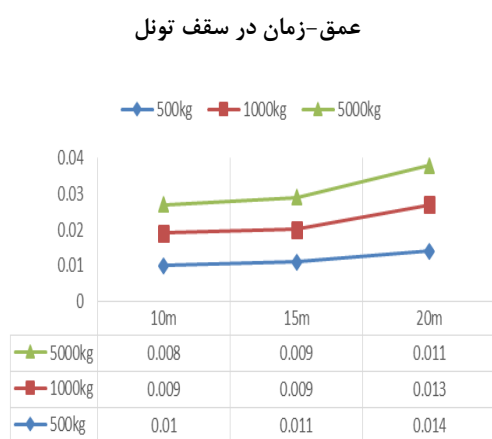
عمق	۵۰۰ کیلوگرم	۱۰۰۰ کیلوگرم	۵۰۰۰ کیلوگرم
۱۰ متر	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۸
۱۵ متر	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹
۲۰ متر	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۱



شکل ۲۲- تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۲۰ متر و بار ۱۰۰۰ کیلوگرم

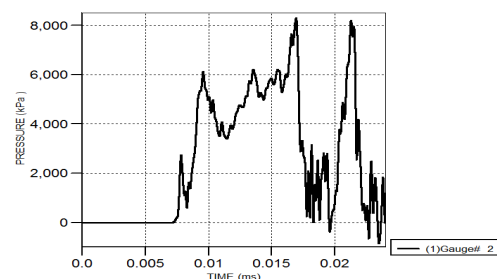
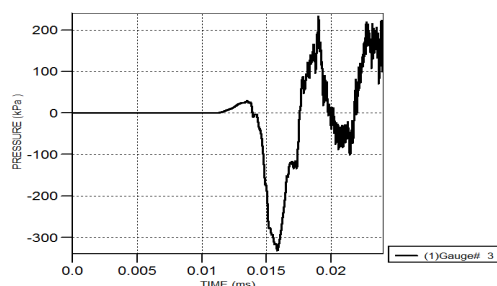


شکل ۲۴- دیاگرام لحظه رسیدن اولین موج شوک بر حسب عمق-زمان در سقف تونل



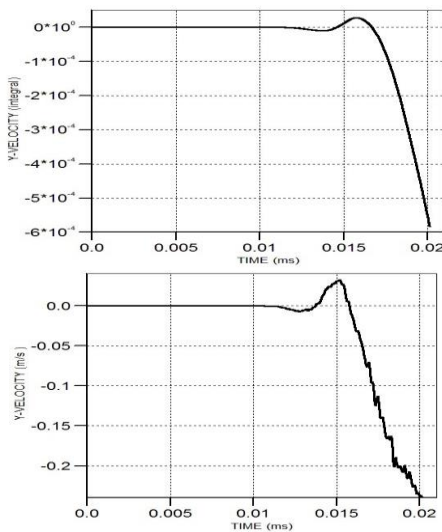
شکل ۲۵- دیاگرام لحظه رسیدن اولین موج شوک بر حسب عمق - زمان در کف تونل

همان‌طور که از شکل ۲۴ و شکل ۲۵، مشخص است،



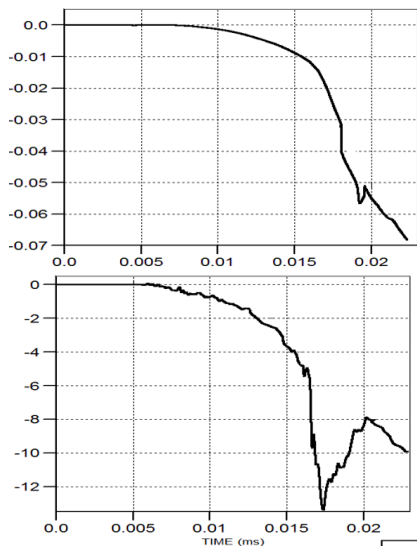
شکل ۲۳- تاریخچه فشار در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در عمق ۱۵ متر و بار ۵۰۰۰ کیلوگرم

همان‌طور که در نمودارهای فشار - زمان ثبت شده توسط سنجه‌ها مشخص است عمق و جرم ماده منفجره تأثیر مستقیمی بر زمان رسیدن اولین موج شوک ناشی از انفجار به تونل دارند. بیشترین فشار منفی نیز در اکثر مدل‌ها در زمان ۰،۰۱۵ رخ داده است و در بیشتر موارد در لحظه آخر فشار به صورت مثبت و روبه‌پایین بوده است. در جدول ۲ و جدول



شکل ۲۷- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم

قطعاً با ادامه روند تحلیل انتظار می‌رود میزان جابه‌جایی و تغییرات سرعت در کف تونل نسبت به سقف کاهش بیشتری داشته باشد. این تغییرات را در دیاگرام آن می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که در دیاگرام مشخص است میزان جابه‌جایی حدود $0/0006$ میلی‌متر است. شکل ۲۸ تا شکل ۴۱، این تغییرات را در حالت‌های دیگر بارگذاری نمایش می‌دهند.

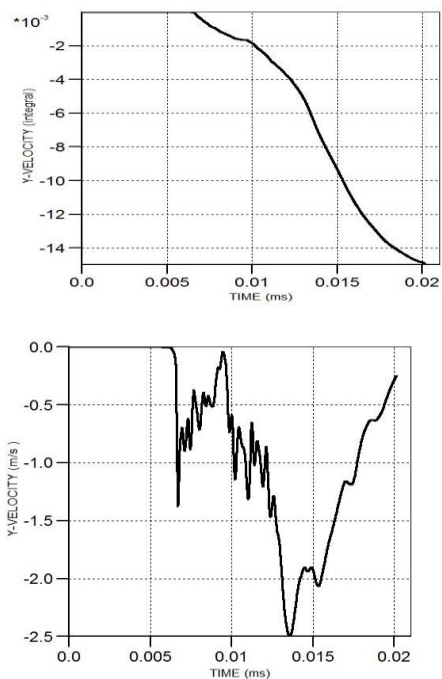


شکل ۲۸- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم

در تمامی حالت‌ها اولین شوک به تاج تونل وارد و پس از زمان $0/02$ تا $0/03$ ثانیه این موج به کف تونل رسیده است. از سویی با افزایش عمق حفاری و نیز با افزایش وزن بار وارده نیز این مقدار افزایش یافته است.

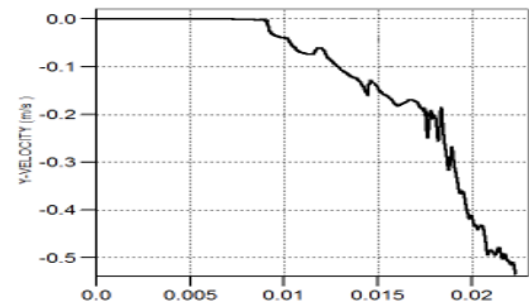
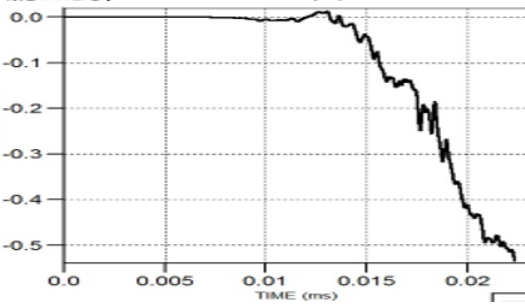
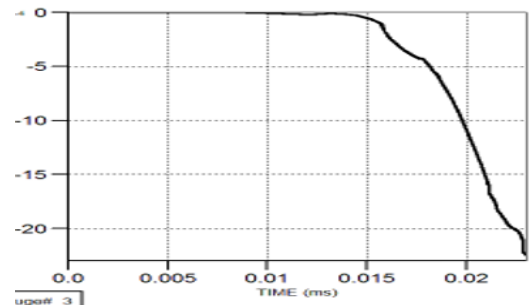
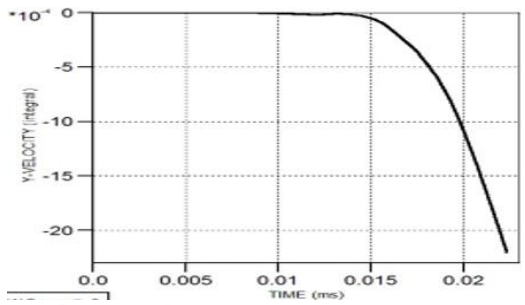
۱۰- تاریخچه سرعت و جابجایی

سرعت حرکت مرکز سقف و کف تونل در راستای عمود بر نقطه انفجار (بردار Y) می‌توان از نمودارهای شکل ۲۶، به دست آورد. همچنین با انتگرال‌گیری از این دیاگرام‌ها می‌توان تغییر شکل (میزان جابه‌جایی) در نقاط مذکور را به دست آورد.



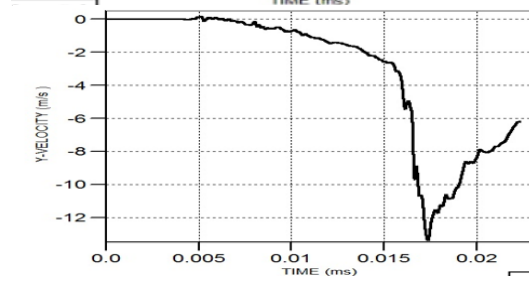
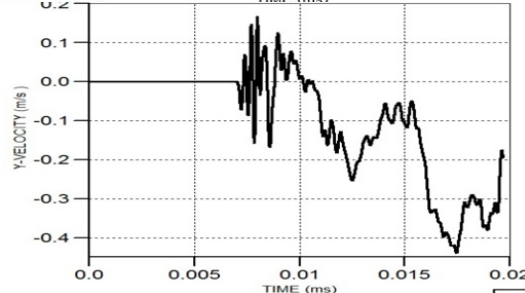
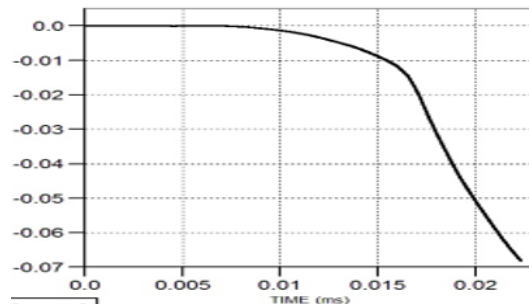
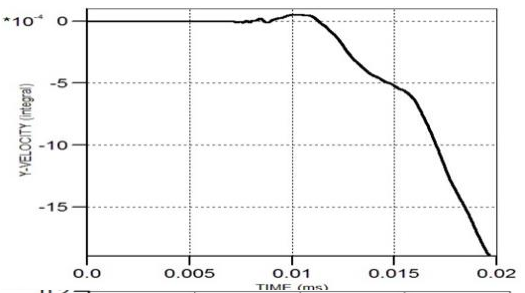
شکل ۲۶- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم

همان‌طور که در شکل ۲۶، مشخص است میزان تغییر شکل مرکز سقف تونل تا لحظه $0/02$ میلی‌ثانیه در راستای بردار Y (راستای عمود بر محل انفجار) حدود $0/0142$ میلی‌متر است که این مقدار بسیار ناچیز و اندک است. البته قطعاً با ادامه تحلیل و گذشت زمان بیشتر این مقدار افزایش خواهد یافت. شایان‌ذکر است که علامت منفی جهت حرکت را به سمت پایین است.



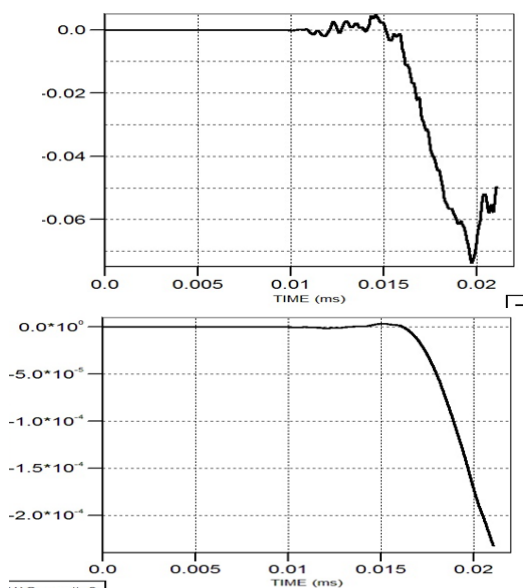
شکل ۳۱- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم

شکل ۲۹- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم

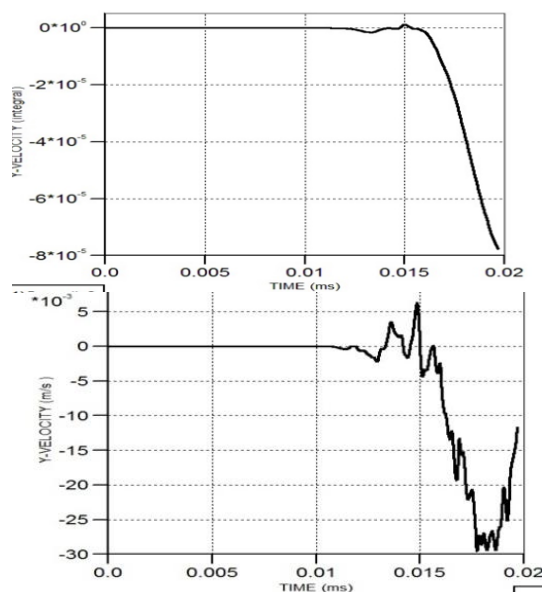


شکل ۳۲- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم

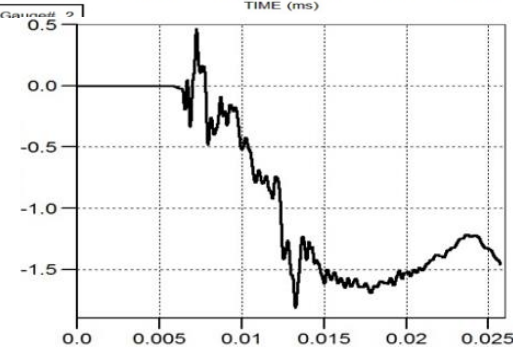
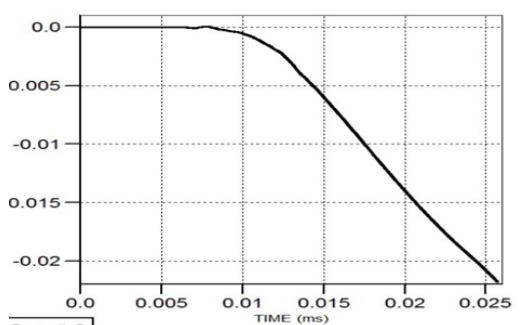
شکل ۳۰- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم



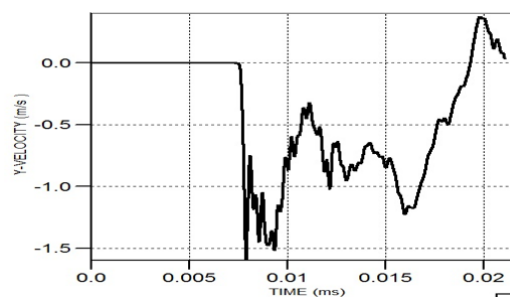
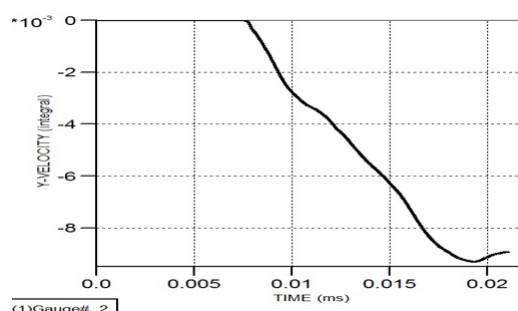
شکل ۳۵- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



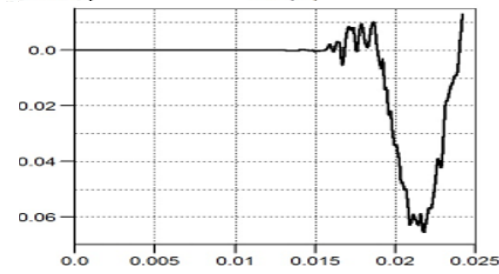
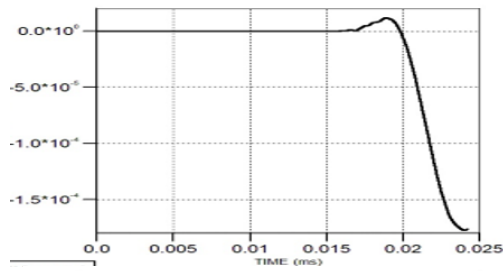
شکل ۳۳- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



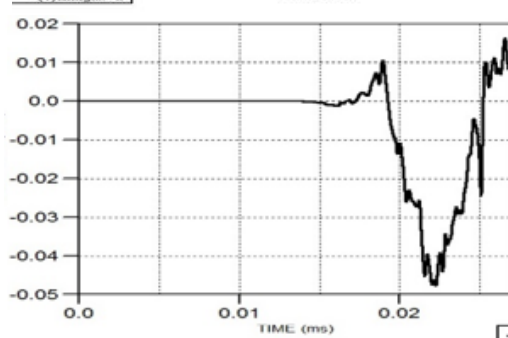
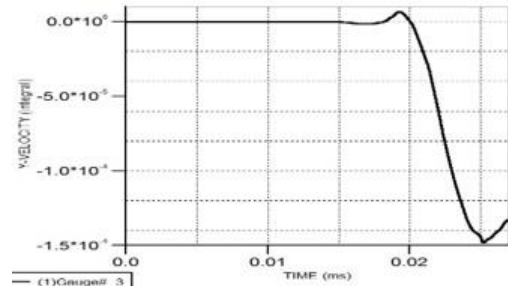
شکل ۳۶- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



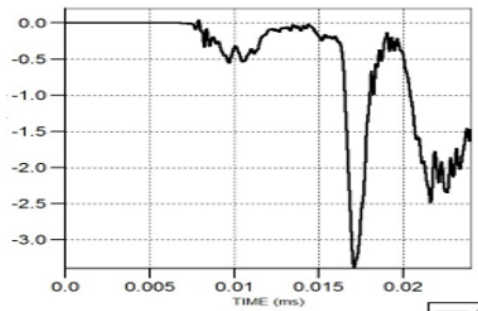
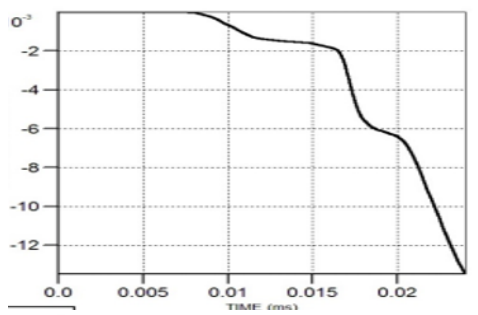
شکل ۳۴- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



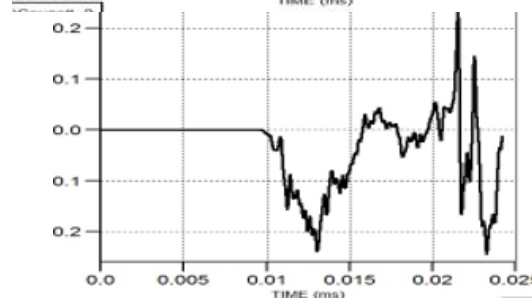
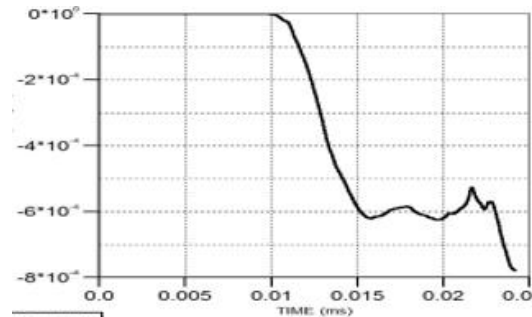
شکل ۳۹- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



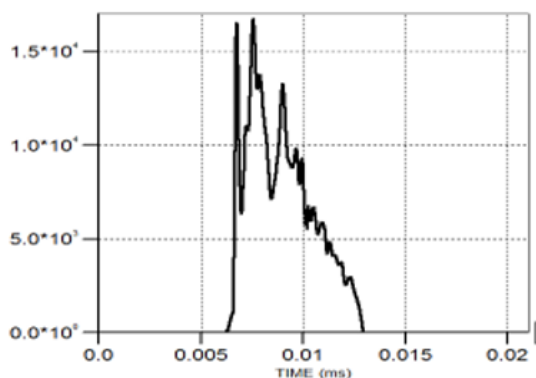
شکل ۳۷- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



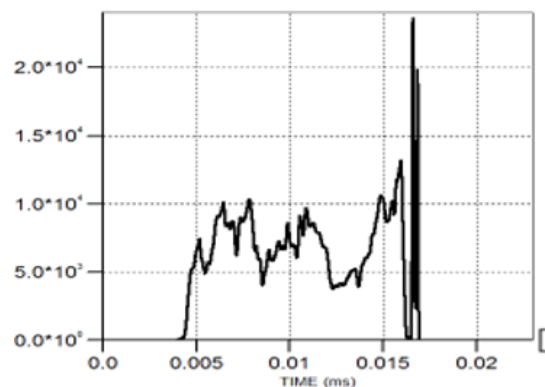
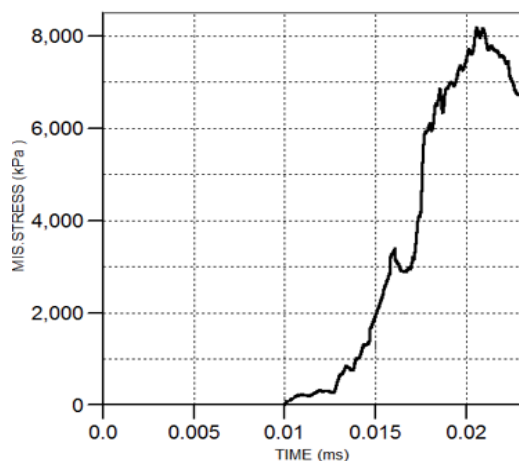
شکل ۴۰- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم



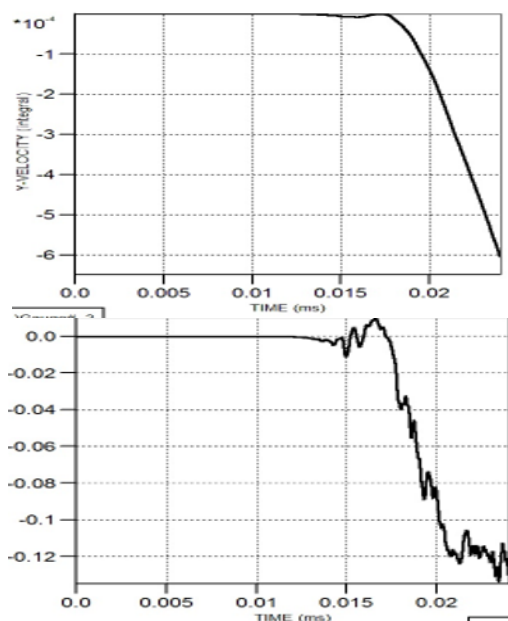
شکل ۳۸- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در سقف تونل در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



ادامه شکل ۴۲- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



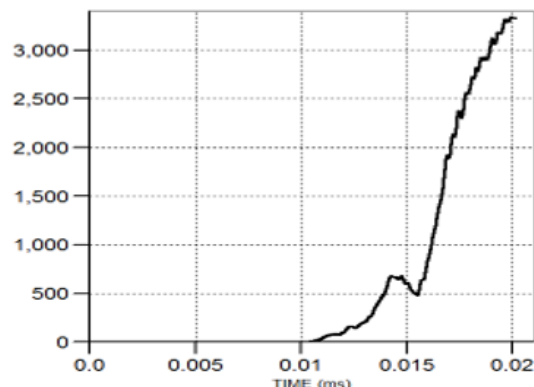
شکل ۴۳- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم



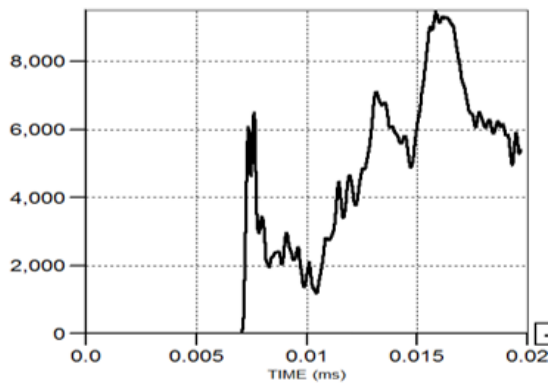
شکل ۴۱- تغییرات سرعت و جابه‌جایی در کف تونل در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم

۱۱- تاریخچه تنش فون میسز

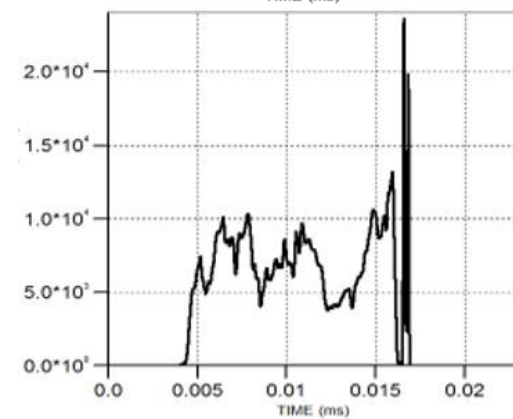
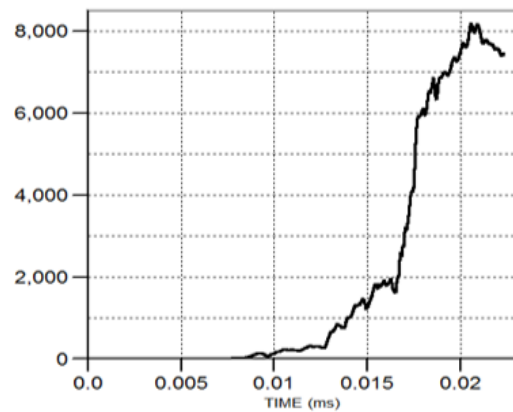
در صورتی که مقدار ماکزیمم تنش فون میسز ناشی شده از قدرت مواد مدنظر بیشتر باشد، سازه قدرت تحمل تنش‌های ایجادشده را نخواهد داشت. این مدل از فرض اولیه فون میسز استفاده می‌کند. بر طبق مدل اولیه فون میسز، تنش تسلیم دارای یک مقدار ثابت است. در نتیجه، استوانه فون میسز دارای یک شعاع ثابت است. تنش درون استوانه، الاستیک است. حالات سطح استوانه، پلاستیک است؛ بنابراین بررسی این دیاگرام‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.



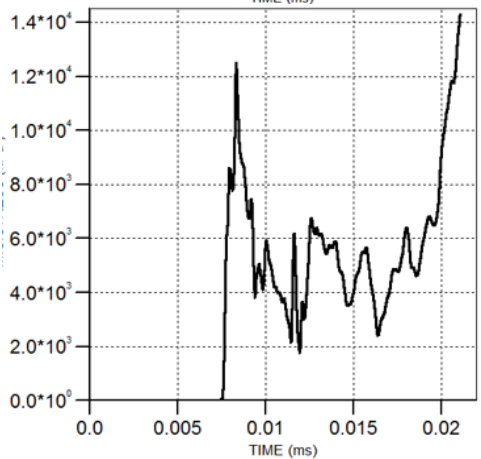
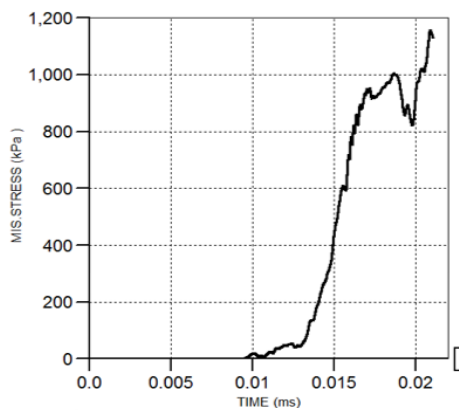
شکل ۴۲- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



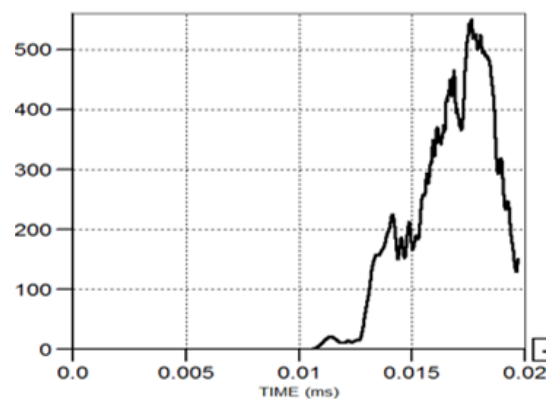
ادامه شکل ۴۵- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



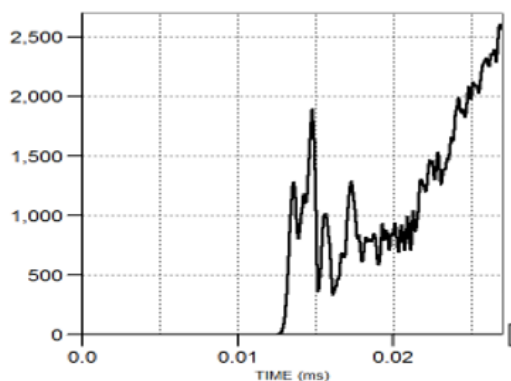
شکل ۴۴- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



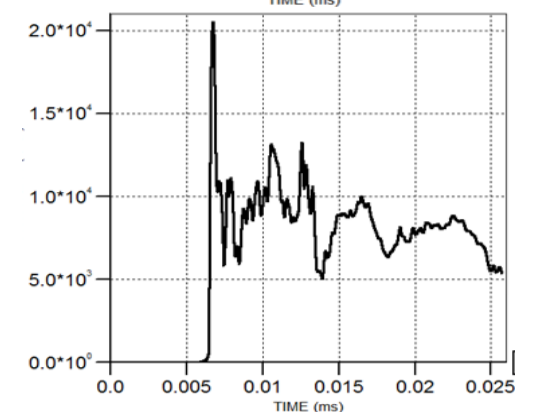
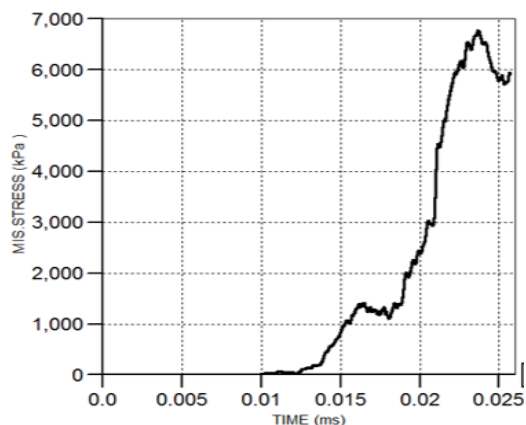
شکل ۴۶- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۱۰۰ کیلوگرم



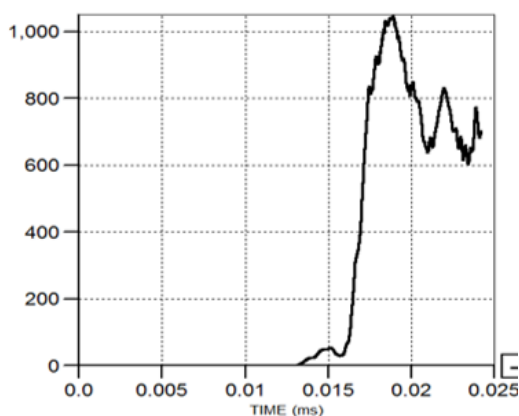
شکل ۴۵- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



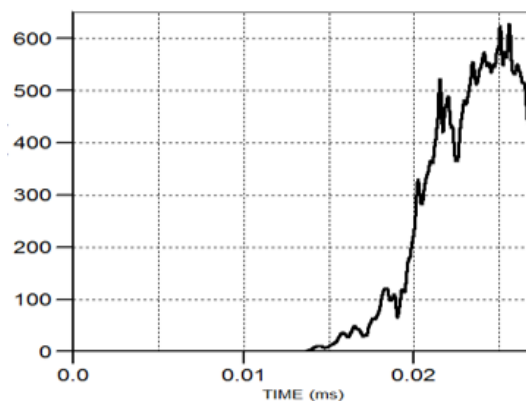
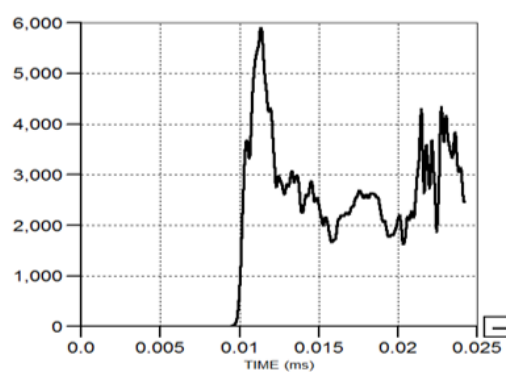
ادامه شکل ۴۸- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم



شکل ۴۷- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۱۵ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۴۹- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۱۰۰۰ کیلوگرم

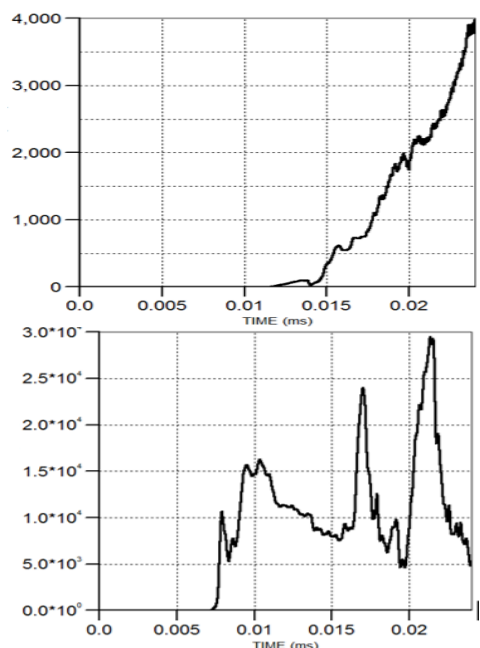


شکل ۴۸- دیاگرام تنش فون میسز - زمان در سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰ کیلوگرم

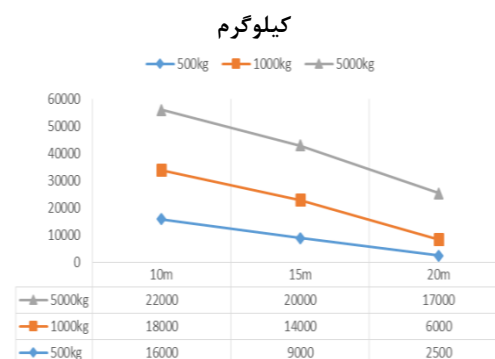
همان‌طور که از شکل ۵۱ و شکل ۵۲ مشخص است، تنش فون میسر و فشار وارد بر تاج تونل در تمامی حالت تا ۳ برابر مقدار وارد بر کف تونل بوده است. این مقادیر با افزایش عمق قرارگیری تونل و نیز با کاهش وزن ماده منفجره، با رابطه نسبتاً خطی، کاهش یافته است.

۱۲- بحث و بررسی

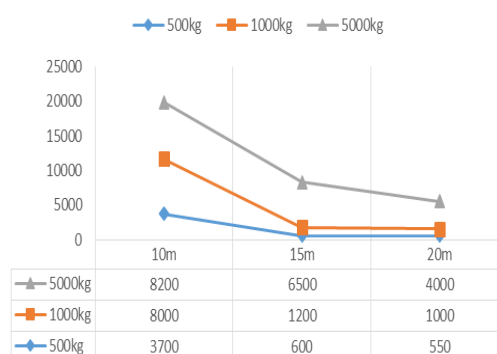
بی‌تردید مهندسی به اهمیت طراحی صحیح سازه‌های ایمن در برابر بارگذاری انفجاری واقف هستند. ولی سازه‌های مهندسی دارای کاربردهای متعدد و مختلفی هستند که همین حوزه کاربرد، نوع بارگذاری و شدت آن را متغیر خواهد ساخت. بعضی از سازه‌ها دارای کاربردهای عمومی و چندگانه مانند انواع ساختمان‌های مسکونی، ورزشگاه‌ها، بیمارستان‌ها، تونل‌ها و... بوده و یکی از وظایف طراح در این موارد، مقاوم‌سازی سازه در برابر بارگذاری انفجاری مرسوم، با سطح شدت متوسط و در محدوده قدرت بمب‌های تروریستی، تعریف می‌گردد. در این نوع طراحی‌ها، عملاً هدف اصلی طراح ایجاد مقاومت در برابر فروریزش آنی است و نباید انتظار داشت که سازه‌ای با چنین سطح از طراحی که در برابر بارگذاری انفجاری قرار گرفته است، قابلیت استفاده مجدد را داشته باشد. البته این استفاده مجدد با انجام تعمیرات جزئی و بعضاً اساسی میسر خواهد شد. در چنین مواردی بیشتر تمرکز بر ایجاد فرصت مختصر برای خروج از محوطه خطر و نجات جان ساکنین سازه است. به عبارتی تحمل سازه‌ای که یک‌بار در برابر بارگذاری انفجاری قرار گرفته و شاید از لحاظ ظاهری نیز دچار مشکل چندانی نباشد، برای بارگذاری با شدت مشابه بعدی قابل تضمین نیست. با این نگاه در این پژوهش به بررسی ۹ حالت مختلف از بارگذاری انفجاری بر روی تونل‌های زیرزمینی پرداخته شده است. تونل‌های زیرزمینی اعم از تونل‌های مترو، زیرگذرها، تونل‌هایی با کاربردهای نظامی، پناهگاه‌ها و... به دلیل قرارگیری در عمق مشخصی از زمین و دسترسی به سطح زمین اهمیت این موضوع را چندین برابر می‌کند. مدسازها در حالت‌های متفاوتی از عمق قرارگیری تونل در خاک و جرم ماده منفجره به کاررفته که TNT بود، انجام شدند. برای ساخت مدل‌ها از نرم‌افزار انسیس استفاده شد و همچنین برای تحلیل مدل‌ها از هایدروکد اتوداین. نتایج به‌دست‌آمده از پایان تحلیل، حاکی از فشار بالای انفجار در



شکل ۵۰- دیاگرام تنش فون میسر - زمان سقف تونل (چپ) و کف تونل (راست) در حالت ۲۰ متر و ۵۰۰۰ کیلوگرم



شکل ۵۱- نمودار ماکزیمم تنش برحسب عمق در حالت‌های مختلف بارگذاری در سقف تونل

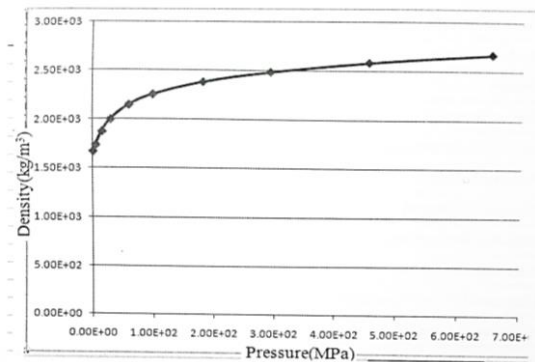


شکل ۵۲- نمودار ماکزیمم تنش برحسب عمق در حالت‌های مختلف بارگذاری در کف تونل

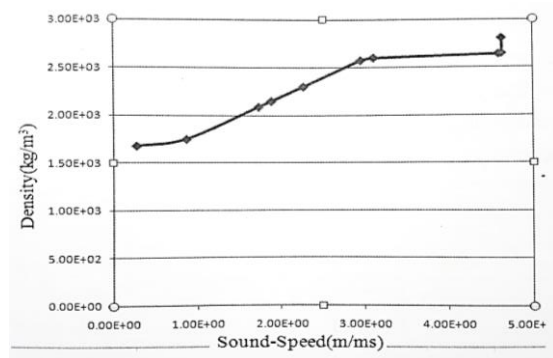
۱۳- نتیجه‌گیری

بررسی‌های این پژوهش نشان داد که اثر بارگذاری انفجاری با عمق قرارگیری هدف در خاک رابطه معکوس دارد و با افزایش عمق قرارگیری تونل، اثر بارگذاری انفجاری به صورت تصاعدی و قابل توجه کاهش می‌یابد. خاک ماده‌ای با تخلخل بالا است و این خلل و فرج درون ماده توسط هوا و یا آب و یا ناخالصی‌های جامد و مایع مختلف پر شده است. به همین دلیل چگالی خاک با بارگذاری‌های مختلف متغیر است. به عبارتی تنش هیدرواستاتیک وارده بر المان‌های مکعبی شکل بی‌نهایت کوچک خاک، باعث تغییر چگالی آن می‌شود. وجود آب، این خاصیت (تراکم‌پذیری) را به طور محسوس بالا می‌برد. به همین دلیل تعریف معادله حالت برای چنین ماده بسیار ضروری بوده، زیرا در تعریف معادله حالت رابطه تنش هیدرواستاتیک و چگالی ماده و یا سایر پارامترهای ترمودینامیکی ماده مشخص می‌شود. استفاده از خاصیت تکیه‌گاهی خاک اطراف تونل و همچنین و به حداقل رسیدن نیروی وزن سازه با قرار گرفتن در عمق مشخصی از زمین باعث کاهش محسوس نیروهای لختی می‌شود. پارامتر دیگری که شاید اهمیت آن از مورد قبلی بیشتر باشد، مربوط به استفاده از خاصیت میرایی و ویسکوالاستیک خاک است که با شدت هرچه تمام‌تر دامنه موج شوک ناشی از انفجار سطحی و زیرسطحی را به حداقل می‌رساند. از سویی در تمامی حالت‌ها اولین شوک به تاج تونل وارد و پس از زمان 0.02 تا 0.03 ثانیه این موج به کف تونل رسیده است. همچنین با افزایش عمق حفاری و نیز با افزایش وزن بار وارده نیز این مقدار افزایش یافته است. در نهایت نتایج نشان داد که تنش فون میسز و فشار وارد بر تاج تونل در تمامی حالت تا ۳ برابر مقدار وارد بر کف تونل بوده است. این مقادیر با افزایش عمق قرارگیری تونل کاهش یافته است.

همان لحظات اولیه شروع تحلیل در خود ماده منفجره و انتقال موج شوک‌های حاصل از آن به عمق زمین تا رسیدن به تونل بود. با پیشروی این موج در درون خاک، دامنه فشار کاهش محسوسی پیدا می‌کند. شکل ۵۳، لحظه برخورد موج شوک درون خاک را در لحظه 0.02 میلی‌ثانیه به تونل را در یکی از حالت‌های مدل‌سازی را نشان می‌دهد که به شکل کروی است. برخورد این موج شوک باعث القای تنش فشاری در سازه پناهگاه خواهد شد. در مدل‌های این پژوهش، از معادله حالت *Compaction* برای تعریف مصالح خاک استفاده شده است. در شکل ۵۳، نمودار تغییرات چگالی برحسب تنش هیدرواستاتیک (فشار) ماده رسم شده است. همچنین هنگام باربرداری از روی شن و یا خاک نیز رفتار ماده را برحسب تغییرات سرعت صوت آن بیان می‌کنند. در شکل ۵۴، تغییرات چگالی برحسب تغییرات سرعت صوت بیان شده است. کاهش سرعت صوت به معنای کاهش فشار بر روی ماده است.



شکل ۵۳- تغییرات چگالی ماده برحسب فشار



شکل ۵۴- تغییرات چگالی برحسب سرعت صوت در هنگام باربرداری

۱۴- مراجع

- Ambrosini, R. D., Luccioni, B. M., Danesi, R. F., Riera, J. D., & Rocha, M. M. (2002). Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface. *Shock Waves*, 12, 69-78.
- Bagheri, S. Tavangar, S. (2015). A review of numerical methods of explosion wave simulation. Research and development of high energy materials. (in persian).
- Fan, H., & Li, S. (2017). A Peridynamics-SPH modeling and simulation of blast fragmentation of soil under buried explosive loads. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 318, 349-381.
- Jalali, S. M., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mine. *Modern Management of Mine Prouducting, Geology & Environmental Protection* (pp. 27-34). Albena: International Scientific GeoConference.
- Jalali, S. M., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. *Safety Science*, 49(5), 664-669. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2010.12.015>
- Jalali, S. M., Emami, M., Najafi, M., Gharib-Bolok, F., Mohammadi, H., & Ramezanzadeh, A. (2015). Underground Coal Gasification as a Strategy to Improve Energy Economy of Iran. *Iranian Energy Economics*, 4(13), 63-88. Retrieved from http://jiece.atu.ac.ir/article_852_202.html
- Karimi Farzaghi, B. Naderi, R (2016) Comparision of the SPH type numerical method and the Euler and lagrangian views in modeling the explosion in warer. *New defense science and technology*. 161-169 (in persian).
- Khatami, S. M. H., & Momenabadi, H. (2022). A Full Coupled Numerical Method for Dynamic Response of Metro Tunnel Subjected to Surface Explosion. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 10(3), 21-36.
- Khayat Zadeh, H. (2012). Simulation of under water explosion. Master thesis, 124-165.
- Koneshwaran, S., Thambiratnam, D. P., & Gallage, C. (2015, June). Blast response of segmented bored tunnel using coupled SPH-FE method. In *Structures* (Vol. 2, pp. 58-71). Elsevier.
- Li, Z., Cheng, Z., Shi, Y., Li, Y., Huang, Y., & Zhang, Z. (2024). A Study on the Attenuation Patterns of Underground Blasting Vibration and Their Impact on Nearby Tunnels. *Applied Sciences*, 14(22), 10.
- Lopez Jimeno, C., López Jimeno, E., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. AA Balkema.
- Mofidi, J. Azaram sa, A. Siah Saraei, A. (2011). Simulation of sun-surface landslide waves by using numerically hydrodynamic method of irregularly planer particles (i-sph). Univesity of sea scince imam komeini.
- Ostad hossein, H. Mohammadi, S. (2014). Improvement of the SPH -free method in solving dunamic

systems. (in persian).

Saedi darian, A. (2011) Impact and explosion engineering with Autodyn comprehensive guide. Darian publishers, Tehran, 1-29.

Wang, Z., Lu, Y., & Bai, C. (2011). Numerical simulation of explosion-induced soil liquefaction and its effect on surface structures. *Finite elements in analysis and design*, 47(9), 1079-1090.

Zamani, j. (2012) Introduction to explosion mechanic. Khaje nasir tusi publishers, Tehran, 46-8.

Numerical modeling of buried tunnels in different depths and under various explosive loadings using SPH method in ANSYS Autodyn

M. Ryan^{1*}; R. Naderi²

1- Master of Science; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, morteza.ryan1990@gmail.com

2- Associate Professor; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, r_naderi@shahroodut.ac.ir

Received: 13 Jan 2025; Accepted: 9 Jun 2025
DOI: 10.22044/tuse.2025.15571.1496

Keywords

Tunnel
Underground space
Explosive loading
SPH
ANSYS Autodyn
Numerical simulation

Extended Abstract

Summary

This study investigates the effects of explosive loadings on underground tunnels using numerical simulation. Explosive loads are highly non-linear and complex, posing serious risks to structures, especially in the context of terrorist attacks and accidental explosions. By employing smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, the behavior of tunnels subjected to TNT charges of 500, 1000, and 5000 kg at depths of 10, 15, and 20 meters is analyzed. The results show a direct correlation between explosive mass and structural damage, and an inverse correlation with explosion depth. Recommendations are made for tunnel depth optimization, soil property enhancement, and structural design improvements to mitigate blast effects.

Introduction

Structures must be designed to withstand dynamic loads, including blast events from intentional or accidental sources. In recent years, explosions—whether caused by terrorism or industrial accidents—have caused extensive damage to critical infrastructures. Even small explosive charges, if placed in vulnerable locations, can lead to structural collapse.

Underground tunnels, such as subway systems and utility corridors, are widely used and often carry critical services. Their buried nature offers some protection, but they remain vulnerable to shock waves from surface and subsurface explosions. Understanding their behavior under such conditions is vital for public safety and infrastructure resilience. With advances in computer modeling, simulations now provide accurate and cost-effective insights into these complex issues.

Methodology and Approaches

A meshless smoothed particle hydrodynamics (SPH) approach was used to simulate explosive loading on an underground tunnel. Explosions involving 500, 1000, and 5000 kg of TNT were modeled at depths of 10, 15, and 20 meters. The models included soil-tunnel interactions and appropriate material properties, including damping and viscoelastic behavior.

The simulations yielded data on pressure distribution, von Mises stress, and displacement under various scenarios. These results were then compared to identify trends related to explosive weight and detonation depth.

Results and Conclusions

The analysis of the results in this study revealed that increased explosive weight significantly elevated stress and displacement levels in the studied tunnel. However, deeper burial of the explosion reduced these effects. The crown of the tunnel consistently experienced higher stress—up to three times more—compared to the base.

Enhancing soil properties and optimizing tunnel depth contributed to reducing the blast impact. Overall, the study confirms the effectiveness of the SPH simulations for evaluating the tunnel performance under explosive loads, and offers practical recommendations for blast-resistant design.
