

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال نهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، (پیاپی ۳۴): صص ۸۱-۶۹

تاثیر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی حفاری شده در محیط‌های آبدار

پرویز رفعتی^{۱*}، بهنام قبادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۴

چکیده

امروزه فضاهای زیرزمینی به واسطه افزایش جمعیت، توسعه فناوری، افزایش تهدیدات نظامی و صرفه‌جویی‌های اقتصادی روز به روز در حال افزایش می‌باشد. میزان تاثیرپذیری فضاهای زیرزمینی در برابر بارهای انفجاری ناشی از تهاجم دشمن، به‌طور مستقیم به موفقیت و کارایی پدافند غیرعامل بستگی دارد. از طرف دیگر، پایداری فضاهای امن زیرزمینی در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به افزایش نیاز برای اجرای این سازه‌ها، ممکن است بسیاری از این پروژه‌ها در شرایط نامطلوب زمین‌شناسی انجام شوند. بنابراین، لازم است پایداری این فضاها برای محیط‌های با واحدهای زمین‌شناسی متفاوت مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در این مقاله با استفاده از روش عددی المان مجزای یک کد عددی توسط نرم‌افزار UDEC توسعه داده شده است. در کد عددی توسعه داده شده، تاثیر سطح آب بر روی لاینینگ تونل بررسی شده است. برای بررسی تاثیر سطح آب بر روی پایداری تونل، فشار ۱۰ تن ماده منفجره به صورت نمایی به بالای تونل اعمال شده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که با افزایش سطح آب، صدمات ناشی از انفجار به پوشش تونل بیشتر می‌شود.

کلید واژه‌ها: بار انفجاری، پایداری تونل، سطح ایستابی آب، روش عددی المان مجزا

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع) - p_rafati@yahoo.com - نویسنده مسئول

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک سنگ - دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه

مقایسه نمودند [۶]. Jiao و همکاران با اعمال شرایط مرزی ویسکوز و واردنمودن آن در برنامه DDA متعلق به Shi انتشار موج در محیط سنگی درزه‌دار را مورد بررسی قرار دادند [۷]. jing و همکاران با نرم‌افزار ANSYS/LS-DYNA تاثیر آب را بر انتقال موج ناشی از انفجار در صدمات وارده به شاتکریت بررسی کردند [۸]. Wang و همکاران انتشار موج تنش و تورق ناشی از آن را در یک صفحه یا دیوار سنگی به‌طور عددی مورد مطالعه قرار دادند [۹]. Mitelman و Elmo با استفاده از یک روش ترکیبی المان محدود- المان مجزا صدمات ناشی از انفجار را بر روی تونل‌های دایروی بررسی کردند [۱۰]. Deng و همکاران روش ترکیبی UDEC-AUTODYN را برای آنالیز بزرگ مقیاس فضاهای زیرزمینی و ۱۰ تن ماده منفجره بررسی کردند [۱۱]. در ادبیات موضوع، بیشتر پژوهش‌های انجام‌گرفته برای محیط‌های بدون سطح ایستایی انجام گرفته است، پژوهش پیش‌رو مروری بر تاثیر سطح ایستایی آب موجود در اطراف فضاهای زیرزمینی در هنگام برخورد بارهای انفجاری می‌باشد.

۲- انفجارهای زیر سطح آب

انفجارهای زیر سطح آب دو فاز رفتاری موج شوک^۱ و پالس حبابی^۲ را توسعه خواهند داد. این دو فاز رفتاری، نتیجه تقسیم انرژی ماده منفجره هستند. با توجه به گفته Smith و Hetherington تقریباً ۵۳٪ انرژی به موج شوک و ۴۷٪ به پالس حبابی اختصاص داده می‌شود. موج شوک عبوری به‌طور قابل توجهی سرعت سیال را افزایش می‌دهد. فشار حداکثر (PP) موج شوک ایجادشده در زیر سطح آب نسبت به موج شوک ایجادشده به‌وسیله انفجارهای سطحی بسیار بالاست، بنابراین، باعث بارگذاری‌های ضربه‌ای^۳ بزرگی می‌شود، هرچند که زمان موج شوک، خیلی کوتاه است. Smith و Hetherington یک عبارت تقریبی را برای فشار بیشینه جبهه موج شوک^۴ به‌دست آوردند [۱۲]:

$$P_m = \frac{355}{z} + \frac{115}{z^2} - \frac{2.44}{z^3} \quad (1) \quad 50 \leq z \leq 10$$

$$P_m = \frac{294}{z} + \frac{1387}{z^2} - \frac{1783}{z^3} \quad (2) \quad 83 \leq z < 50$$

در روابط فوق، پارامتر Z بیانگر فاصله مقیاس شده است. فشار (P_m) برحسب بار و Z برحسب $m/kg^{1/3}$ است. تحلیل و محاسبه نمودار فشار- جابه‌جایی جبهه موج در زیر سطح ایستایی همانند محاسبه

فضاهای زیرزمینی به‌واسطه افزایش جمعیت، توسعه فناوری، افزایش تهدیدات نظامی و صرفه‌جویی‌های اقتصادی به فضاهایی پیچیده اما کارا و مهم تبدیل شده‌اند. این اهمیت وافر را می‌توان در احداث انواع سازه‌های زیرزمینی نظیر تونل‌ها، شبکه مترو، مخازن زیرزمینی و پارکینگ‌ها مشاهده نمود. این سازه‌های مفید در صورت عدم رعایت اصول پدافند غیرعامل در مواجهه با حوادث طبیعی و تهاجمی متحمل خسارت شده و در عمل کارایی خود را از دست می‌دهند. پدافند غیرعامل به‌عنوان بستری مناسب جهت توسعه پایدار زیرساخت‌های هر کشور و به‌عنوان پایدارترین، ارزان‌ترین و صلح‌آمیزترین روش دفاعی و بهترین و مناسب‌ترین شیوه کاهش مخاطرات و آسیب‌پذیری سازه‌های زیربنایی کشور است. کشورهای پدافند غیرعامل را به‌عنوان یک راه‌کار اصلی برمی‌گزینند، هم‌راستا با سیاست‌های تنش‌زدایی، شرایط را به‌گونه‌ای مهیا می‌سازند که مطامع کشورهای تهدیدکننده را به‌حداقل می‌رسانند. مهندسی پدافند غیرعامل یک نیاز معماری، مهندسی و استراتژیک برای کاهش تاثیر عملیات دشمن و تامین امنیت پایدار ساختارهای زیربنایی کشور است که می‌بایست به‌عنوان اصلی‌ترین رکن پدافند در مراحل طراحی و اجرای سازه‌ها مدنظر قرار گیرد. در سالیان اخیر، مطالعات مختلفی هم به‌صورت عددی و هم به‌صورت تجربی برای تاثیر انفجار بر روی فضاهای زیرزمینی انجام شده است. در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره شده است. Ma و همکاران انتشار موج شوک ایجاد شده در اثر انفجار زیرزمینی را توسط نرم‌افزار AUTODYN در توده سنگ شبیه‌سازی کردند [۱]. Zhao و Chen دو برنامه AUTODYN و UDEC را به‌طور همزمان جهت شبیه‌سازی انتشار موج شوک در محیط سنگی درزه‌دار به‌کار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داد [۲]. Fan و همکاران تاثیر شرایط مرزی را با توجه به ورودی تاریخچه تنش ۱ (SHI) و ورودی تاریخچه سرعت ۲ (VHI) بر انتشار موج تنش در توده سنگ درزه‌دار به‌وسیله نرم‌افزار (UDEC) شبیه‌سازی نمودند [۳]. موریس و همکاران پاسخ مجموعه‌های بزرگ مقیاس در برابر بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار را با استفاده از برنامه المان مجزای UDEC شبیه‌سازی نمودند [۴]. Lu در سایتی در سوئد پارامترهای گوناگون موثر بر انفجار همچون مشخصات زمین‌شناسی، چگالی خرج و هندسه محفظه انفجار را مورد بررسی قرار داد و سپس نتایج حاصل از آزمایش‌های صحرایی را در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی به‌کار برد [۵]. Morris و Heuze پس از انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و بررسی نتایج صحرایی، اثرات انفجار را در محیط سنگی درزه‌دار توسط برنامه المان مجزای UDEC مدل‌سازی و با نتایج واقعی

1- Shock wave

2- Bubble pulse

3- Impulse loading

4- shock front

ضربه‌های^۷ و جت آب^۸ هستند. فشار بالا به وسیله شوک موج عبوری ایجاد می‌شود و هنگامی که به سازه برخورد می‌کند می‌تواند باعث ایجاد خساراتی شود. اگر فرکانس پالس حبایی (انقباض و انبساط) با فرکانس سازه‌ای که حباب با آن برخورد می‌کند، برابر باشد، پدیده حرکت ضربه‌ای می‌تواند اتفاق بیفتد [۱۴]. سرانجام مکانیسم سومی هنگامی اتفاق می‌افتد که حباب‌ها به سمت سازه حرکت کنند و جت آب با سرعت بالا شکل گیرد. اگرچه جهت جت آب در جهت سازه باشد، می‌تواند باعث خساراتی به سازه شود. همان‌طوری که ریلی اشاره کرده است، شدت خسارت^۹ تابعی از فاصله لازم برای نفوذ ماده منفجره ثاقب در محل وقوع انفجار نسبت به سازه است. شدت خسارت به وسیله تکرار شکل‌گیری دوباره حباب‌ها و ایجاد ضربه در مجاورت سازه ممکن است باعث سیکل‌های بارگذاری مختلفی شود. همچنین، تشکیل جت آب در فاصله نزدیک به سازه پتانسیل خسارت بارگذاری را افزایش می‌دهد [۱۶-۱۵].

۳- مدل سازی عددی

امروزه روش‌های عددی مختلفی برای تحلیل محیط‌های ژئوتکنیکی مختلف توسعه داده شده است. یکی از این روش‌ها، روش عددی المان مجزا در قالب نرم‌افزار UDEC^{۱۰} برای تحلیل محیط‌های ناپیوسته می‌باشد. در این روش، مجموعه‌ای از بلوک‌های سنگی که با درزه‌ها محدود شده‌اند، تشکیل می‌شود و امکان شبیه‌سازی روابط پیچیده برای برش، جدایش و چرخش بلوک‌ها را فراهم می‌آورد. محاسبات UDEC بر اساس قانون دوم حرکت نیوتون، بقای جرم و اصول مومنتم و انرژی، بنا نهاده شده است. بلوک‌ها می‌توانند صلب و یا تغییر شکل پذیر باشند. در این تحقیق از روش عددی المان مجزا در قالب برنامه UDEC برای شبیه‌سازی تأثیرات انفجار بر روی سازه‌های زیرزمینی استفاده شده است. روش تحلیل دینامیکی نرم‌افزار UDEC در حوزه زمان و به صورت کرنش صفحه‌ای و یا تنش صفحه‌ای است و معادلات حرکت المان‌های مدل با استفاده از روش تفاضل محدود صریح، قابل حل می‌باشد. تحلیل دینامیکی مدل بلوک‌های حاوی ناپیوستگی با در نظر گرفتن جرم بلوک‌های صلب یا جرم نقاط گره‌ای و برآورد مقادیر نیروها، سرعت‌ها و جابه‌جایی‌ها انجام می‌شود. تحلیل دینامیکی برای محدوده وسیعی از مسائل دینامیکی مانند بارگذاری لرزه‌ای، بارگذاری انفجاری و انفجار سنگ در معادن، قابل استفاده است [۱۷].

نمودار موج شوک در هوا می‌باشد، هرچند که تفاوت‌های کمی و فیزیکی در مقدار نتایج، به دلیل محیط دربرگیرنده که در این جا آب است، وجود دارد.

پالس حبایی نتیجه توسعه محصولات انفجار (یعنی گاز) است [۱۲]. اندازه و شکل حباب‌های ایجادشده با زمان متغیر است. در ابتدا شعاع حباب‌ها (به نسبت تعادل هیدرواستاتیکی) به علت انبساط اولیه و اینرسی گازهای فشرده داغ بیشتر است. متعاقباً، فشار حباب‌ها کاهش می‌یابد و حباب‌ها سقوط می‌کنند تا مقدار فشار آن‌ها به فشار هیدرواستاتیک برسد. وقتی که سقوط حباب‌ها پیشرفت می‌کند، گازهای انفجاری دوباره فشرده می‌شوند که در نهایت منجر به بسط دوباره حباب‌ها می‌شود. مجموعه این انبساط‌ها^۱ و انقباض‌ها^۲ ادامه پیدا می‌کند تا زمانی که انرژی ماده منفجره از بین برود و حباب‌ها به سطح آب یا تماس‌های یک سازه زیر آبی برسند. در طی فاز نوسانی^۳، حباب‌ها به شکل قارچی^۴ در می‌آیند. در طی مرحله انقباض، حباب‌ها شکل هلالی^۵ دارند که جت آب قوی‌ای از مرکز هلال آن‌ها می‌گذرد [۱۳].

اندازه حباب‌ها وابسته به پارامترهایی همانند وزن ماده منفجره، ترکیب ماده منفجره و عمق انفجار زیر سطح آب می‌باشد. اسمیت و هرینگتون یک رابطه تخمینی را برای بیشینه شعاع اولیه حباب ارائه کرده‌اند:

$$a_{\max} = \frac{j_{ex} w^{1/3}}{(H + H_0)^{1/3}} \quad (3)$$

که در آن، j_{ex} ثابت تجربی است که وابسته به نوع ماده منفجره است. برای مثال برای TNT مقدار آن برابر با $3.5 \text{ m}^{4/3} / \text{kg}^{1/3}$ است. H عمق ماده منفجره بر حسب متر و H_0 هد اتمسفری بر حسب متر و w وزن خرج بر حسب کیلوگرم است. زمان پالس حبایی، حداقل دو مرتبه بزرگ‌تر از موج شوک است [۱۳]. بنابراین، صدمات وارده به سازه‌های زیر سطح ایستایی با توجه به زمان طولانی پالس حبایی، بسیار مهم می‌باشد [۱۲].

انفجارهای زیر سطح ایستایی آب، تأثیرات زیادی بر سازه‌های زیر سطح آب و روی سطح آب می‌گذارند. در کل، انفجارهای زیر سطح ایستایی آب دارای سه ساز و کار تخریب فشار بالا^۶، تأثیر حرکت

7- Whipping
8- Water jet
9- Damage severity
10 -Universal Distinct Element Code

1- Expansions
2- Contractions
3- Oscillatory
4- Mushroom
5- Torus
6- High pressure

۳-۱- هندسه مدل و شرایط مرزی

هندسه مدل مورد نظر در این مسئله یک تونل نعل اسبی شکل با قاعده به طول ۷/۲ متر و ارتفاع ۹/۱۵ متر می‌باشد که در محیط متشکل از سنگ‌های آهکی با مقاومت بالا واقع شده است. محیط تونل مورد بررسی، دارای یک لایه‌بندی با شیب و جهت شیب ۷۱/۰۴۵ و دو دسته درزه با مشخصات شیب و جهت شیب ۵۷/۱۶۵ و ۸/۲۵۰ می‌باشد. خواص فیزیکی و مقاومتی درزه‌ها مطابق جدول (۱) می‌باشد. ارتفاع روباره میانگین در محدوده مورد بررسی حدود ۳۵ متر می‌باشد. نسبت بین تنش‌های افقی به قائم در محدوده مورد مطالعه ۱/۵ در نظر گرفته شده است. در انجام مدل‌سازی عددی همواره می‌بایستی ابعاد مدل به‌گونه‌ای انتخاب شود که بتواند شرایط محیط را با تقریب خوبی مدل‌سازی کرده و در عین حال شرایط مرزی بر روی نتایج تحلیل تاثیرگذار نباشد. براساس توصیه Meissner به جهت جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر روی نتایج تحلیل، مرز پایین مدل می‌بایست در فاصله $D \times (2-3)$ پایین‌تر از

مرکز تونل و مرزهای جانبی در فاصله $D \times (4-5)$ نسبت به محور تونل در نظر گرفته شوند. در روابط اشاره‌شده، D معرف قطر تونل می‌باشد. با در نظر گرفتن توصیه‌های ارائه‌شده و به جهت جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر روی نتایج حفاری تونل، از مدلی به عرض ۸۰ متر و ارتفاع ۷۰ متر جهت تحلیل مقاطع استفاده شده است. هرچند که در شرایط دینامیکی برای جلوگیری از تأثیر شرایط مرزی بر روی نتایج باید ابعاد مدل بزرگتر از موارد ذکر شده انتخاب شود که با ویسکوز کردن مرزهای مدل تأثیر مرزها بر روی نتایج از بین خواهد رفت. مدل رفتاری در نظر گرفته‌شده برای سنگ بکر مدل رفتاری، الاستوپلاستیک موهر - کولمب (Mohr- elastic/plastic, Coulomb joint area contact elastic/plastic with Coulomb) و برای درزه‌ها مدل رفتاری تماس سطحی درزه - کولمب (slip failure) لغزشی می‌باشد. پارامترهای فیزیکی و مقاومتی سنگ بکر و درزه‌های محدوده تونل به ترتیب در جداول (۱-۲) ارائه شده است [۱۸].

جدول (۱): پارامترهای فیزیکی و مقاومتی سنگ بکر [۱۸]

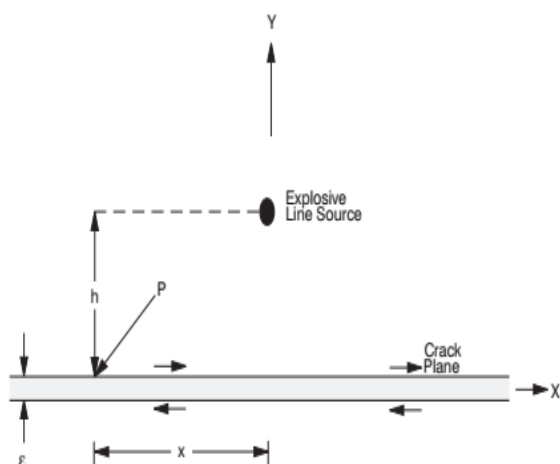
دانسیته (kg/m ³)	مدول بالک (GPa)	مدول برشی (GPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک (degree)	چسبندگی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
۲۷۰۰	۱۰/۷	۷/۴۰	۱۸	۰/۲۲	۵۵	۱۰	۶/۳

جدول (۲): پارامترهای ورودی ناپیوستگی‌ها برای شبیه‌سازی عددی [۱۸]

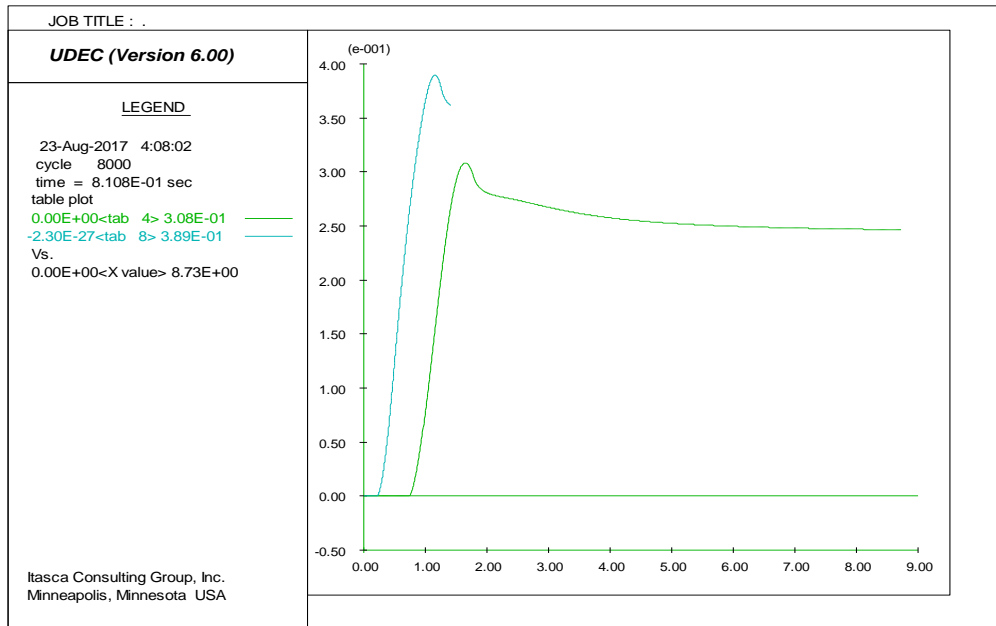
سختی نرمال (GPa/m)	سختی برشی (GPa/m)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (degree)	بازشدگی در تنش نرمال صفر (mm)	بازشدگی باقیمانده (mm)	ضریب نفوذپذیری درزه (Pa ⁻¹ sec ⁻¹)
۳۹	۱۵	۰/۰۳۸	۳۶	۰/۵	۰/۲	۸۳/۳۳

۳-۲- راستی آزمایی مدل عددی

برای هر مدل عددی اولین مرحله صحت‌سنجی نتایج مدل با داده‌های واقعی است. برای راستی‌آزمایی نتایج پژوهش پیش‌رو از مدل Day استفاده شده است. این مدل راستی‌آزمایی متشکل از یک محیط الاستیک نامحدود است که دارای یک ناپیوستگی منفرد صفحه‌ای می‌باشد و در معرض یک چشمه خطی فشاری موازی با ناپیوستگی قرار دارد. مدل مذکور مقدار جابه‌جایی برشی ناپیوستگی را تحت اثر بارگذاری دینامیکی تعیین می‌کند. همچنین، این معادله فرم بسته فرض می‌کند که ناپیوستگی دارای رفتاری ویسکوز در جهت برش و دارای رفتاری صلب در جهت عمود بر سطح ناپیوستگی می‌باشد [۱۹]. مدل شماتیک در شکل (۱) ارائه شده است. مقدار جابه‌جایی برشی ناپیوستگی با استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که مدل عددی توسعه داده شده، تطابق خوبی را با روابط تحلیلی دارد.



شکل (۱): هندسه مدل یک ناپیوستگی مستعد لغزش در معرض بارگذاری دینامیکی [۱۹]



شکل (۲): جابه‌جایی لغزشی به‌دست‌آمده القاء‌شده در ناپیوستگی با استفاده از نتایج عددی (نمودار بالایی) و روابط تحلیلی (نمودار پایینی)

مرزهای میدان آزاد استفاده شده است. در سنگ و خاک عوامل موثر باعث میرایی و استهلاک انرژی در موج ناشی از انفجار می‌شوند. مقدار این میرایی به صورت تاریخچه زمانی هست و به مسیر بارگذاری بستگی دارد. دو دلیل را می‌توان برای اضافه‌نمودن پارامترهای میرایی^۱ موج در تحلیل عددی بیان کرد: اول برای محدود کردن نوسان‌های عددی^۲ و دوم اضافه‌نمودن میرایی فیزیکی به سیستم. مهم‌ترین انواع مدل‌های میرایی موج دینامیکی در روش‌های عددی عبارتند از میرایی رایلی^۳، میرایی محلی^۴، میرایی متناسب با جرم^۵ و میرایی متناسب با سختی سیستم^۶ [۲۰]. در این پژوهش از میرایی رایلی استفاده شده است و پارامترهای این نوع میرایی مورد بحث قرار می‌گیرد.

پارامترهای میرایی رایلی در تحلیل دینامیکی در UDEC بسیار مهم هستند. استفاده از میرایی رایلی همراه با مدل رفتاری الاستیک، روش معمول در شبیه‌سازی کاربردهای ژئوتکنیکی به‌منظور مدل‌سازی تأثیر میرایی فیزیکی است. در صورتی که یک معیار شکست خطی شبیه به موهر-کلمب استفاده می‌شود، پارامتر میرایی نباید بیش از ۰/۵٪ باشد زیرا خود معیار شکست خطی را زودتر القاء می‌کند. در نرم‌افزار UDEC به‌منظور توانایی مدل‌کردن میرایی

۳-۳- تحلیل دینامیکی

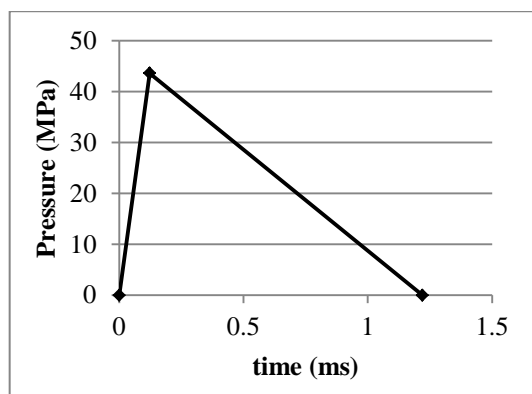
پس از پایان تحلیل استاتیکی، لازم است که تغییراتی در مدل به‌وجود آید تا آماده مدل‌سازی در شرایط دینامیکی شود. بار دینامیک به صورت یک تاریخچه بارگذاری مطابق شکل (۳) اعمال شده است. یکی از مسائل مهمی که در مورد شبکه‌بندی در تحلیل‌های دینامیک مطرح می‌گردد، تعیین ابعاد مناسب شبکه، جهت کنترل عبور موج می‌باشد. در اثر فرضیات مربوط به مدل‌سازی ممکن است در تحلیل‌های دینامیک، انحراف عددی در انتشار امواج ایجاد گردد. فرکانس موج اعمالی به المانهای مدل خصوصیات سرعت موج، دو پارامتری هستند که دقت محاسبات عددی مربوط به انتشار امواج را تحت تأثیر قرار می‌دهند. Kuhlmeier و Lysmer نشان دادند که برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج، اندازه بزرگترین ابعاد المان، Δl باید کوچکتر از $\frac{1}{10}$ تا $\frac{1}{8}$ طول موج ایجادشده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به المان‌های مدل باشد [۲۰]، یعنی:

$$\frac{\lambda}{10} \leq \Delta l \leq \frac{\lambda}{8} \quad (4)$$

که در آن، λ طول موج ایجادشده توسط بزرگترین مؤلفه فرکانس امواج ورودی به المانهای مدل است که قادر به تولید انرژی باشد. به منظور جلوگیری از انعکاس امواج به داخل مدل، از مرزهای ویسکوز در پایه مدل استفاده شده است. بدین ترتیب، امواج انفجاری پس از برخورد با پایه مدل توسط میراگرها جذب شده و از انعکاس مجدد آن ممانعت به‌عمل می‌آید. همچنین، در مرزهای جانبی از

- 1- Damping Parameters
- 2- Numerical Oscillations
- 3- Rayleigh Damping
- 4- Local Damping
- 5- Mass Proportional Damping
- 6- Stiffness Proportional Damping

میلی ثانیه محاسبه شده است. براساس پیشنهاد انجمن مهندسين ارتش آمريكا، ۱۰٪ اين مقدار به عنوان زمان لازم براي رسيدن به فشار حداكثر در نظر گرفته مي شود [۲۱]. شكل موج انفجار را مي توان با فرض ميرايي خطي به صورت مثلثي شكل يا به صورت دقيق تر با ميرايي نمايي نشان داد، شكل موج انفجار اعمالی برای این پژوهش در زیر نشان داده شده است.



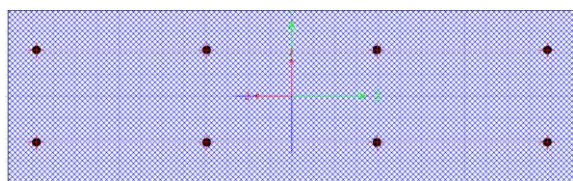
شكل (۳): بار اعمالی ناشی از انفجار

۳-۳- پوشش نهایی تونل

مشخصات مصالح مورد استفاده در پوشش تونل به صورت جدول (۳) می باشد. ضخامت پوشش بتنی در تونل، ۳۰ سانتی متر فرض شده است و در پوشش از آرماتورهای با $\Phi 14@25\text{cm}$ استفاده شده است (شكل ۴). شایان ذکر است که مقادیر مقاومت فشاری تک محوره برای رسم نمودارها ۱۴ مگاپاسکال و مقاومت کششی ۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است [۱۸].

جدول (۳): مشخصات مصالح مصرفی [۱۸]

عنوان	نوع	ملاحظات
بتن سازه ای	C28	مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه ای $f'_c = ۲۸۰ \text{ kg/cm}^2$ دارای حداقل ۳۵۰ کیلوگرم سیمان در مترمکعب
میلگردهای آجدار	A III	حد جاری شدن برابر با $f_y = ۴۰۰۰ \text{ kg/cm}^2$
وزن مخصوص بتن	C28	$\rho_{con} = ۲۵۰۰ \text{ kg/cm}^2$



شكل (۴): مقطع با ضخامت ۳۰ سانتی متری و آرماتورهای $\Phi 14@25\text{cm}$ [۱۸]

در امواج ناشی از انفجار از میرایی رایلی استفاده شده است. بدین منظور، لازم است که ابتدا با تعیین فرکانس طبیعی مدل، مقدار میرایی رایلی را برابر ۵-۲٪ در محدوده فرکانس طبیعی تعریف نمود. جهت محاسبه فرکانس طبیعی، مدل قبل از اعمال بار انفجاری بر روی بستر سخت رها می شود و با شمارش تعداد نوسانات در نقاط شاهد، می توان فرکانس طبیعی مدل را برآورد نمود [۲۰]. فرکانس طبیعی برای مدل مورد بررسی در این پژوهش، عدد ۵ به دست آمده است. به طور کلی، طی فرایند انفجار، محیط به طور تقریبی در دو مرحله بارگذاری می شود. در مرحله اول بارگذاری توسط موج ضربه انجام می شود و در مرحله بعد انبساط گازهای حاصل از انفجار باعث بارگذاری مجدد محیط اطراف می شود. به دلیل این که نرم افزار UDEC قابلیت اعمال فشار گاز را ندارد، بار انفجار فقط به صورت تابع فشار زمان اعمال شده است. برای به دست آوردن حداکثر فشار ناشی از انفجار در ادبیات موضوع روابط متفاوتی ارائه شده است. در تمامی روابط ارائه شده فشار حداکثر تابع عدد مقیاس شده است. عدد مقیاس شده به صورت زیر تعریف شده است [۲۱].

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (۵)$$

که در آن، R فاصله از مرکز انفجار بر حسب متر و W وزن معادل TNT بر حسب کیلوگرم می باشد. در این پژوهش از معادلات هنریچ برای محاسبه مقدار فشار حداکثر ناشی از انفجار استفاده شده است. شایان ذکر است که برای محاسبه شعاع گودال انفجار روابط متفاوتی ارائه شده است. در این پژوهش، به طور تقریبی مقدار $۲/۰$ متر برای شعاع گودال انفجار در نظر گرفته شده است. بنابراین، برای Z مقداری برابر با $۰/۰۹۲ \text{ m/kg}^{1/3}$ حاصل خواهد شد.

$$P_s = \frac{1407.2}{Z} + \frac{554.0}{Z^2} - \frac{35.7}{Z^3} + \frac{0.625}{Z^4} \text{ (KPa)}$$

$$0.05 \leq Z \leq 0.3$$

$$P_s = \frac{619.4}{Z} - \frac{32.6}{Z^2} + \frac{213.2}{Z^3} \text{ (KPa)}$$

$$0.3 \leq Z \leq 1$$

$$P_s = \frac{66.2}{Z} + \frac{405}{Z^2} - \frac{328.8}{Z^3} \text{ (KPa)}$$

$$1 \leq Z \leq 10$$

همچنین، با توجه به رابطه هنریچ، زمان اعمال بار با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

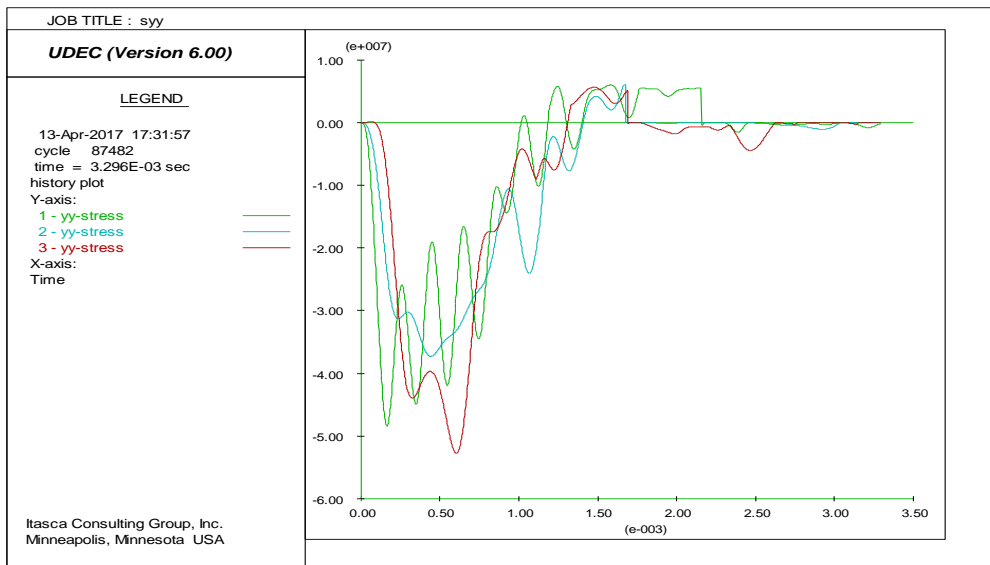
$$\frac{t_d}{\sqrt[3]{\sqrt{w}}} = 10^{-3} (0.107 + 0.444Z + 0.264Z^2 - 0.129Z^3 + 0.0335Z^4)$$

با توجه به رابطه بالا، مدت زمان اعمال بار انفجاری $۱/۲۲$

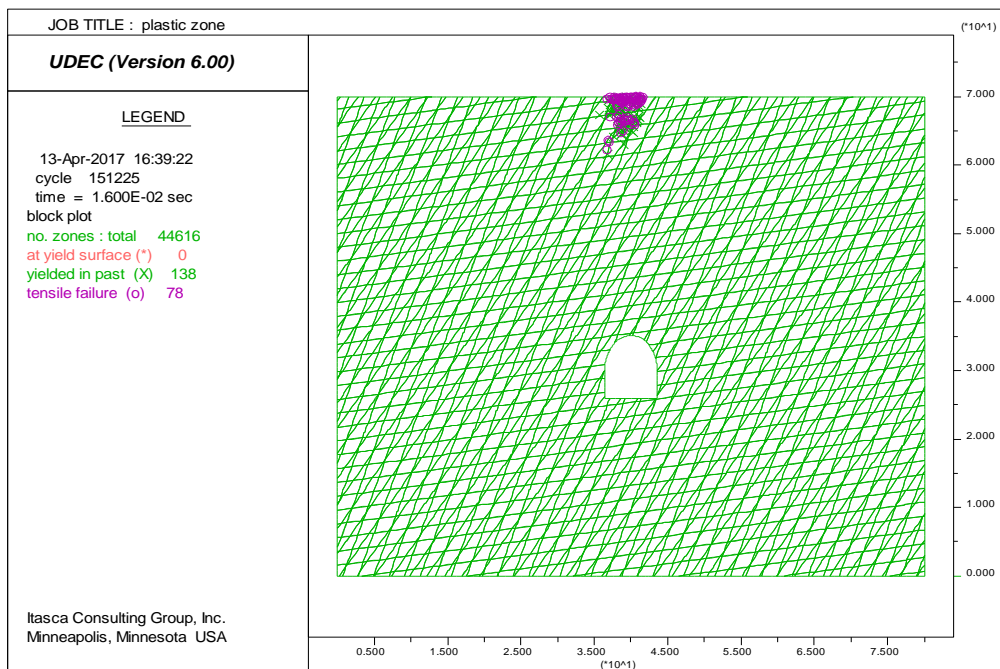
۴- بحث و بررسی

سطح ایستایی آب در هنگام برخورد یک بار انفجاری به سازه‌های زیرزمینی می‌باشد. با دستیابی به نتایج این پژوهش می‌توان به تأثیرات سطح ایستایی آب در اطراف فضاهاى زیرزمینی پی برد. برای دستیابی به اهداف این پژوهش، یک تونل در عمق ۳۵ متری از سطح زمین انتخاب شده است و تأثیر سه سطح ایستایی با ارتفاع مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ متر در هنگام برخورد بار انفجاری بررسی شده است. مطابق شکل (۵)، تنش S_{yy} در زیر محدوده انفجاری به صورت فشاری است که گویای مدل‌سازی صحیح است.

مشکل وجود آب در مناطق حفر تونل از دو دیدگاه در جریان حفر تونل و پس از حفر تونل و در زمان نگهداری آن قابل بحث و بررسی می‌باشد. برای غلبه بر مشکل آب در جریان حفر تونل می‌توان از روش‌های بهسازی زمین همانند انجماد، تزریق، هوای فشرده، استفاده کرد. پس از حفر تونل نیز برای کاهش اثرات آب از روش‌های آب‌بندی استفاده می‌شود. در این مقاله هدف اصلی بررسی تأثیر



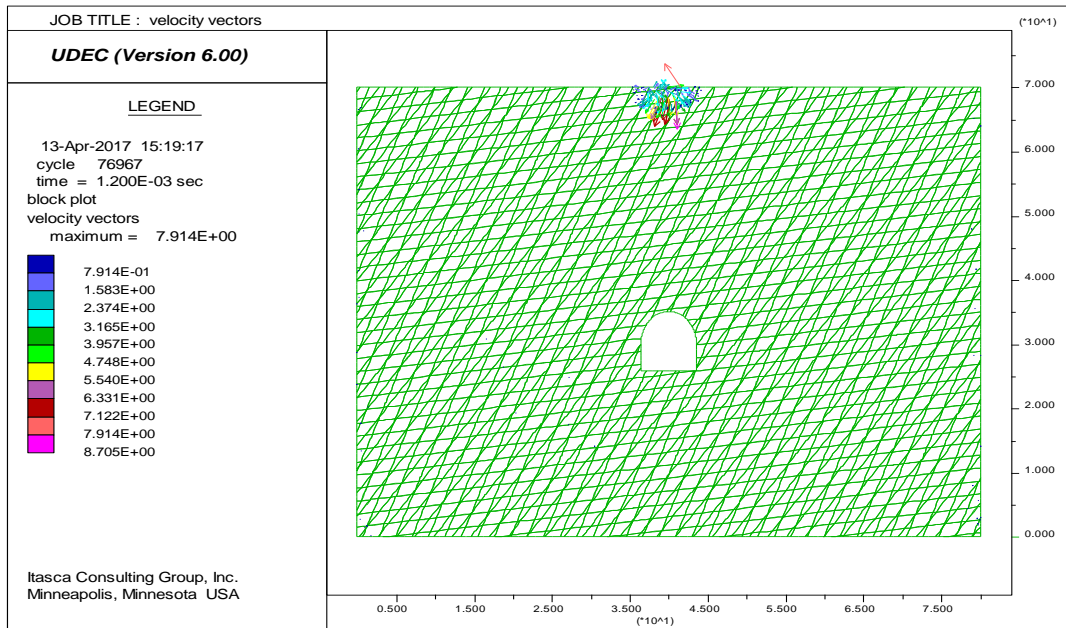
شکل (۵): تنش در راستای قائم در نقاط پائین محدوده انفجاری



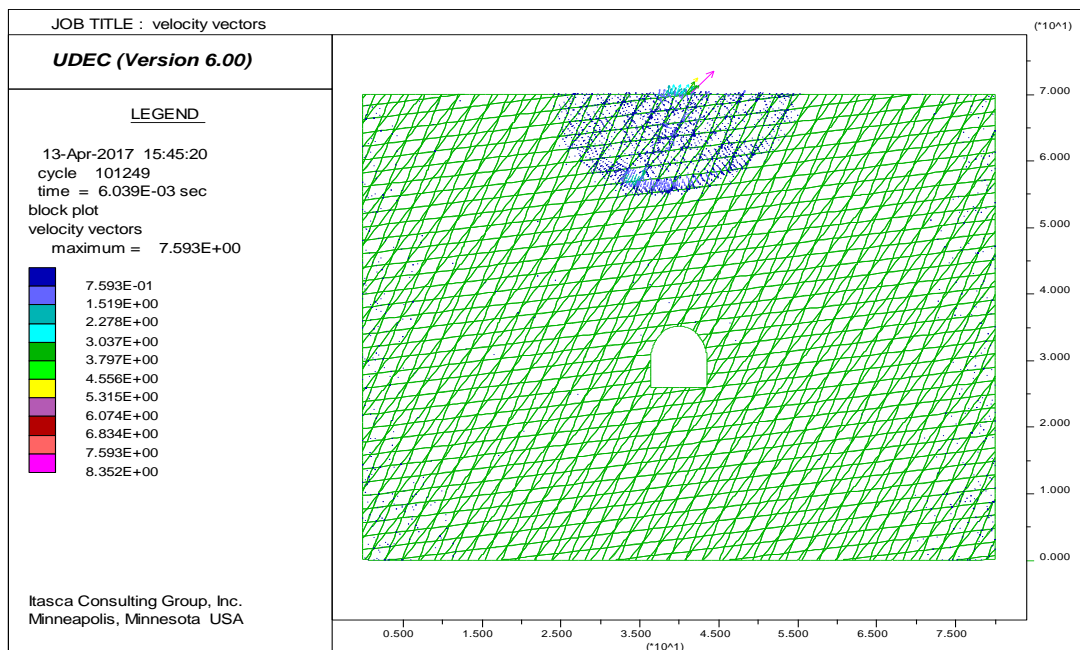
شکل (۶): زون پلاستیک ایجادشده در سطح زمین ناشی از انفجار

در شکل (۷) نحوه انتشار موج در محیط برای زمان‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، موج از سطح به طرف تونل به‌صورت کروی شکل در حال حرکت است که بعد از حدود ۱۶ میلی‌ثانیه این جبهه موج به تونل می‌رسد و دلیل زمان طولانی رسیدن جبهه موج به تونل وجود درزه‌ها به تعداد زیاد در جهت جبهه موج است.

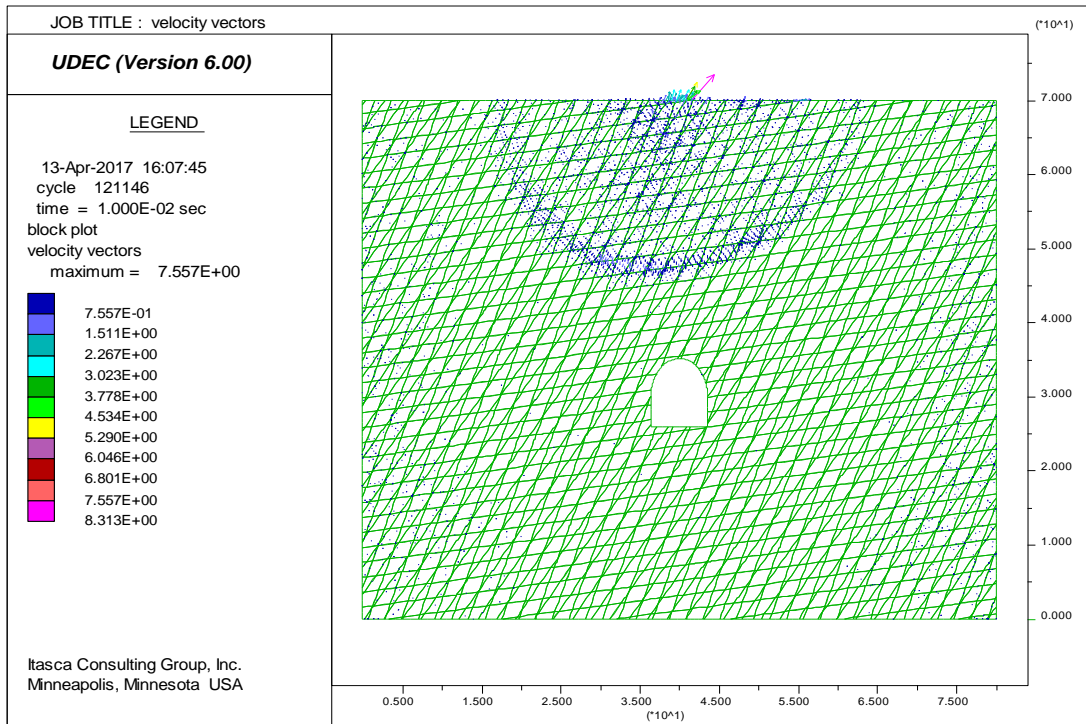
این تنش تا پایان مدت‌زمان انفجار به صورت فشاری است و سپس در یک بازه زمانی کوچک این تنش کششی می‌شود و باعث تشکیل و توسعه زون پلاستیک مطابق با شکل (۶) می‌شود. با توجه به این‌که سنگ بکر مقاومت کششی بالایی را دارا می‌باشد، در محدوده تونل زون پلاستیکی تشکیل نمی‌شود و زون پلاستیک تشکیل شده محدود به ۴ الی ۵ متری پائین‌تر از محدوده زیر انفجار است و بار انفجاری به صورت موج بر روی تونل تأثیر گذار خواهد بود.



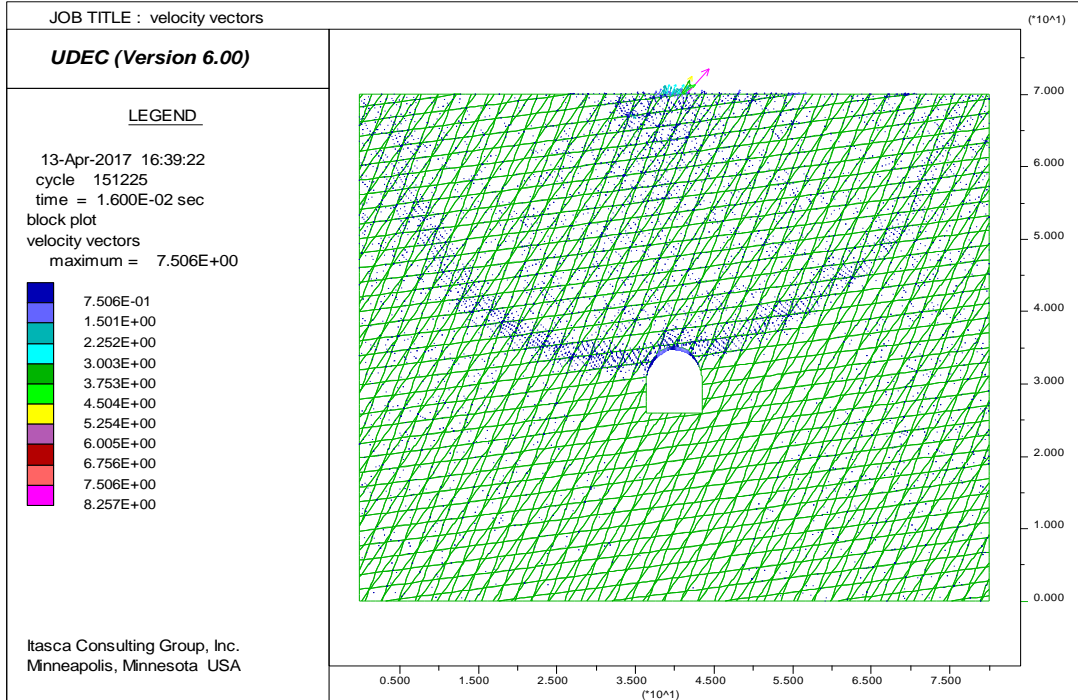
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۷): حرکت جبهه موج در زمان‌های مختلف

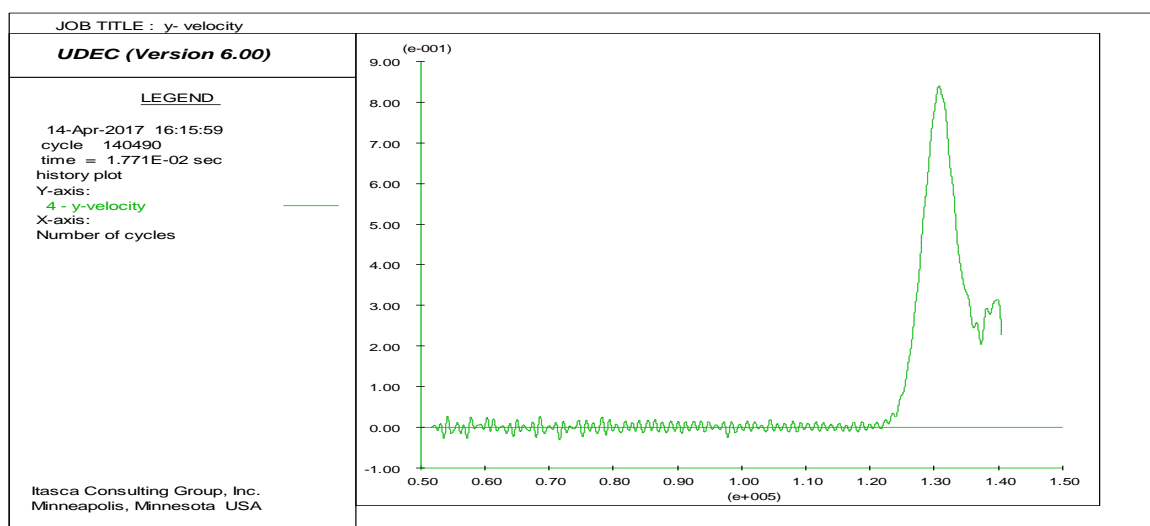
محاسبه شود، لذا لازم است ابتدا فشار وارده در اطراف تونل بدون استفاده از لاینینگ محاسبه شده و سپس بار معادل آن به لاینینگ اعمال شود. این امر نیازمند مطالعه و صرف زمان زیادی می‌باشد و پیچیدگی‌های خاص خود را دارا می‌باشد. بنابراین، در این پژوهش بار ناشی از آب در شرایط استاتیکی به تونل اعمال شده است و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. دیاگرام‌های ممان خمشی - نیروی محوری و نیروی برشی - نیروی محوری در شرایط بدون سطح ایستابی در شکل (۹) نشان داده شده است. مطابق این شکل، تحت اثر بار انفجاری نیروها و ممان‌های وارد بر پوشش تونل بالا خواهد رفت. ولی همچنان تحت بار وارده بر سازه دارای ضریب ایمنی بالاتر از ۱/۴ می‌باشد. همچنین، ممان‌ها و نیروهای وارده به پوشش تونل برای حالات مختلف در جدول (۵) ارائه شده است. با افزایش سطح آب نیروها و ممان‌های وارد بر پوشش تونل افزایش پیدا می‌کند.

با توجه به انتقال موج ناشی از انفجار در محیط و تاثیر آن بر تونل در این پژوهش، میزان خسارت ناشی از آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. معیارهای متفاوتی برای محاسبه میزان خسارت در تونل‌ها تحت بار دینامیکی توسط محققین مختلف ارائه شده است. بیشتر این معیارها بر مبنای سرعت ذره‌ای حداکثر (PPV) ارائه شده‌اند. چند مورد از معیارهای مهم در جدول (۴) ارائه شده‌اند. برای تونل مورد بررسی مطابق شکل (۸) حداکثر سرعت ذره‌ای در تاج تونل تحت اثر بار انفجاری وارده حدود ۰/۸۴ متر بر ثانیه به دست آمده است که با توجه به کیفیت سنگ و این میزان سرعت حداکثر ذره‌ای در تونل مورد بررسی خسارت مورد انتظار می‌تواند افتادن بلوک‌های سنگی از سقف تونل باشد.

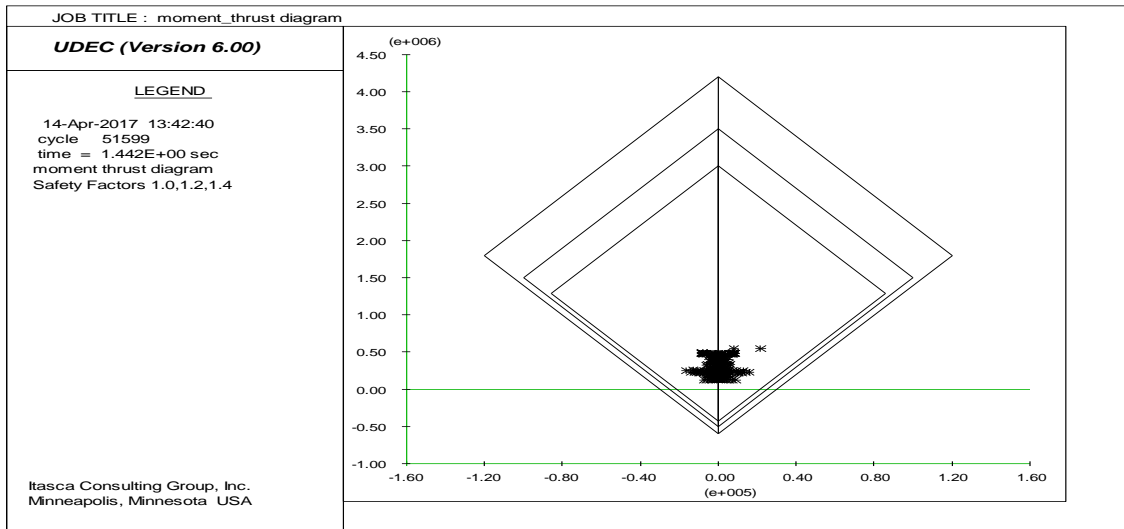
در نرم‌افزار UDEC در صورت وجود آب در محیط، هنگام استفاده از پوشش تونل، اختلاف فشار بین داخل و خارج پوشش تونل نمی‌تواند

جدول (۴): تعیین نوع خسارت وارده به تونل‌ها در اثر انفجار بر اساس حداکثر سرعت ذره‌ای [۲۲]

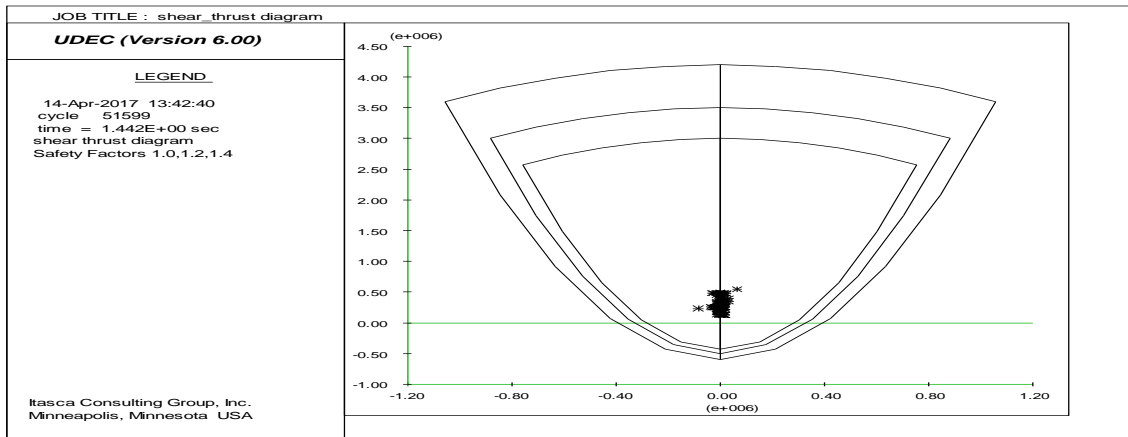
معیار پیشنهادی	حداکثر سرعت ذره‌ای (mm/s)	نوع خسارت
لانگفورد	۳۰۵	افتادن سنگ از دیواره‌ها و سقف تونل
	۶۱۰	تشکیل ترک‌های جدید
هندرون	۴۶۰	ایجاد شکستگی کششی متناوب به میزان کم
	۹۰۰	شکستگی‌های کلی و زیاد
کالدر	<۲۵۴	شکستگی در سنگ بکر رخ نمی‌دهد
	۲۵۴-۶۳۵	شکستگی کششی به میزان کم
	۶۳۵-۲۵۴۰	شکستگی‌های کششی زیاد و شکستگی‌های شعاعی



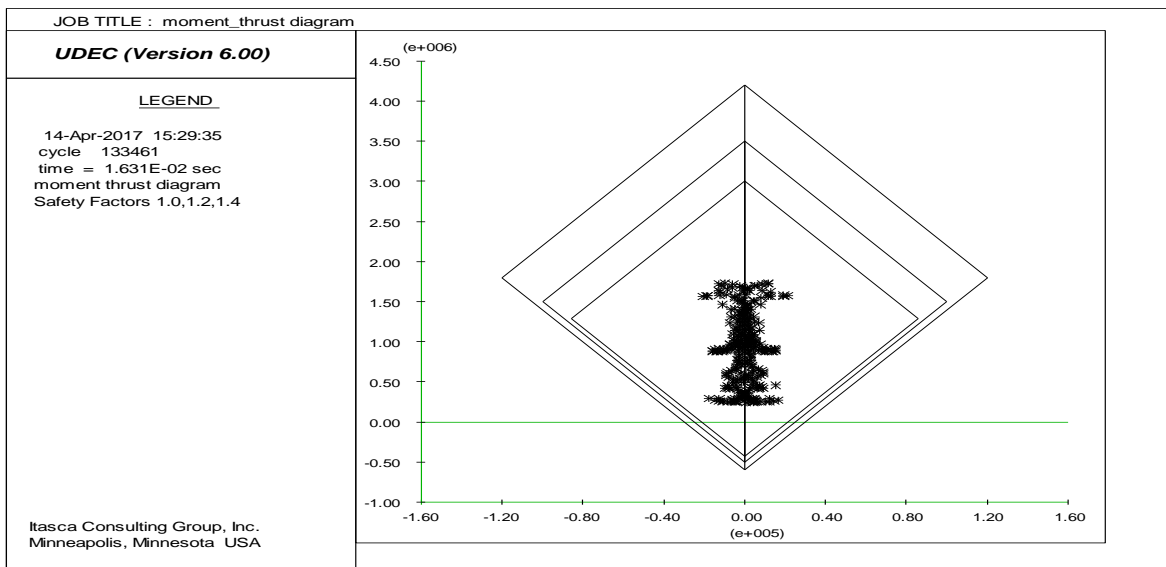
شکل (۸): سرعت حداکثر ذره‌ای در تاج تونل



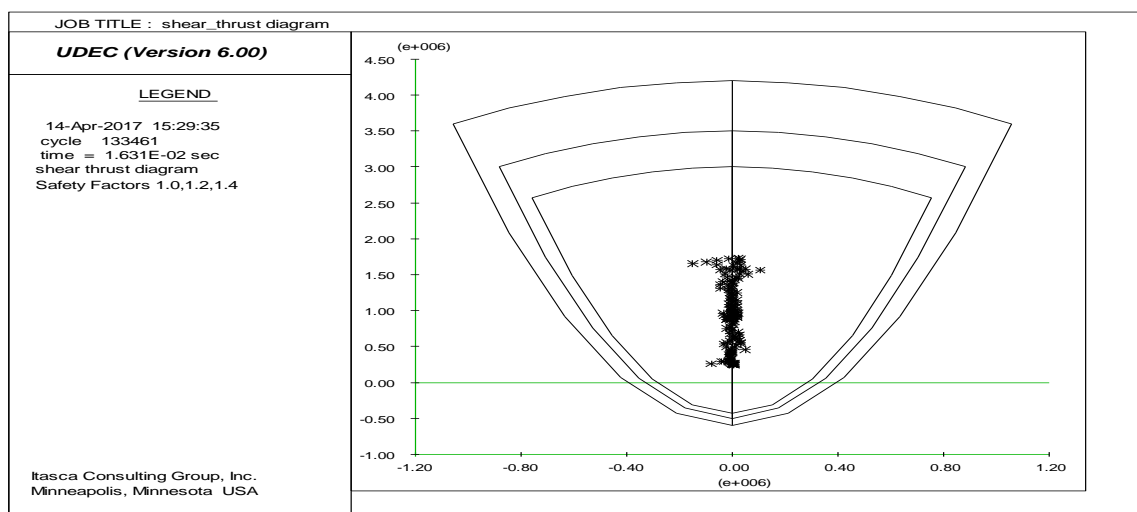
الف) قبل از انفجار



ب) قبل از انفجار



ج) بعد از انفجار



د) بعد از انفجار

شکل (۹): دیاگرام‌های سازه‌ای تونل مورد بررسی برای قبل و بعد از انفجار

جدول (۵): ممان‌ها و نیروهای وارده به پوشش تونل‌ها در حالات مختلف بارگذاری

ممان خمشی (نیوتن - متر)	نیروی برشی (نیوتن)	نیروی محوری (نیوتن)	بدون بار دینامیکی	با بار دینامیکی
$2/17 \times 10^4$	$1/4 \times 10^4$	$5/44 \times 10^5$	بدون سطح آب	
$2/11 \times 10^4$	$1/5 \times 10^5$	$1/6 \times 10^6$	۵ متر سطح آب	
$4/49 \times 10^5$	$4/48 \times 10^5$	$4/05 \times 10^6$	۱۰ متر سطح آب	
$5/32 \times 10^5$	$5/56 \times 10^5$	$4/3 \times 10^6$	۱۵ متر سطح آب	

۵- نتیجه گیری

افزایش فشار منفذی و نرخ جریان باعث تحمیل بارهای اضافی

به لاینینگ تونل خواهند شد.

(۲) در تونل مورد بررسی با توجه به این که سنگ بکر مقاومت کشری بالایی را دارا می‌باشد، در محدوده تونل زون پلاستیکی تشکیل نمی‌شود و زون پلاستیک تشکیل شده ناشی از انفجار محدود به چند متری محل انفجار است و تاثیرات انفجار به صورت موج به تونل منتقل می‌شود.

(۳) در نرم‌افزار UDEC در صورت وجود آب در محیط، هنگام استفاده از لاینینگ تونل، اختلاف فشار بین داخل و خارج تونل نمی‌تواند محاسبه شود، به‌عنوان پیشنهاد برای مطالعات بعدی توصیه می‌شود از نرم‌افزاری استفاده شود که قادر به محاسبه این کار باشد.

(۴) با توجه به تاثیرات مخرب آب بر فضاهای زیرزمینی و ناشناخته‌بودن میزان تاثیر آن در هنگام برخورد بارهای انفجاری پیشنهاد می‌شود تا حدامکان فضاهای زیرزمینی دارای اهمیت استراتژیک در محیط‌های خشک احداث شوند. در صورت وجود آب در محیط تعبیه پوشش‌های زهکش‌دار الزامی می‌باشد.

فضاهای زیرزمینی امروزه دارای کاربردهای متفاوتی از جمله انبارهای برای مهمات و تسلیحات نظامی، پناهگاه‌های زیرزمینی و همچنین مخازن ذخیره‌سازی سوخت هستند. زمانی که این فضاها دارای اهمیت استراتژیک باشند، علاوه بر تحلیل و طراحی آن‌ها در شرایط بارهای استاتیکی و بار زلزله، طراحی دینامیکی آن‌ها در مقابل بارهای انفجاری ضرورت پیدا می‌کند. یکی از مهمترین مباحث در هنگام ایجاد یک فضاهای زیرزمینی بررسی وجود آب در محیط و تاثیرات آن می‌باشد. در این مقاله تاثیر وجود آب بر روی پایداری تونل در هنگام برخورد بارهای انفجاری به تونل با استفاده از نرم‌افزار UDEC مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

(۱) برای انفجارهای زیرسطح ایستایی آب سه ساز و کار اصلی ایجاد فشار بالا، حرکت ضربه‌ای و جت آب عوامل ایجاد خسارات به سازه زیرزمینی می‌باشند. در این پژوهش تحت تاثیر بارهای انفجاری، مقدار پارامترهای فشار منفذی و نرخ جریان سیال اطراف فضای مورد بررسی افزایش یافته است.

۶- مراجع

12. P. D. Smith and J. G. Hetherington, "Blast and Ballistic Loading of Structures," Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 1994.
13. T. L. Geersb and K. S. Hunter, "An Integrated Wave-Effects Model for an Underwater Explosion Bubble," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 4, pp. 1,584-1,601, 2002.
14. E. Klaseboer, K. C. Hung, C. Wang, C. W. Wang, B. C. Khoo, P. Boyce, S. Debono, and H. Charlier, "Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of an Underwater Explosion Bubble Near a Resilient/Rigid Structure," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 537, pp. 387-413, 2005.
15. M. Riley, "Modeling Gas Bubble Behaviour and Loading on a Rigid Target Due to Close-Proximity Underwater Explosions: Comparison to Tests Conducted at DRDC Suffield," DRDC Atlantic TM 2010-238. Canada: Defence R&D Canada-Atlantic, Nov. 2010a.
16. M. Riley, "Analytical Solutions for Predicting Underwater Explosion Gas Bubble Behaviour," DRDC Atlantic TM 2010-237. Canada: Defence R&D Canada-Atlantic, Nov. 2010b.
17. ITASCA Consulting Group Inc., UDEC: Universal Distinct ElementCodeUser's Manual, Version 6.0., 2014.
18. Final report of tunnel km 47+117, Metra Consulting engineering, 2017. (in Persian).
19. S. M. Day, "Test Problem for Plane Strain Block Motion Codes," S-Cubed Memorandum to Itasca, May 1985.
20. R. L. Kuhlmeyer and J. Lysmer, "Finite element method accuracy for wave propagation problems," *J. Soil Mech., Foundations Div.*, vol. 99, pp. 421-427, 1973.
21. DOD, "Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions," Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02. Arlington, Virginia: Department of Defense, December 2008.
22. M. Amini Mazrae No and E. Kavosian, "Hazard (Plastic) Zone Estimation of Tuff Rock Mass Produced by TNT Explosion," *Passive Defense Quarterly*, vol. 5, no. 3, 2008. (in Persian)
1. G.W. Ma, H. Hao, and Y. X. Zhou, "Modeling of wave propagation induced by underground explosion," *Computer Geotech. J.*, vol. 22 (3/4), pp. 283-303, 1998.
2. S. G. Chen and J. Zhao, "A study of UDEC modeling for blast wave propagation in jointed rock masses," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 35, no.1, pp. 93-99, 1998.
3. S. C. Fan, Y. Y. Jiao, and J. Zhao, "On modelling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method," *Computers and Geotechnics*, vol. 31, pp. 57-66, 2004.
4. J. P. Morris, M. B. Rubin, S. C. Blair, L. A. Glenn, and F. E. Heuze, "Simulations of underground structures subjected to dynamic loading using the distinct element method," *Engineering computations*, vol. 21, pp. 384-408, 2004.
5. Y. Lu, "Underground blast induced ground shock and its modeling using artificial neural network," *J. Computers and Geotechnics*, vol. 32, pp. 164-178, 2005.
6. F. E. Heuze and J. P. Morris, "Insights into ground shock in jointed rocks and the response of structures therein," *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, vol. 44, pp. 647- 676, 2006.
7. Y. Y. Jiao, X. L. Zhang, J. Zhao, and Q. S. Liu, "Viscous boundary of DDA for modeling stress wave propagation in jointed rock," *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, vol. 44, pp. 1070-1076, 2007.
8. X. Chang-jing, S. Zhen-duo, T. Lu-lu, L. Hong-bin, W. Lu, and X.- W. fang, "Numerical Analysis of Effect of Water on Explosive Wave Propagation in Tunnels and Surrounding Rock," *J China Univ Mining & Technol* 2007, vol. 17, no. 3, pp. 0368-0371, 2007.
9. Z. Wang, Y. Li, and J. G. Wang, "Numerical analysis of blast-induced wave propagation and spalling damage in a rock plate," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 45, pp. 600-608, 2008.
10. A. E. Mitelman, "Modelling of blast-induced damage in tunnels using a hybrid finite-discrete numerical approach," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 6, pp. 565-573, 2014.
11. X. F. Deng, S. G. Chen, J. B. Zhu, Y. X. Zhou, Z. Y. Zhao, and J. Zhao "UDEC-AUTODYN Hybrid Modeling of a Large-Scale Underground Explosion Test," *Rock Mech Rock Eng* 48, pp. 737-747, 2015.

The Influence of Explosion on the Underground Structures in Watery Media

P. Rafaati*, B. Ghobadi

Abstract

Nowadays, underground structures are increasing day by day due to the population increase, technology development, increasing of military threat and economic saving. The impact rate of underground spaces against explosive loads caused by enemy invasion depends directly on the success and effectiveness of passive defense. On the other hand, stability of the underground spaces is very crucial in various lithological conditions. Due to the increased need for the implementation of these structures, many of these projects may be carried out in unfavorable geological conditions. Therefore, it is necessary to analyze the stability of these spaces for different lithology conditions. In the present study, by means of numerical methods of discrete element, a code has been developed by UDEC software. In the numerical developed code, the influence of water level on the tunnel final support has been investigated. To investigate the effect of water level on the tunnel stability, the pressure of 10 tons of explosives has been exponentially applied to the top of the tunnel. Research indicates that as the water level rises, the damage caused by the explosion increases to the tunnel support.

Key Words: *Explosive Load, Tunnel Stability, Water Table, Numerical Method of Discrete Element*