

بررسی اثرات انفجار پرتابه‌ها در محیط سنگی درزه‌دار با استفاده از روش DEM مطالعه موردی: تونل کیلومتر ۵۰۰+۳۴۵ راه آهن اردبیل - میانه

حسن حسینی رنجبر^{۱*} مرتضی اسماعیلی^۲ حبیب شاه نظری^۳

دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۹/۴

پذیرش مقاله: ۱۳۸۹/۱۱/۶

چکیده

امروزه بشر فضاهای زیرزمینی دارای کاربردهای متنوعی اعم از تونل‌های راه و راه آهن، خطوط مترو، انبارهای زیرزمینی و پناهگاه‌ها می‌باشد. از نکات حائز اهمیت در خصوص این فضاها، طراحی دقیق آن‌ها در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. از دیدگاه پدافند غیرعامل و حفظ شریان‌های حیاتی در شرایط خاص، طراحی تونل‌های راه و راه آهن در برابر بارهای ناشی از برخورد پرتابه‌های انفجاری از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. از طرفی بررسی پدیده برخورد و انتشار امواج ناشی از پرتابه‌ها در محیط‌های سنگی درزه‌دار، دارای پیچیدگی‌های خاص می‌باشد. در این مقاله سعی بر آن است تا اثر انفجار ناشی از برخورد یک پرتابه بر تونل واقع در محیط سنگی درزه‌دار مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور یک مطالعه موردی بر روی تونل کیلومتر ۵۰۰ + ۳۴۵ راه آهن اردبیل - میانه (قطعه سوم) صورت گرفته است. در این راستا عمق نفوذ^۴ پرتابه، شعاع حفره انفجار^۵ و هم‌چنین فشار حداکثر ناشی از انفجار پرتابه GP2000 با استفاده از روابط تجربی موجود محاسبه گردیده و در ادامه برای مدل‌سازی پدیده انتشار امواج از نرم‌افزار المان مجزای UDEC استفاده شده است. با توجه به مشخصات محیط‌های سنگی درزه‌دار و تأثیر آنها بر انتشار امواج ناشی از انفجار، تحلیل حساسیتی بر روی سه پارامتر مدول دینامیکی سنگ، جهت درزه‌ها و نیز ضریب میرایی مصالح صورت گرفته و اثرات آن بر تلاش‌های برشی ایجاد شده در پوشش تونل بررسی گردیده است.

کلید واژه‌ها: تونل، سنگ درزه‌دار، بارگذاری انفجاری، تحلیل دینامیکی، آنالیز حساسیت، مدول دینامیکی سنگ، ضریب میرایی

۱. دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران hassahranjbar@gmail.com

۲. استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران m_esmaeili@iust.ac.ir

۳. استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران hshahnazari@iust.ac.ir

* مسئول مکاتبات

مقدمه

در سال‌های اخیر از دیدگاه پدافند غیرعامل سازه‌های مدفون به عنوان سازه‌هایی امن در برابر حملات هوایی و موشکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان عملکرد دوگانه تونل‌های راه و راه‌آهن هم به عنوان مسیرهای دسترسی و حمل‌ونقل و هم به عنوان سازه‌های مدفون مقاوم در برابر انفجار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. با این نگاه محیط اطراف تونل می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان حفاظت از تونل در برابر چنین خطراتی داشته باشد. در این میان محیط‌های سنگی به دلیل وجود دسته درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در آنها دارای رفتارهای پیچیده و متفاوتی می‌باشند. به طور کلی وجود این درزه‌ها و رفتار آنها در انعکاس و میرایی شوک ناشی از انفجار پرتابه‌ها بسیار مؤثرند. در چند دهه اخیر تلاش‌های فراوانی برای مدل‌سازی انفجار در سنگ به صورت آزمایشگاهی، صحرایی و عددی صورت پذیرفته است. اما هیچ کدام از این روش‌ها به تنهایی برای پی بردن به رفتار توده سنگ در حین انفجار کافی نمی‌باشد. انفجار پرتابه و اثرات ناشی از آن در محیط سنگی درزه‌دار را می‌توان در بخش‌های مختلفی اعم از برخورد، نفوذ، ایجاد گودال انفجار، انتشار موج و بارگذاری ناشی از موج انفجار مورد بررسی قرار داد.

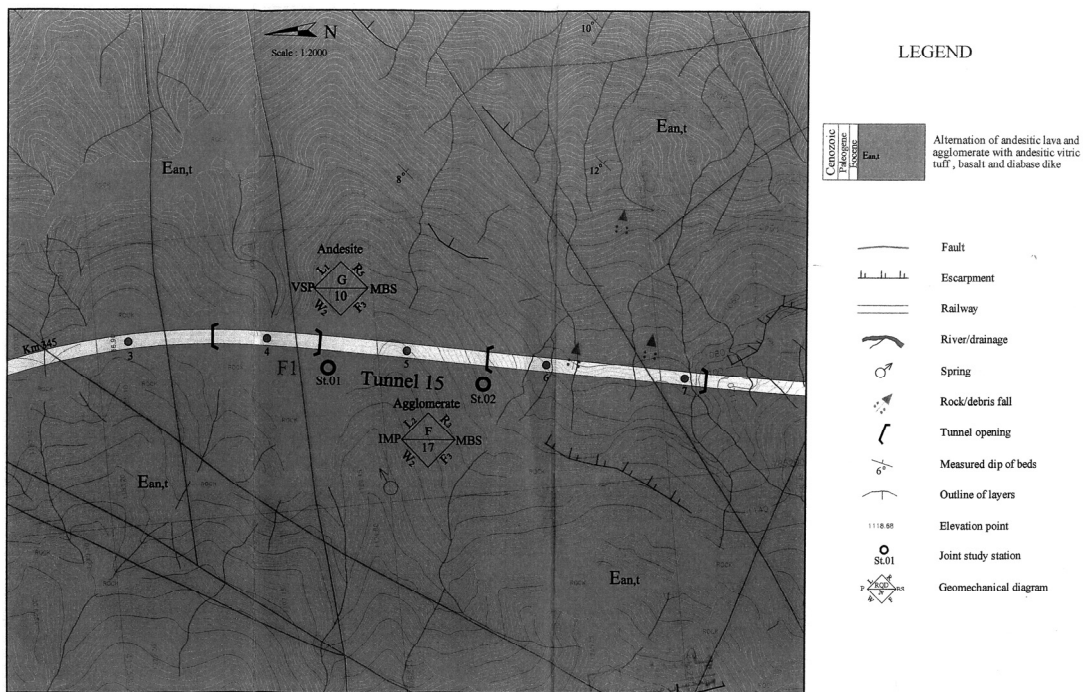
Ma و همکاران (۱۹۹۸) انتشار موج شوک ایجاد شده در اثر انفجار زیرزمینی را توسط نرم‌افزار AUTODYN، در یک توده سنگ شبیه‌سازی نمود. Chen و Zhao (۱۹۹۸) دو برنامه AUTODYN و UDEC را به طور هم‌زمان جهت شبیه‌سازی انتشار موج شوک در محیط سنگی درزه‌دار به کار گرفتند. نتایج این مدل‌سازی عددی همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی از خود نشان داد. Fan و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر شرایط مرزی را با توجه به ورودی تاریخچه تنش (SHI)^۱ و ورودی تاریخچه سرعت^۲ (VHI) بر انتشار موج تنش در توده سنگ درزه‌دار، به وسیله UDEC شبیه‌سازی نمود. Morris و همکاران (۲۰۰۴) پاسخ مجموعه‌های بزرگ مقیاس در برابر بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار را با استفاده از

برنامه المان مجزای LDEC^۳ شبیه‌سازی نمودند. Lu (۲۰۰۵) در سایتی در سوئد پارامترهای گوناگون مؤثر 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 به کاربرد. Heuze و Morris (۲۰۰۶) پس از انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و بررسی نتایج صحرایی، اثرات انفجار را در محیط سنگی درزه‌دار توسط برنامه المان مجزای LDEC مدل‌سازی و با نتایج واقعی مقایسه نمودند. Jiao و همکاران (۲۰۰۷) با اعمال شرایط مرزی ویسکوز و وارد نمودن آن در برنامه DDA متعلق به Shi، انتشار موج تنش در محیط سنگی درزه‌دار را مورد مطالعه قرار دادند. Wang و همکاران (۲۰۰۸) انتشار موج تنش و تورق ناشی از آن را در یک صفحه یا دیوار سنگی به طور عددی مطالعه نمودند.

در مقاله حاضر تلاش شده است تا شرایط پایداری پوشش یک تونل راه آهن در برابر بارهای انفجاری ناشی از پرتابه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به واقع شدن تونل در محیط سنگی درزه‌دار از نرم‌افزار المان مجزای UDEC برای تحلیل دینامیکی اثرات انفجار بر پوشش استفاده شده است. در خصوص مباحث مربوط به میزان نفوذ و تشکیل گودال انفجار و فشار انفجار از روابط تجربی موجود استفاده شده است.

معرفی تونل کیلومتر ۳۴۵+۵۰۰ راه آهن اردبیل - میانه

تونل مذکور بین کیلومترهای ۳۳۸ + ۳۴۵ الی ۵۵۸ + ۳۴۵ خط راه‌آهن اردبیل - میانه، در شمال رودخانه قزل اوزن و در کرانه باختری کیوی چای قرار گرفته است. راستای آن از ابتدا تا انتها N۱۹۲ درجه می‌باشد. بر مبنای پروفیل‌های تهیه شده از تونل، اختلاف ارتفاع بین دهانه‌های ورودی و خروجی این تونل در حدود ۲ متر و شیب طولی مسیر تونل در حدود ۱/۶- درصد (به سوی دهانه خروجی) می‌باشد. پلان زمین شناختی تونل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- پلان زمین شناسی تونل راه آهن اردبیل - میانه [وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵]

زمین‌شناسی تونل

بر مبنای بررسی‌ها و تحلیل‌های صحرایی و پلان زمین‌شناختی تهیه شده، از نظر لیتولوژی مقطع تونل ۵۰۰ + ۳۴۵ از واحد $E_{an,t}$ (تناوب لایه های آندزیت و آگلومرا) می‌گذرد که گاهی به همراه حجم کمی از توف‌های شیشه‌ای آندزیتی، بازالت و دایک‌های دیابازی است. آندزیت‌ها توده‌ای و سخت بوده و بیشتر حجم توده سنگ را تشکیل می‌دهند. آگلومراها دارای سختی کمتری بوده و زودفرسا می‌باشند. محدوده دهانه ورودی تونل در پای دیواره‌ای پرشیب جای داشته و دره مجاور این دهانه عمیق است.

وضعیت آب زیرزمینی منطقه بدین صورت است که در دهانه ورودی سطح آب در تراز ۱۰۶۵ متر و حدود ۱۸ متر پایین‌تر از تراز ارتفاعی دهانه ورودی تونل قرار گرفته و در دهانه خروجی تراز ارتفاعی آب زیرزمینی ۱۰۷۲ متر بوده که حدود ۹ متر پایین‌تر از تراز ارتفاعی دهانه خروجی تونل قرار گرفته است. بنابراین آب زیرزمینی تأثیری چندان بر محدوده احداث تونل ندارد.

مشخصات ژئوتکنیکی تونل

مشخصات مقاومتی سنگ بکر

به عنوان یک آزمون مقدماتی آزمون برجای واگشت چکش اشمیت^۸ جهت تعیین مقاومت تراکمی تک محوری و مدول الاستیسیته سنگ بکر (E_i و σ_{ci}) انجام شده است. مقادیر مقاومت تراکمی سنگ بکر و مدول الاستیسیته محاسبه شده در جدول ۱ ارائه شده است.

مشخصات درزه‌ها

همان‌طور که پیش از این ذکر شد تونل مورد بحث از درون توده‌سنگ‌های آندزیتی و آگلومرای عبور می‌نماید. درزه‌نگاری در چند محدوده ۱۰ متر مربعی انجام شده است و بر پایه این برداشت‌ها سه دسته درزه اصلی تعیین شده‌اند که مشخصات آنها در جدول ۲ ذکر گردیده است.

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی سنگ بکر دربرگیرنده تونل (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵)

نمونه سنگی	مشخصه	مدول الاستیسیته، E (GPa)	چسبندگی، C (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ (درجه)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
آندزیت		۶۱/۴	۶	۴۵	۱۶۰	۱۵
آگلومرا		۲۴	۲	۳۸	۴۸	۴/۵

جدول ۲- مشخصات درزه‌های برداشت شده در مسیر تونل (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵)

دسته درزه	جهت شیب/شیب (درجه)	فاصله داری (m)	پر شدگی (%)	رطوبت
۱	۸۱/۱۲۲	۰/۶	خالی ۹۰ خاک ۱۰	خشک
۲	۸۴/۳۲۸	۰/۷	خالی ۹۰ خاک ۱۰	خشک
۳	۷۰/۱۹۹	۰/۷۵	خالی ۹۵ خاک ۵	خشک

جدول ۳- مشخصات ژئوتکنیکی درزه‌های سنگی

مشخصه	چسبندگی، C (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ (درجه)	سختی قائم (GPa)	سختی برشی (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
مقدار مربوطه	۰/۲	۳۵	۱۰	۴	۰/۲

در این پروژه با انجام آزمون کجی افزایشی^۹ (پیشنهاد شده توسط بارتون و چوبی ۱۹۷۷) بر روی سیستم‌های درزه غالب، زاویه مربوطه تعیین گردیده است. همچنین با انجام آزمایش چکش اشمیت بر روی سطوح درزه‌ها، میزان مقاومت فشاری دیواره درزه‌ها تعیین گردیده است.

پارامترهای مقاومتی درزه‌ها

مقدار سختی قائم و برشی درزه‌ها، k_n و k_s ، با استفاده از روابط مبتنی بر تئوری الاستیسیته محاسبه گردیده است (ITASCA، ۲۰۰۴). با وارد نمودن مقادیر مربوط به سنگ بکر در نرم افزار Roclab پارامترهای مربوط به توده سنگ محاسبه گردید، که مدول یانگ برای توده سنگ‌های آندزیتی و آگلومرای به ترتیب برابر ۱۴/۲ و ۴/۱۵ گیگاپاسکال گزارش شده است (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵). اما در محاسبه سختی‌های قائم و برشی از مشخصات توده سنگ آگلومرای که توده سنگ ضعیف‌تر است و به جهت محافظه‌کارانه بودن نتایج، استفاده گردیده است. مشخصات مربوط به درزه در جدول ۳ ارائه شده است.

پارامترهای دینامیکی سنگ

تعیین پارامترهای دینامیکی سنگ به دلیل رفتار پیچیده توده سنگ بسیار دشوار است. اما از میان پارامترهای دینامیکی سنگ تحقیقات بیشتری بر روی مدول دینامیکی سنگ صورت پذیرفته است. اختلاف بین مدول استاتیکی و دینامیکی اساساً ناشی از این نکته است که دامنه نوسان تنش دینامیکی لازم برای بستن روزنه‌ها، درزه‌ها و ترک‌ها مقدار قابل ملاحظه‌ای است. بنابراین هر چه میزان تراکم سنگ بیشتر باشد احتمال همسان شدن ثابت‌های الاستیک دینامیکی و استاتیکی بیشتر است. هایشی (۱۹۷۶) رابطه تجربی ۱ را برای بیان ارتباط بین مدول استاتیکی و دینامیکی سنگ ارائه نموده است (درانی، ۱۳۸۲):

$$E_d = (1.3 - 1.7) E_s \quad (1)$$

با توجه به این رابطه مقدار مدول دینامیکی برای آندزیت و آگلومرا در محدوده ۱/۳ تا ۱/۷ برابر مدول استاتیکی در نظر گرفته شده است.

مشخصات پرتابه

در این تحقیق، پرتابه مورد نظر جهت بررسی اثراتی مانند برخورد، نفوذ و انفجار، بمب آمریکایی GP2000 انتخاب شده است که مشخصات آن در جدول ۴ ملاحظه می‌شود. در این جدول علاوه بر مشخصات ظاهری و وزن خرج به سرعت برخورد پرتابه با توده سنگ نیز اشاره شده است.

محاسبه عمق نفوذ

با توجه به پیچیدگی رفتار سنگ، مسأله عمق نفوذ پرتابه در این مصالح کماکان توسط محققین مختلف در دست بررسی است. در این تحقیق به عنوان تخمین اولیه برای محاسبه عمق نفوذ از رابطه تجربی ارائه شده توسط انجمن مهندسين ارتش آمریکا (US Army Corps، ۱۹۸۶) استفاده شده است. با توجه به مشخصات سنگ بکر و پرتابه، مقدار نفوذ برابر با ۱۸ اینچ حاصل شده است که با توجه به حداقل مقدار ۳ برابر قطر پرتابه پیشنهادی توسط (US Army Corps ۱۹۸۶) این مقدار عددی قابل قبول و مناسب به نظر نمی‌رسد.

در ادامه برای تصحیح روند محاسبه عمق از رابطه پیشنهادی یانگ (۱۹۷۲) به شرح زیر استفاده شده است (Bulson، ۱۹۹۷):

(۲)

$$P = 0.0031 S N \left(\frac{W_p}{A} \right)^{0.5} (V - 100) \quad V \geq 200 \text{ ft/sec}$$

که در آن:

P = عمق نفوذ (بر حسب فوت)

W_p = وزن پرتابه (بر حسب پوند)

A = سطح مقطع پرتابه (بر حسب اینچ مربع)

V = سرعت برخورد پرتابه (بر حسب فوت بر ثانیه)

S = مقداری ثابت که برای سنگ برابر ۱/۰۷ در نظر گرفته

می‌شود

N = ثابت مربوط به شکل نوک پرتابه

محدوده اعتبار رابطه ۲ در جدول ۵ ارائه شده است:

جدول ۵- محدوده اعتبار پارامترهای مربوط به معادله یانگ

(Bulson، ۱۹۹۷)

وزن:	۲-۳۷۵۰ lb
قطر پرتابه:	۱-۳۰ in
(سطح مقطع/وزن):	۰/۱-۳۸ psi
سرعت برخورد:	۱۰۰-۲۳۷۰ fps

با توجه به مشخصات ارائه شده برای پرتابه، استفاده از رابطه ۲ برای پرتابه GP2000 مجاز می‌باشد. با جایگذاری $S = 1.07$ و $N = 1$ و با توجه به مشخص بودن سایر پارامترها مقدار عمق نفوذ برابر ۷/۴۳ فوت (۲/۲۶ متر) حاصل می‌شود. از طرف دیگر عمق نفوذ با توجه به نمودارهای ارائه شده توسط Bangash (۲۰۰۹) برابر ۳/۵ متر حاصل می‌گردد. در مجموع با توجه به مقادیر محاسبه شده مقدار نفوذ برابر ۳ متر در محاسبات در نظر گرفته شده است.

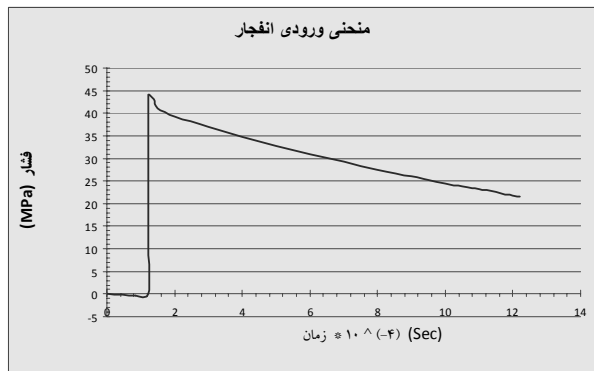
محاسبه قطر گودال انفجار

برای محاسبه گودال انفجار تحقیقات مختلفی صورت گرفته و روابط متنوعی پیشنهاد شده است. کنترل رابطه ارائه شده توسط انجمن مهندسين ارتش آمریکا (US Army Corps، ۱۹۸۶) با توجه به مقادیر موجود به عدد بسیار بزرگی برای گودال می‌انجامد که از نظر مهندسی قابل قبول نیست. بر اساس رابطه ارائه شده توسط بنگاش (۲۰۰۹) مقدار ۱/۱ متر برای شعاع گودال انفجار به دست می‌آید. با توجه به روابط و مقادیر مختلف در نهایت مقدار ۰/۷۵ متر به عنوان شعاع حفره انفجاری در محاسبات عددی در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مشخصات مربوط به بمب GP2000 آمریکایی (US Army Corps، ۱۹۸۶)

مشخصه	وزن کل	وزن خرج	قطر بدنه	نسبت لاغری	سرعت برخورد
مقدار	۲۰۹۰ (lb)	۱۱۰۰ (lb)	۲۳ (in)	۳/۰	۱۱۰۰ (ft/s)
	۹۵۰ (Kg)	۵۰۰ (Kg)	۵۸۵ (mm)		۳۳۵ (m/s)

عددی انجام شده توسط Jiao و همکاران (۲۰۰۳) و Fan و همکاران (۲۰۰۳) مقدار ۳۰ مگاپاسکال برای فشار حداکثر وارد بر سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به پراکندگی قابل توجه اعداد ارائه شده در نهایت رابطه هنریچ (Henrych, ۱۹۷۹) در محاسبات مورد استفاده قرار گرفته است. برای یافتن توزیع فشار انفجار بر حسب زمان از رابطه نمایی پیشنهادی توسط انجمن مهندسی ارتش آمریکا (US Army Corps, ۱۹۸۶) استفاده شده است که بر اساس آن مدت زمان اعمال بار انفجاری برابر با ۱/۲۲ میلی ثانیه محاسبه گردیده است. بر اساس پیشنهاد انجمن مهندسی ارتش آمریکا (US Army Corps, ۱۹۸۶)، ۱۰٪ این زمان به عنوان زمان لازم برای رسیدن به فشار حداکثر در نظر گرفته می شود. در نهایت منحنی بارگذاری ناشی از انفجار وارد بر دیواره حفره انفجاری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی بارگذاری ناشی از انفجار وارد بر دیواره حفره انفجاری

مدلسازی عددی تونل کیلومتر ۳۴۵+۵۰۰ راه آهن اردبیل-

میان

در راستای مدلسازی عددی توده سنگ در برگیرنده تونل و اثر انفجار ناشی از پرتابه بر آن از دیدگاه پدافند، مقطعی بحرانی تلقی می شود که کمترین میزان روباره را در زمان برخورد داشته باشد. با نگاه به پروفیل های طولی و عرضی نشان داده شده در شکل ۳ به عنوان مقطعی بحرانی جهت مدلسازی عددی انتخاب گردیده است. در ادامه جزئیات روند مدلسازی عددی مشتمل بر هندسه، پارامترهای ژئوتکنیکی، شرایط مرزی و روند تحلیل دینامیکی مورد بحث قرار خواهد گرفت.

فشار حداکثر ناشی از انفجار

حداکثر فشار ناشی از انفجار توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برخی از این روابط از تحقیق انجام شده توسط Ngo و همکاران (۲۰۰۳) و نجیمی (۱۳۷۹) استخراج گردیده که در جدول ۶ به آنها اشاره شده است. در تمامی این روابط، فشار حداکثر، تابع عدد مقیاس شده Z مطابق با تعریف زیر می باشد:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

در رابطه ۳، R فاصله از مرکز انفجار بر حسب متر و W وزن معادل TNT بر حسب کیلوگرم می باشد.

به عنوان مثال رابطه ۴، که یک رابطه تجربی می باشد، توسط میلز (نقل از Ngo و همکاران، ۲۰۰۳) ارائه شده است:

$$P_s = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (4)$$

که در آن P_s حداکثر فشار ناشی از انفجار می باشد.

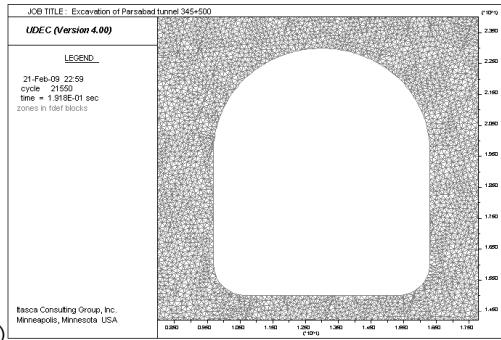
با توجه به اینکه ماده انفجاری بمب GP2000 تریتونال^{۱۰} می باشد، وزن معادل TNT آن برابر با 545 Kg محاسبه می شود. بنابراین Z برابر با $0.092 \text{ mkg}^{-1/3}$ خواهد بود. در ادامه بر مبنای روابط تحلیلی ارائه شده توسط محققین مختلف مقادیر حداکثر فشار محاسبه و در جدول ۶ با یکدیگر مقایسه شده اند.

جدول ۶- محاسبه حداکثر فشار داخل حفره انفجار (نقل از

Ngo و همکاران (۲۰۰۳) و نجیمی (۱۳۷۹))

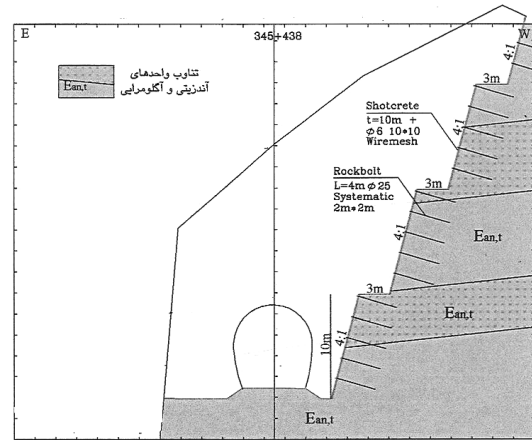
مقدار فشار حداکثر (Ps)	رابطه مورد استفاده
۱۳/۷ MPa	نمینکو (۱۹۵۶)
۸۰۰ GPa	نیومارک و هسن (۱۹۶۱)
۴۳/۶ MPa	هنریچ (۱۹۷۹)
۱/۵ GPa	میلز (۱۹۸۷)
۸۶۱ MPa	برود (۱۹۹۵)
۱۳۶ MPa	نجیمی (۱۳۷۹)

در مطالعات انجام شده توسط Gui و Chien (۲۰۰۶) مقدار حداکثر ۲۰ مگاپاسکال برای خاک و در مطالعات صحرائی و



(ب)

شکل ۴- (الف) هندسه مقطع انتخابی جهت انجام تحلیل دینامیکی (ب) جزئیات مش بندی



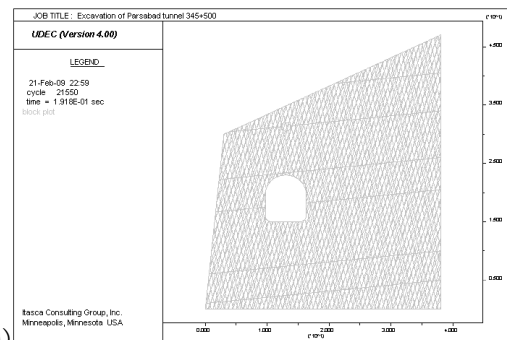
شکل ۳- مقطع دهانه ورودی تونل کیلومتر ۵۰۰ + ۳۴۵ راه - آهن اردبیل - میانه (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵)

مشخصات مصالح

مشخصات سنگ‌های آندزیتی و آگلومرایبی مورد استفاده و همچنین درزه‌ها در جداول ۷ و ۸ ارائه شده است. پارامترهای مربوط به سنگ بکر و نیز پارامترهای مقاومتی سنگ بکر از گزارش وزارت استخراج شده و نحوه محاسبه سختی برشی و قائم مربوط به دسته درزه‌ها نیز پیش در این بخش ۲-۲-۱ ذکر گردید. لازم به ذکر است که برنامه UDEC بر مبنای مشخصات سنگ بکر و شرایط دسته درزه‌ها مدل را تحلیل می‌نماید. رفتار مصالح سنگی به صورت الاستوپلاستیک و مطابق با معیار خمیری موهر- کولمب در نظر گرفته شده است. از آنجا که تونل مورد مطالعه دارای پوشش بتن آرمه می‌باشد، مشخصات مربوط به پوشش در جدول ۹ ارائه گردیده است. لازم به ذکر است که مصالح پوشش نیز الاستوپلاستیک کامل با معیار موهر- کولمب منظور شده است و این مقادیر بر اساس استانداردهای ذکر شده در مراجع (Lamond و Pielert، ۲۰۰۶) ارائه شده است.

هندسه مدل

تونل مربوطه یک تونل راه آهن با مقطع نعلی شکل بوده و دارای ارتفاع ۸ متر و عرض حدود ۶ متر می‌باشد. هندسه مقطع انتخابی و جهت قرارگیری درزه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. برای مش‌بندی مدل از مش مثلثی با فواصل ۰/۲ متری استفاده شده است. جزئیات مش‌بندی نیز در شکل ۴ ملاحظه می‌شود.



(الف)

جدول ۷- مشخصات ورودی سنگ‌های آندزیتی و آگلومرایبی (وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵)

نمونه سنگی / مشخصه	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته، E (GPa)	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ (درجه)	چسبندگی، C (Mpa)	مقاومت کششی (MPa)
آندزیت	۲۵۰۰	۶۱/۴	۴۰/۹	۲۴/۵	۴۵	۶/۰	۱۵
آگلومرا	۲۵۰۰	۲۴	۱۶	۹/۶	۳۸	۲/۱	۵/۴

جدول ۸- مشخصات ورودی درزه‌ها

مشخصه	سختی قائم (GPa)	سختی برشی (GPa)	چسبندگی درزه (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی، ϕ (درجه)	کشش درزه (MPa)
دسته درزه‌های اصلی	۱۰	۴	۰/۲	۳۵	۰/۲

جدول ۹- مشخصات بتن به کار رفته در پوشش نهایی

مشخصه	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته، E (GPa)	ضریب پواسون	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
مقدار مربوطه	۲۵۰۰	۲۱	۰/۲۵	۲۴	۲/۴

که در اینجا مقدار ۳ درصد به عنوان یک مقدار اولیه در تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده است.

انتخاب پارامترهای مناسب جهت انجام آنالیز حساسیت

با انجام تحلیل های اولیه مقادیر تغییر شکل مربوط به محیط محاسبه گردید (شکل های ۵ و ۶). با توجه به مشخصات توده سنگ درزه دار با انجام تحلیل های مقدماتی مشخص گردید که پارامترهایی مانند راستای درزه ها، مدول دینامیکی سنگ و ضریب میرایی نسبت به سایر پارامترهای دخیل بر رفتار سنگ از اهمیت بیشتری برخوردارند. لذا در ادامه با رویکرد بررسی تغییرات این پارامترها بر تلاش های برشی پوشش بتنی تونل ها، تحلیل های دینامیکی مختلفی صورت گرفته است.

برای این منظور جهت درزه ها با اندازه -۶، ۰ و +۶ درجه نسبت به مقدار موجود تغییر داده شده است. در عین حال مقادیر نسبت مدول دینامیکی به استاتیکی سه مقدار ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ انتخاب شده است. همچنین دو مقدار ۰/۰۴ و ۰/۰۶ برای نسبت میرایی سنگ در نظر گرفته شده است. در مجموع ۱۸ حالت در تحلیل دینامیکی تعیین شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است.

برای درک بهتر نتایج سعی شده است نتایج بار محوری و لنگر خمشی بر حسب فشار حداکثر انفجار و به صورت $P/(P_0.R)$ و $M/(P_0.R^2)$ بی بعد گردد. مقادیر تغییرات پارامترهای یاد شده بر حسب مقادیر نسبت مدول دینامیکی به مدول استاتیکی، (E_d/E_s) ، و برای مقادیر مختلف زاویه دسته درزه و نیز برای دو مقدار انتخاب شده درصد میرایی در شکل های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. همچنین تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی نسبت به زمان برای پارامترهای پایه در شکل های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. با توجه به این اشکال ملاحظه می شود که در اثر بارگذاری انفجار نیروی محوری از مقادیر فشاری به مقادیر کششی تبدیل یافته است.

در روند تحلیل اولیه پس از تعادل محیط در اثر وزن مصالح در روندی گام به گام حفاری صورت گرفته و پس از آن پوشش نهایی نصب شده است.

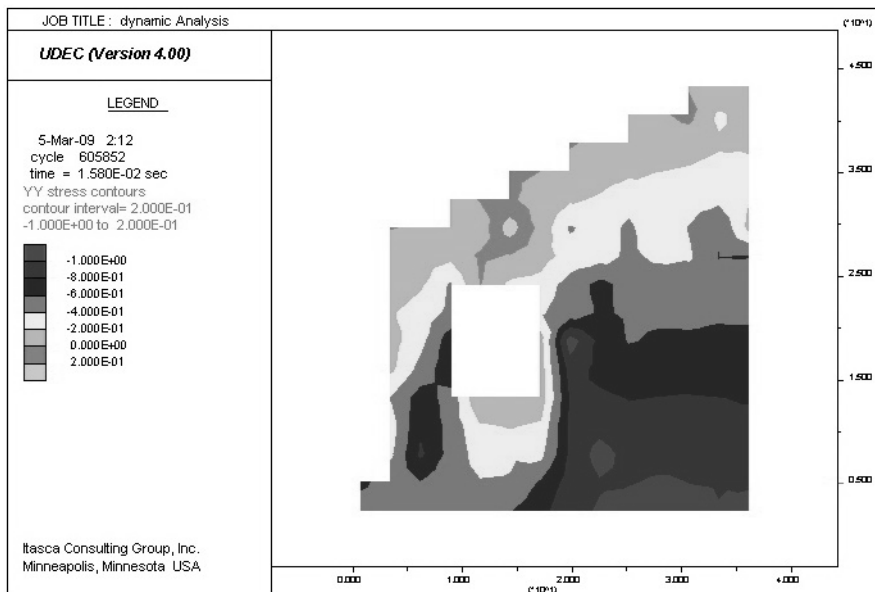
شرایط مرزی

با توجه به محدود بودن مدل به مرزهای طبیعی، در طرف راست و کف مدل ضمن بستن شرایط مرزی به منظور حفظ تعادل از دیدگاه جذب انرژی موج انفجار و عدم انعکاس آن در مرزها از شرایط مرزی Lysmer و Kuhlmeier (۱۹۶۹) استفاده شده است (نقل از ITASCA، ۲۰۰۴).

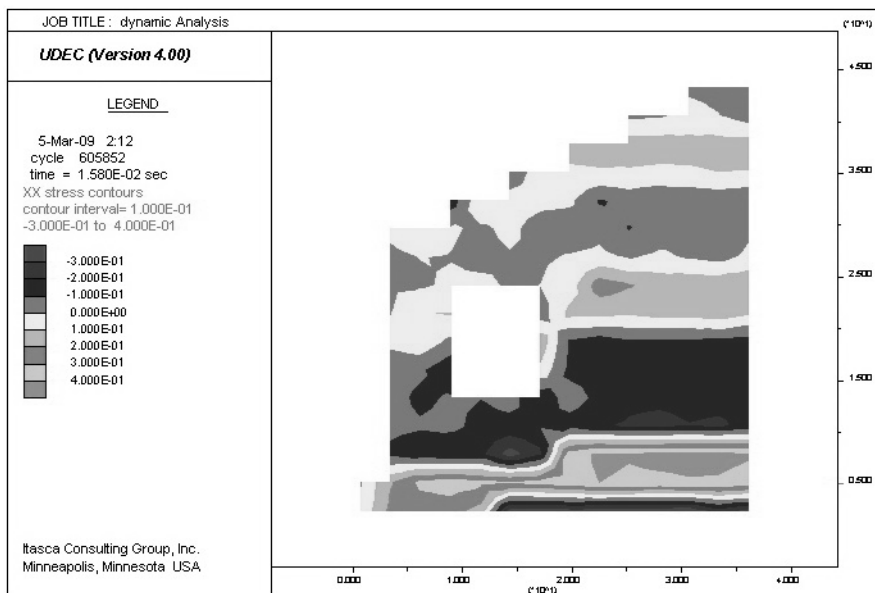
میرایی محیط

در برنامه UDEC از دو نوع میرایی جهت منظور نمودن اتلاف انرژی محیط استفاده می شود: میرایی محلی^{۱۱} و میرایی رایلی^{۱۲}. میرایی محلی عمدتاً برای مسائل استاتیکی مورد استفاده قرار می گیرد در حالیکه میرایی رایلی مختص مسائل دینامیکی می باشد. برای محاسبه ضرائب میرایی رایلی علاوه بر درصد میرایی، ξ ، فرکانس طبیعی ارتعاش سیستم مورد نیاز خواهد بود.

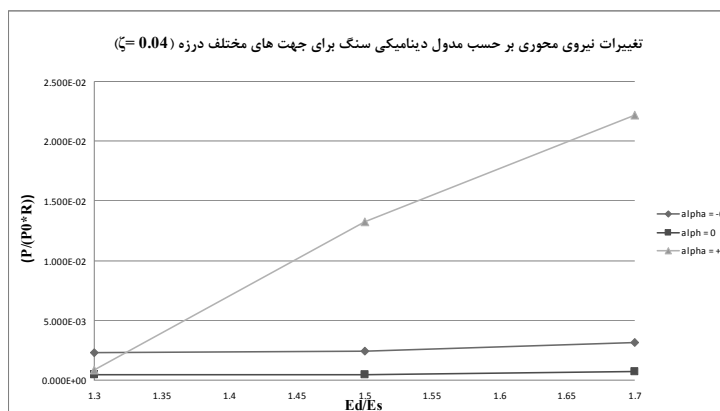
در برنامه UDEC، تعیین فرکانس طبیعی محیط بر اساس سقوط ناگهانی بلوک سنگی بر روی پی صلب تحت اثر وزن خود می باشد. مقدار فرکانس طبیعی حاصل از برنامه UDEC برابر با ۵۵ هرتز می باشد. همچنین مقدار فرکانس طبیعی به صورت تئوری برابر با ۷۰ هرتز به دست می آید. در مدل سازی از مقدار ۶۰ هرتز به عنوان فرکانس طبیعی جهت انجام تحلیل دینامیکی استفاده شده است. درصد میرایی برای مصالح ژئوتکنیکی بین ۲ تا ۱۰ درصد در نظر گرفته می شود،



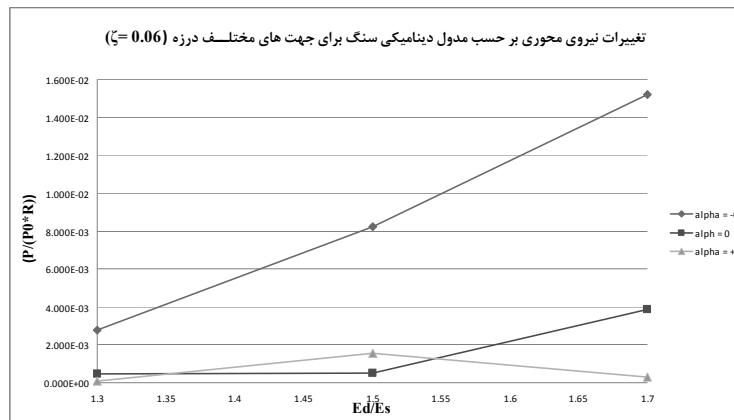
شکل ۵- وضعیت تنش‌های قائم در پایان تحلیل دینامیکی



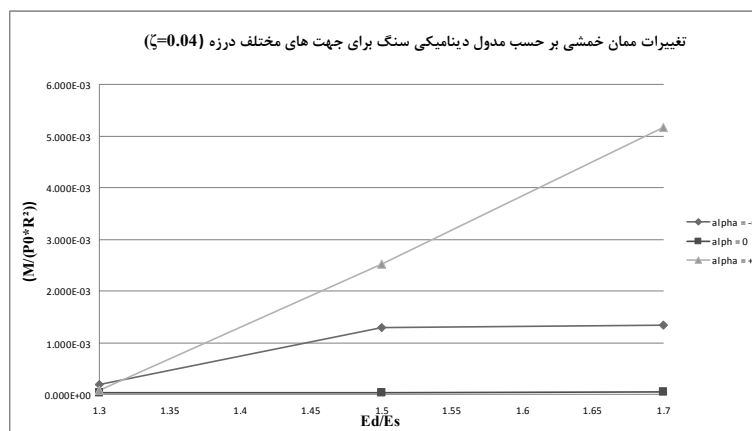
شکل ۶- وضعیت تنش‌های افقی در پایان تحلیل دینامیکی



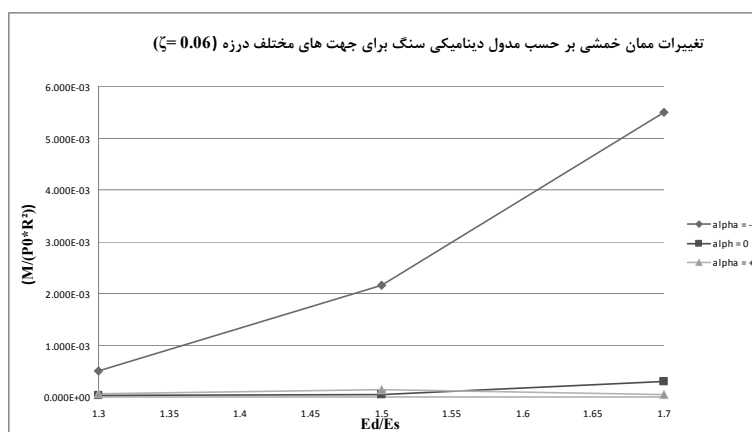
شکل ۷- تغییرات نیروی محوری بر حسب مدول دینامیکی سنگ (ضریب میرایی = ۰/۰۴)



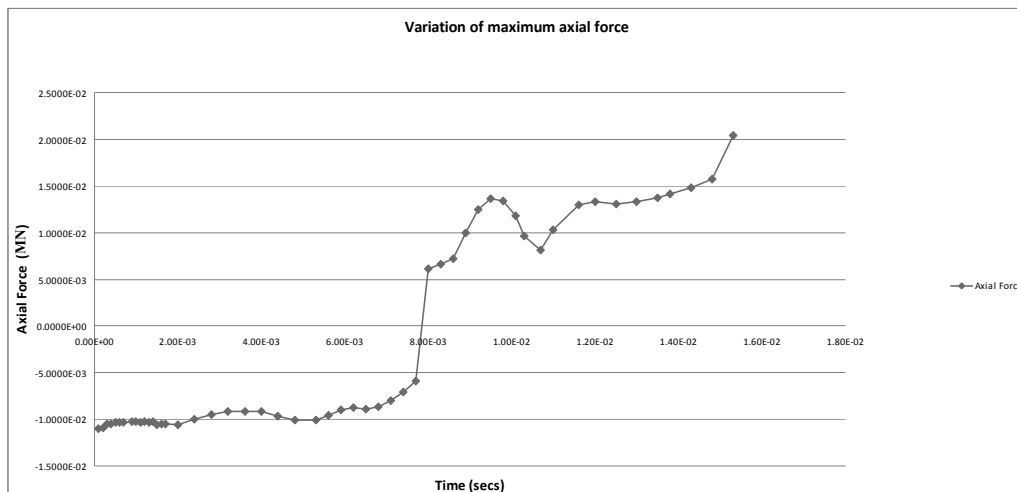
شکل ۸- تغییرات نیروی محوری بر حسب مدول دینامیکی سنگ (ضریب میرایی = ۰/۰۶)



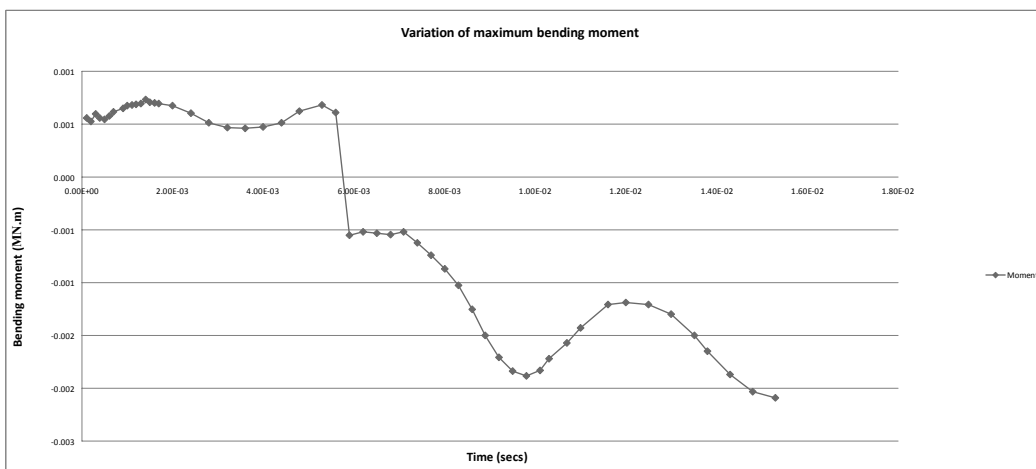
شکل ۹- تغییرات ممان خمشی بر حسب مدول دینامیکی سنگ (ضریب میرایی = ۰/۰۴)



شکل ۱۰- تغییرات ممان خمشی بر حسب مدول دینامیکی سنگ (ضریب میرایی = ۰/۰۶)



شکل ۱۱ - تغییرات نیروی محوری نسبت به زمان برای پارامترهای پایه



شکل ۱۲ - تغییرات لنگر خمشی نسبت به زمان برای پارامترهای پایه

امر محقق می‌شود که این تغییرات را می‌توان به درزه‌دار بودن محیط و نامنظمی تغییرات محیط درزه‌دار نسبت داد.

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر روند تحلیل پدیده انفجار پرتابه‌ها و مسائل مرتبط اعم از نفوذ، ایجاد گودال انفجار و انتشار امواج در یک توده سنگ درزه‌دار مورد مطالعه قرار گرفته و اثرات ناپیوستگی محیط در این مسأله نشان داده شده است. انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مدول دینامیکی سنگ، نسبت میرایی و جهت درزه‌ها نشان می‌دهد که کاهش نسبت

همان‌طور که در نمودارها ملاحظه می‌شود در بیشتر حالات با افزایش مدول دینامیکی سنگ، لنگر و نیروی محوری پوشش افزایش می‌یابد. اما در حالت میرایی ۰/۰۶ با افزایش زاویه درزه‌ها نیروی محوری و ممان خمشی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد که این رفتار نامنظم را می‌توان به وجود دسته درزه‌های موجود در سنگ نسبت داد. همچنین با افزایش ضریب میرایی، لنگر و نیروی محوری ایجاد شده در پوشش در عمده حالات کاهش می‌یابد. با توجه به نمودارها ملاحظه می‌شود که در حالت میرایی ۰/۰۴ با افزایش زاویه درزه‌ها بیشترین تغییرات نیروی محوری و لنگر خمشی رخ می‌دهد در حالی‌که در حالت میرایی ۰/۰۶ با کاهش زاویه درزه‌ها این

روش‌های مناسب محاسبه گردد. در این بین، اثرات دسته درزه از قانون مشخصی تبعیت نمی‌کند و در بعضی موارد موجب افزایش تلاش‌های برشی و در بعضی دیگر باعث کاهش آنها شده است.

میرایی مقادیر نیروی محوری و لنگر خمشی را حدود ۱۰۰٪ افزایش می‌دهد در حالی که تغییرات نسبت مدول دینامیکی از ۱/۳ به ۱/۷ این مقادیر را بین ۴ تا ۵ برابر افزایش داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدول دینامیکی سنگ در تحلیل دینامیکی بسیار اثرگذار بوده و بایستی با به کارگیری

منابع

- پولادی هروی، احمد، "تحلیل مکانیسم انفجار و اندرکنش گاز- سازه در محیط‌های ترک خورده جامد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۴
- درانی، محمد جواد، مطالعه تأثیر بارهای دینامیکی ناشی از انفجار بر پایداری تونل‌های سه‌گانه تالون-آزاد راه تهران شمال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲
- نجیمی ورزنده، محسن، "بررسی اثر انفجار در حملات هوایی روی سازه‌های نظامی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹
- وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۵، معاونت ساخت و توسعه راه‌آهن، فرودگاه و بندر، گزارش فنی شماره ۳۴۸-۰۲-۱۳، راه‌آهن پارس‌آباد - اردبیل - میانه، مطالعه مرحله دوم تونل‌ها

- Bangash M.Y.H., (2009) "Shock, impact and explosion- structural analysis and design", Springer.
- Bulson P.S., 1997 "Explosive loading of engineering structures", E & FN SPON.
- Chen S.G., Zhao J. (1998), "A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 35, No. 1, 93-99.
- Fan S.C., Jiao Y.Y., Zhao J. (2003), "On modeling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method", Computers and Geotechnics, Vol. 31, 57-66.
- Gui M. W., Chien M. C. (2006), Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 24: 227-248.
- Henrych J., 1979 The Dynamics of Explosion, New York: Elsevier scientific publishing company.
- Heuze F.E., Morris J.P. (2006), "Insights into ground shock in jointed rocks and the response of structures there-in", Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., Vol. 44, 647-676.
- ITASCA Consulting Group Inc. (2004), UDEC: Universal Distinct Element Code User's Manual, Version 4.0.
- Jiao Y.Y., Zhao J. Cai J.G. (2003), "Consideration for 2-D and 3-D modelling of shock wave propagation in jointed rock masses", ISRM-Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Jiao Y.Y., Zhang X.L., Zhao J., Q.S. Liu Q.S. (2007), "Viscous boundary of DDA for modeling stress wave propagation in jointed rock", Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., 44, 1070-1076.
- Lamond J. F., Pielert J. H., (2006), Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, ASTM Publications.
- Lu Y. (2005), "Underground blast induced ground shock and its modeling using artificial neural network", J. Computers and Geotechnics, Vol. 32, 164-178.
- Ma G.W., Hao H., Zhou Y.X. (1998), "Modeling of wave propagation induced by underground explosion", Comput Geotech, Vol. 22 (3/4), 283-303.
- Morris J.P., Rubin M.B., Blair S.C., Glenn L.A., Heuze F.E. (2004), "Simulations of underground structures subjected to dynamic loading using the distinct element method", Engineering Computations, Vol. 21, pp. 384-408.
- Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J. (2007) Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview, EJSE Special Issue: Loading on Structures.
- US Army Corps of Engineers, 1986, Department of the US Army Technical Manual TM 5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons".
- Wang Z., Li Y., Wang J.G. (2008), "Numerical analysis of blast-induced wave propagation and spalling damage in a rock plate", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 45, 600-608