فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال پنجم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳، (پیاپی ۱۹): صص ۷۵-۸۱

تخمین زون تخریب (پلاستیک) توده‌سنگ توف تحت اثر انفجار TNT

مصطفی امینی مزرعه‌نو[۱]، الیار کاوسیان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۱۲

چکیده

امروزه فضاهای زیرزمینی به‌عنوان فضاهای ایمن برای مقاصد مهندسی و نظامی شناخته شده‌اند. یکی از تهدیدات عمده مورد بررسی در بحث پدافندی، بحث انفجار در فضاهای زیرزمینی می‌باشد. در مقالهٔ حاضر به بررسی زون پلاستیک حاصل از انفجار TNT بر روی یک تونل زیرزمینی در توده‌سنگ توف پرداخته می‌شود. انفجار TNT با استفاده از نرم‌افزار عددی FLAC3D بررسی شد و نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج حاصل از روش PPV مقایسه شد و در اثر این مقایسه مشخص شد که زون خطر حاصل از بررسی، عددی بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده از روش PPV می‌باشد که می‌تواند منجر به دقت و ایمنی بیشتر در طراحی فضاهای ایمن زیرزمینی گردد.

کلیدواژه‌ها: انفجار، زون تخریب، مدل‌سازی، روش PPV

۱- مربی و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)
۲- کارشناس ارشد مکانیک سنگ Elyar.kavoosian@gmail.com – نویسنده مسئول

۱- مقدمه

تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی به‌عنوان فضاهای ایمن برای مقاصد نظامی و مهندسی شناخته شده‌اند. از لحاظ نظامی، بحث پدافندی این فضاهای زیرزمینی سبب کاربرد بیشتر این سازه‌ها گردیده‌اند و در مباحث مهندسی نیز ایمنی، نیاز کمتر به تجهیزات نگهداری در مقایسه با ساخت همان سازه در روی زمین داشته و ایمنی بیشتر در مقابل بارهای دینامیکی، روزبه‌روز بر کاربرد و اهمیت این نوع از سازه‌ها می‌افزاید [۱]. یکی از بارهای دینامیکی مهم، انفجار می‌باشد. انفجار، آزاد شدن بسیار سریع انرژی به‌صورت نور، گرما، صدا و موج ضربه، می‌باشد. موج ضربه هوای بسیار متراکمی می‌باشد که به‌صورت شعاعی از منبع انفجار به‌سمت خارج با سرعت مافوق صوت در حرکت است. با گسترش موج ضربه‌ای، مقدار فشار به‌سرعت کاهش می‌یابد و پس از برخورد به یک سطح، منعکس شده و مقدار آن افزایش می‌یابد. سپس با گذشت زمان، فشار به سرعت کاسته می‌شود (به‌صورت نمایی).

در بارگذاری انفجاری، زمان اعمال بار حاصل از انفجار بسیار کوتاه می‌باشد و معمولاً بر حسب هزارم ثانیه (میلی‌ثانیه) بیان می‌شود. در آخر پدیده انفجار، موج ضربه‌ای منفی ایجاد می‌شود که مکش ایجاد می‌کند. در انفجارهای خارجی، بخشی از انرژی به زمین وارد می‌شود که سبب ایجاد گودال و موج ضربه زمینی شده که از نظر شدت و مدت زمان، شبیه زلزله می‌باشد[۲].

بازدهی انفجار، بستگی به شناخت خواص مواد منفجره و پاسخ توده‌سنگ‌های دربرگیرنده دارد. بررسی پاسخ توده‌سنگ در برابر تنش‌های دینامیکی با دامنه بالا بسیار پیچیده بوده و نیازمند شناخت رفتار توده‌سنگ در برابر تنش‌های بالا می‌باشد. بنابراین جهت بررسی چنین پدیده‌هایی استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی ضروری می‌باشد. از زمان ابداع و گسترش روش‌های عددی و نرم‌افزارهای مربوطه، محققان زیادی سعی در بررسی و تحلیل عددی و دینامیکی انفجار نمودند. گرادی و کیپ[1] در سال ۱۹۸۰[۳]، چن و ژائو[2] در سال ۱۹۹۸[۴]، ونگ و چونگ[3] در سال ۲۰۰۵[۵] هم‌چنین ینگ، ژی و ونگ[4] در سال ۲۰۱۰ ما، ها او و ونگ در سال ۲۰۱۱[۶] به تحلیل عددی دینامیکی انفجارهای زیرسطحی پرداخته و سپس به مقایسه نتایج خود با روش‌های تخمینی تحلیلی مانند PPV[5] و ES[6] پرداخته و با جمع‌بندی این داده‌ها و نتایج موجود از انفجارات واقعی، به ارائه پیش بینی‌ها و روابط تجربی در مورد زون‌های تخریبی توده‌سنگ‌های مختلف نموده‌اند.

در این تحقیق به بررسی زون پلاستیک حاصل از انفجار TNT در توده‌سنگ توف پرداخته می‌شود. روش‌های مختلفی برای بررسی اثرات حاصل از انفجار وجود دارند. از جملهٔ این روش‌ها می‌توان به مدل‌سازی فیزیکی، روش‌های تجربی و تحلیلی و روش‌های عددی اشاره نمود. مدل‌سازی فیزیکی با توجه به هزینه‌بر بودن و دشواری شبیه سازی عملیات انفجار چندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. روش‌های تحلیلی و تجربی، روش‌های مقرون به‌صرفه‌ای هستند که با دسته‌بندی نتایج و داده‌های حاصل از انفجارهای صورت‌گرفته، به پیش بینی نتایج حاصل از انفجار می‌پردازند. این نوع از تحلیل‌ها خوب و سریع بوده و دارای نتایجی با تقریب قابل قبول می‌باشند ولی مشکل اصلی این روش‌ها این است که این تحلیل‌ها تنها در مواردی پاسخ‌گو هستند که انفجاری در مقیاس و توده‌سنگی مشابه قبلاً صورت گرفته باشد و در مورد محیط‌های جدید و مقیاس‌های جدید، پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های صورت‌گرفته دارای ارزش و اعتبار قابل قبولی از پیش نمی‌باشند. امروزه با پیشرفت روش‌های عددی و توسعهٔ روزافزون رایانه‌های خانگی، استفاده از روش‌های عددی در تحلیل مسائل عمدهٔ مهندسی فراگیر گشته است. در این مقاله با استفاده از معیار خسارت سرعت حداکثر ذره‌ای، بیشینه سرعت ذرات توده‌سنگ را به‌دست آورده و سپس با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ و مدل‌سازی انفجار مورد نظر، فاصله‌ای از منبع انفجار که در آن ذرات توده‌سنگ به سرعت‌های حاصل از معیار خسارت دست یافته‌اند، تعیین گردیده‌اند. پاسخ حاصل از مدل‌سازی نرم‌افزار به‌عنوان پاسخ عددی تحلیل در نظر گرفته شده‌اند که همخوانی مناسبی با نتایج حاصل از معیار خسارت داشته‌اند.

۲- روش‌های تحلیل

۲-۱- معیار خسارت ناشی از انفجار

معیارهای خسارت جهت کنترل حرکت زمین را می‌توان به سه دسته پارامترهای دامنه، پارامترهای محتوی فرکانس و پارامتر زمان تقسیم‌بندی نمود. پارامتر سرعت نسبت به شتاب، حساسیت کمتری به مؤلفه‌های فرکانس بالا از حرکت زمین دارد؛ بنابراین زمانی که فرکانس ارتعاشات بالا باشد، استفاده از حداکثر سرعت ذرات (PPV)[7] به‌عنوان معیار بررسی خسارت توصیه می‌شود[۷]. از حداکثر سرعت ذرات می‌توان میزان تخریب ناشی از انفجار را بر روی سازه‌های درگیر با محدوده انتشار موج تخمین زد. روش‌های مختلفی جهت تعیین میزان تخریب وجود دارند که از آن جمله می‌توان به روابط تئوری، جداول و روش‌های مدل‌سازی اشاره نمود. سرعت ذره‌ای آستانه خسارت در سنگ را می‌توان از رابطه (۱) تعیین کرد.

1- Grady and Kipp
2- Chen and Zhao
3- Wang and Chong
4- Yang, Xie, Wang
5- Peak particle velocity
6- effective strain
7- Peak Particle Velocity

$$PPV_{CR} = \frac{T_s V_p}{E} \quad (۱)$$

که در آن: PPV_{CR}، حداکثر سرعت ذره در **آستانه** خسارت بر حسب (m/s)

T_s، مقاومت کششی استاتیکی سنگ (Mpa)

و V_p سرعت انتشار موج P در سنگ (m/s) می‌باشد.

سرعت انتشار موج P در سنگ را می‌توان با داشتن Q از طبقه‌بندی بارتن به کمک رابطه (۲) محاسبه نمود[۸].

$$Vp = 3500 + 1000\log Q \quad (۲)$$

معیارهای متفاوتی برای استفاده از سرعت ذرات و تعیین سرعت ذره‌ای آستانه خسارت در سازه‌های زیرزمینی ارائه شده است. لانگفورس[1] در سال ۱۹۷۳ معیاری را برای تونل‌های بدون حائل‌بندی، هندرون[2] در سال ۱۹۷۷ معیاری ناشی از نتایج به‌دست‌آمده از تست‌های انفجارهای بزرگ در ارتش آمریکا از سال ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۲ در تونل‌ها و همچنین کالدر[3] در سال ۱۹۹۷ معیار دیگری را برای خسارت در تونل‌ها ارائه دادند که در جدول (۱) مشاهده می‌شود.

جدول ۱– نوع خسارت ناشی از انفجار در فضاهای زیرزمینی براساس حداکثر سرعت ذره‌ای[۹]

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

1- Langfors
2- Hendron
3- Calder

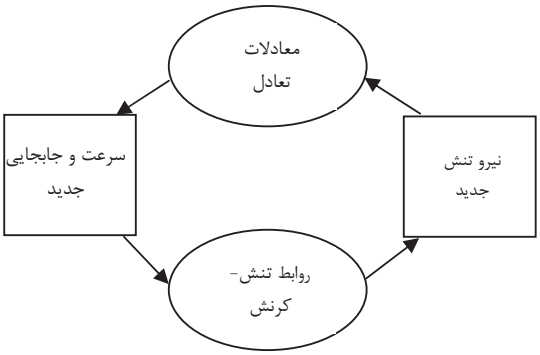
۲-۲- روش‌های عددی

با پیشرفت کامپیوتر و گسترش نرم‌افزارهای عددی، استفاده از روش‌های عددی برای بارهای دینامیکی نیز پیشرفت‌های زیادی داشته است. اصل روش‌های تحلیلی عددی، تقسیم سازه به قطعات کوچکی به نام المان می‌باشد که رفتار مواد در هر المان، ثابت و مشخص در نظر گرفته می‌شود. ارتباط المان‌ها از طریق گره‌های محصور کننده آن‌ها برقرار می‌شود و المان‌ها به‌وسیله این گره‌های محصور کننده تعریف می‌شود. در روش‌های عددی، تنش و جابجایی در یک توده جسم، از بارهای خارجی و شرایط مرزی تحمیل‌شده متأثر می‌شوند.

۲-۲-۱- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود از قدیمی‌ترین روش‌های حل معادلات دیفرانسیل با مقادیر اولیه و مقادیر مرزی است. در روش تفاضل محدود، هر مشتق در معادلات حاکم، مستقیماً در عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان تنش یا تغییر مکان در فضاست، جایگزین می‌شود. اساس محاسبات نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ بر پایهٔ این روش می‌باشد.

ترتیب انجام محاسبات در برنامه $FLAC^{3D}$ به‌صورت نمودار زیر است:



شکل ۱– نمودار ترتیب انجام محاسبات در $FLAC^{3D}$ [۱۰]

در این فرآیند ابتدا از معادلات حرکت استفاده می‌شود و پس از آن، سرعت‌ها و تغییر مکان‌های جدید از تنش‌ها و نیروهای گره‌ای به دست می‌آیند، سپس نرخ کرنش از سرعت‌های گره‌ای جدید در هر جزء به‌دست می‌آید.

برای انجام تحلیل‌های استاتیکی، در ابتدا باید مدل هندسی مسئله را ایجاد کرد. بعد از آن نوبت به تعیین مشخصات مصالح و شرایط مرزی و اولیه می‌رسد.

۳- مدل‌سازی دینامیکی در سازه‌های سنگی و خاکی

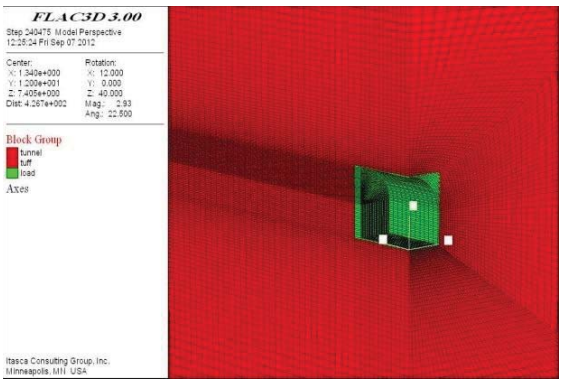
۳-۱- تفاوت‌های مسائل استاتیکی و دینامیکی

در مسائل دینامیکی برخلاف مسائل استاتیکی، بارگذاری و در نتیجه، پاسخ سیستم شامل تنش‌ها و تغییرمکان‌ها، در طول زمان تغییرمی‌کند به‌طوری که در تحلیل نمی‌توان به یک پاسخ ثابت دست یافت و لازم است پاسخ سیستم در زمان‌های مختلف محاسبه شود. از طرفی از آنجا که در مسائل دینامیکی تغییر مکان‌ها وابسته به زمان می‌باشد، این تغییر مکان‌ها منجر به بروز شتاب در سیستم شده و این شتاب باعث ایجاد نیروهای اینرسی می‌شود که در برابر حرکت مقاومت می‌کند. مقدار این نیروها، به شدت بارگذاری و جرم سیستم بستگی دارد. علاوه‌بر اثر اینرسی، عامل دیگری که در مسئله دینامیکی مؤثر است، میرائی یا استهلاک بخشی از انرژی حرکتی سیستم می‌باشد. میرائی ناشی از عوامل مختلفی نظیر اصطکاک در اتصالات و اجزای سازه و نیز تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر شامل پلاستیسیته و لزجت می‌باشد که باعث اتلاف انرژی حرکتی در سازه می‌گردد.

۳-۲- هندسه مدل

هندسه مورد نظر برای مدل‌سازی در این مسئله تونلی نعل‌اسبی‌شکل با قاعده با طول ۱۰ متر، ارتفاع ۶ متر و شعاع قوس ۷ متر می‌باشد که در محیط سنگی شامل سنگ‌های توف و بازالت واقع شده است و میزان ارتفاع روباره از سقف تونل حدوداً ۵۰ متر می‌باشد.

ابعاد مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار FLAC3D، ۱۰۰×۷۰×۷۰ می‌باشد که در شکل (۲) آن را مشاهده می‌کنید. مدل رفتاری درنظر گرفته‌شده، مدل الاستوپلاستیک موهر-کلمب می‌باشد و مشخصات مصالح هم با توجه به برداشت‌های زمین‌شناسی و به‌وسیله نرم‌افزار Roclab به‌دست آمده است. همان‌طور که در شکل (۲) می‌بینید سازه زیرزمینی مورد نظر با رنگ متفاوتی از سنگ دربرگیرنده سازه جدا شده است.



شکل ۲- هندسه ساخته‌شده مدل توسط نرم‌افزار FLAC3D

مرزهای جانبی هم در فاصله‌ای تقریباً ۱۵ برابر شعاع در نظر گرفته شده است تا تأثیر شرایط مرزی بر محاسبات کمتر شود. در ادامه، مدل به تعادل استاتیکی می‌رسد و سپس تحلیل دینامیکی آغاز می‌شود.

۳-۳- مشخصات مکانیکی و مدل درنظر گرفته‌شده برای محیط

با توجه به اطلاعات دردست و به‌دست‌آمده از برداشت‌های زمین‌شناسی و امکانات موجود، از مدل الاستوپلاستیک موهر کولمب برای مدل کردن این محیط استفاده شد. از دلایل استفاده از این مدل می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد.

۱- دسترسی آسان به پارامترهای این مدل
۲- فراگیر بودن و قابل فهم‌تر بودن مدل
۳- مطابقت با دیگر مدل‌های دیگر مانند هوک و براون
۴- عدم دسترسی به آزمایش‌های مکانیک سنگ از جمله مقاومت فشاری سه‌محوری سنگ

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی سنگ‌های دربرگیرنده در تونل

پارامتر	توف
مقاومت فشاری تک محوری (UCS) (مگا پاسکال)	۹۱
RQD	۴۰-۵۰
فاصله داری ناپیوستگی‌ها (متر)	۲۰
دانسیته (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۳
RMR	۴۵
Q	۰/۰۷۴-۰/۲
GSI	۴۰

در جدول (۳)، خروجی‌های مورد نظر حاصل از نرم‌افزار Roclab که برای انجام تحلیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشاهده می‌شود.

جدول ۳- خروجی‌های مورد نیاز از نرم‌افزار Roclab

پارامتر	توف
چسبندگی (مگاپاسکال)	۰/۲۵۱
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۵۱/۸۴
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۰/۰۲۶
مقاومت فشاری تک محوری توده‌سنگ (مگاپاسکال)	۱/۰۴۰
مقاومت فشاری همه جانبه توده‌سنگ (مگاپاسکال)	۸/۶۳
مدول تغییر شکل توده‌سنگ (گیگا پاسکال)	۳/۰۱۷

حال با داشتن پارامترهای مورد نیاز برای مدل موهر- کولمب اقدام به مدل‌سازی این سازه در سنگ دربرگیرنده که توف می‌باشد می‌پردازیم.

۳-۴- آنالیز دینامیکی

محاسبات دینامیکی براساس طرح تفاضل محدود صریح برای حل معادلات کامل حرکت، با استفاده از جرم‌های متمرکزشده در نقاط گره‌ای از چگالی واقعی ناحیه‌های دربرگیرنده (نسبت به جرم ساختگی که برای مسائل استاتیکی استفاده می‌شوند) می‌باشد.

در یک تحلیل دینامیکی نکات زیر را باید مورد توجه قرار داد:

۱- بارگذاری دینامیکی و نحوه اعمال شرایط مرزی

۲- میرایی مکانیکی

۳- چگونگی انتقال موج در مدل[۱۰]

۳-۵- بارگذاری دینامیکی و نحوه اعمال شرایط مرزی

۱) بار دینامیک به‌صورت یک تاریخچه بارگذاری اعمال می‌شود. بدین معنا که بار اعمالی به‌عنوان تابع زمانی $F(t)$ مشخص شده و این تابع در یک بازه مشخص از زمان اعمال می‌گردد.

۲) شرایط دینامیکی را می‌توان در جهت x, y, z یا در جهت عمود و مماس بر مرز اعمال کرد. در این تحلیل در نظر گرفته می‌شود که بار در زمان ۳ ثانیه به مدل اعمال شده و بیشترین مقدار آن حدود $۱/۸ \times ۱۰^{۸}$ پاسکال می‌باشد

۳-۶- میرایی مکانیکی

ممکن است میرایی، حاصل اتلاف انرژی بر اثر اصطکاک داخلی در سطح تماس مصالح و لغزش بین فصل مشترک‌ها باشد. برای تحلیل‌های دینامیک در شبیه‌سازی‌های عددی، میرایی باید مقدار و شکل تلفات انرژی در سیستم طبیعی را به هنگام بارگذاری دینامیک، مشخص و بازسازی کند. برای مصالح زمین‌شناسی، عموماً میرایی در محدوده ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی قرار می‌گیرد. برای تحلیل‌های دینامیک شامل کرنش‌های بزرگ فقط درصد کوچکی از میرایی (مثلاً ۰/۵ درصد) ممکن است کافی باشد. برای چرخه‌های تنش-کرنش که شامل جریان پلاستیک باشند، پراکندگی با دامنه افزایش می‌یابد [۱۰].

میرای درنظر گرفته‌شده برای این مورد، میرایی محلی و با درنظر گرفتن میرایی ۵ درصد بوده است.

۴- تحلیل‌ها

در این تحلیل دینامیکی، هدف اصلی یافتن میزان بعد تخریب ناشی از انفجار داخلی در اطراف سازه زیرزمینی در فضای سه‌بعدی می‌باشد. با دستیابی به این فاصله، می‌توان میزان فاصله ایمن بین یک سازه زیرزمینی با سازه‌های دیگر در اطراف آن را تعیین نمود.

برای به‌دست آوردن این مسافت از دو روش استفاده شده است.

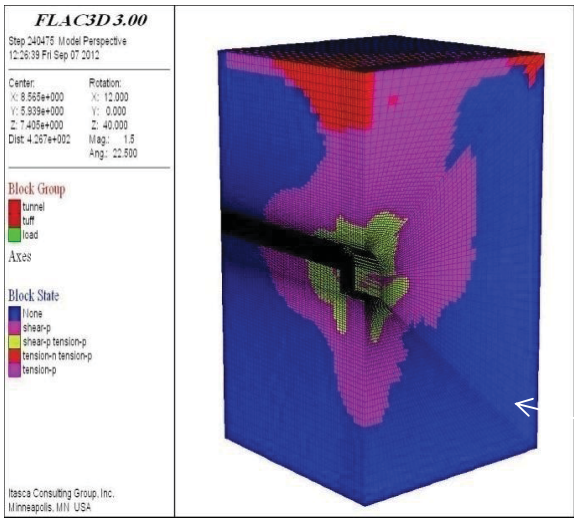
۱- مدل‌سازی عددی انفجار و به‌دست آوردن این مسافت توسط معیار شکست موهر – کولمب توسط نرم‌افزار FLAC3D

۲- به‌دست آوردن این مسافت توسط معیارهای تجربی PPV ارائه‌شده

۴-۱- مدل‌سازی عددی انفجار و به‌دست آوردن مسافت تخریب

در روش اول با توجه به مدل‌سازی و شبیه‌سازی هندسه مدل و اجرای تحلیل دینامیکی آن، پس از انجام انفجار و گذشت مدت زمان لازم برای خروج موج ناشی از انفجار از مدل ساخته‌شده با ترسیم خروجی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$، شرایط پلاستیسیته مدل را نمایش می‌دهد که المان‌های مدل کدام یک جابجایی‌های الاستیک و کدام یک جابجایی‌های غیر خطی و پلاستیک داشته‌اند.

در این روش با توجه به خروجی‌های نرم‌افزار، زون‌هایی که در آن‌ها جابجایی‌های پلاستیک برگشت ناپذیر رخ داده است، نشان می‌دهد که در اینجا می‌توان با به‌دست آوردن این مسافت تا دیواره سازه زیرزمینی، مسافت تخریب و یا فاصله ایمن را به‌دست آورد. همان‌طور که در شکل (۳) می‌بینید نواحی پلاستیک‌شده در اطراف سازه مشخص می‌باشد که با به‌دست آوردن این فواصل، فاصله تخریب سنگ‌های دربرگیرنده سازه در اثر انفجار داخلی تقریب زده می‌شود و نتایج آن در جدول (۴) مشاهده می‌شود.



شکل ۳- نمایش نواحی پلاستیک‌شده بر اساس معیار موهر- کولمب در نرم‌افزار Flac3D

جدول ۴- مسافت‌های تخریب در راستاهای مختلف بر اساس معیار غیرخطی موهر کولمب (برحسب متر)

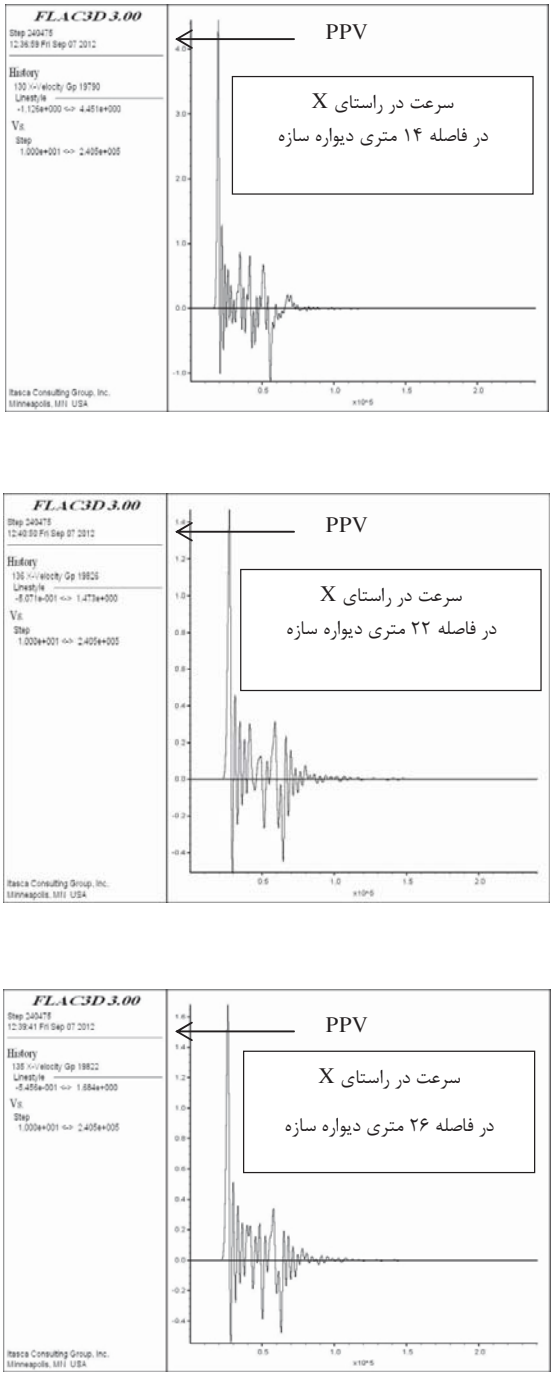
	راستا		
	X	Y	Z
مسافت تخریب (فاصله ایمن)	۳۴	۳۶	-۲۵

۴-۲- مسافت تخریب بر اساس معیارهای تجربی PPV

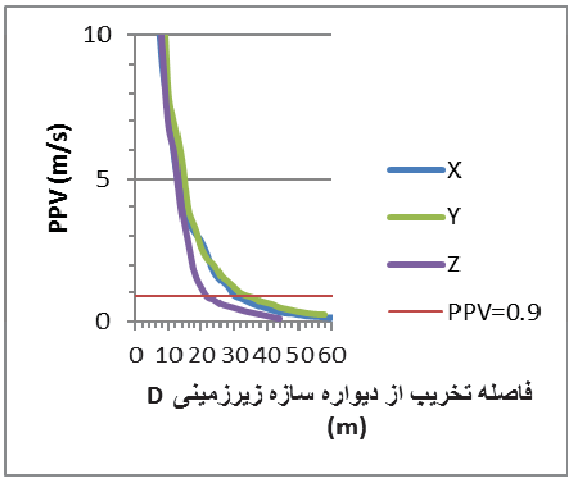
در روش دوم با توجه به مدل‌سازی عددی انجام‌شده توسط نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ و هیستوگرام‌ها و تاریخچه‌هایی که از سرعت ذرات در فواصل مختلف و گره‌های مختلف گرفته شده است، می‌توان با استفاده از معیار PPV (حداکثر سرعت ذرات) فاصله‌ای را که ذره در آن شروع به شکسته شدن و پلاستیک شدن می‌کند به‌دست آورد. معیارهای متفاوتی برای استفاده از سرعت ذرات و تعیین سرعت ذره‌ای آستانه خسارت در حفره‌های زیرزمینی ارائه شده است که در این مقاله از معیار هندرون در سال ۱۹۷۷ با توجه به اعتبار بیشتر این روش استفاده می‌شود.

برای این کار، در نقاط گره‌ای راستاهای مختلف در سنگ‌های اطراف سازه زیرزمینی، تاریخچه و هیستوگرام تعریف می‌کنیم تا شاهد و ثبت کننده رفتار زون‌ها و گره‌ها در مدل باشد. پس از اتمام اعمال بار و اجرای مدل با بررسی این تاریخچه‌ها در راستاهای مختلف می‌توان بیشترین سرعت نقاط را که تا اتمام اجرا ثبت شده است را به‌دست آورد و با حدود معیار هندرون در پارامتر PPV مقایسه کرد و نقطه‌ای را که در آن، شکستگی‌ها و پلاستیک شدن به اتمام می‌رسد به‌دست آورد. در این معیار، زمانی که بیشترین سرعت ذرات از ۰/۹ متر بر ثانیه بیشتر باشد شکستگی‌ها و پلاستیک شدن شروع می‌شود. به‌عنوان مثال، در راستاهای X و Y و Z عمود بر محور تونل، هیستوگرام‌هایی با فواصل یک متر به یک متر درنظر گرفته شد تا سرعت ذرات را ثبت کنیم. به‌عنوان مثال در شکل (۴)، میزان سرعت ذرات در راستای X در فواصل مختلف نشان داده شده است که می‌توان مشاهده کرد با فاصله گرفتن از دیواره تونل، بیشینه سرعت ذرات کاهش یافته و زمانی که به میزان ۰/۹ متر بر ثانیه برسد، براساس رابطه PPV، هندرون آن فاصله محاسبه‌شده، فاصله تخریب می‌باشد که برای راستای X، ۳۰ متر می‌باشد.

درشکل (۵) نمودارهای بیشترین سرعت ذرات بر اساس فاصله از دیواره سازه زیرزمینی در راستاهای مختلف رسم شده است که از تقاطع این نمودارها با میزان ۰/۹ متر بر ثانیه مسافت تخریب به‌دست می‌آید.



شکل ۴ – هیستوگرام‌های سرعت ذرات در راستای X در فواصل مختلف از دیواره سازه زیرزمینی برای بدست آوردن بیشترین سرعت ذرات برای معیار PPV



شکل ۵– نمودار PPV بر حسب فاصله از دیوار سازه زیرزمینی

در جدول (۵) این فاصله به‌دست‌آمده از معیار PPV در راستاهای مختلف نشان داده شده است.

جدول ۵– مسافت‌های تخریب حاصل از روش‌های مختلف در راستاهای مختلف (بر حسب متر)

	راستا		
	X	Y	Z
مسافت تخریب (FLAC3D)	۳۴	۳۶	-۲۵ تا سطح زمین
	راستا		
	X	Y	Z
مسافت تخریب معیار PPV	۳۰	۳۴	-۲۲ تا سطح زمین

۵-تجزیه‌وتحلیل نتایج:

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از دو روش موجود، برای تخمین میزان بعد تخریب از دیواره تونل با استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی و روابط تجربی می‌توان به نتایج زیر رسید:

۱- نتایج به‌دست‌آمده از دو روش با میزان کمی اختلاف، تقریباً بر هم منطبق بوده و یکدیگر را تأیید می‌کنند.

۲- با توجه به اینکه مدل‌سازی عددی انجام‌شده بسیار دقیق‌تر بوده و در سه بعد انجام شده است، انتظار می‌رود نتایج به‌دست‌آمده از آن نسبت به نتایج روش تجربی PPV معتبرتر باشد.

۳- باید توجه داشت که در مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLAC3D زون تخریب باعبارت زون تخریب که به‌دست می‌آید زون‌هایی هستند که در زمانی در آن‌ها تغییر شکل‌های پلاستیک برگشت‌ناپذیر رخ داده است اما باید در نظر داشت که هر پلاستیک شدنی ملزم به شکست سنگ نمی‌باشد و احتمال دارد هنوز به فاز شکست وارد نشده باشد.

مراجع

1. Goodman, R. E; Rock Mechanics; John Wiley & Sons, New York, pp. 5, (**1988**).
2. Hoek, E. and Brown, E. T; Underground excavations in rock; The Institution ofMining and Metallurgy, London. 527 pp, (**1980**).
3. Grady, D. E. and Kipp, M. E; Continuum modeling of explosive fracture in oil shale;Int J Rock Mech Min Sci ,vol 17, pp. 147-57, (**1980**).
4. Chen, S. G and Zhao, J; A study of UEDC modeling for blasting wave propagation in joint rock mass; Int J Rock Mech Min Sci, vol 35, pp. 90–98, (**1998**).
5. Yong Lu, Zhongqi Wang, Karen Chong; A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulation; 25th Soil Dynamics and Earthquake Engineering,School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore,(**2005**).
6. Yubing Yang, XiongyaoXie, Rulu Wang; Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel; Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2(4), pp. 373–384 (**2010**).
7. G.W. Ma, H. Hao, F. Wang, Hustrulid, W.;Blasting Principles for Open Pit Mining;, A. A. Balkema, vol 2, (**2010**).
8. Forsyth, w; A discussion of blast induct overbreak around underground excavations; Fragblast, vol 4, (**1993**).
9. Scoble, M. j; Measurment of blast damage.Mining Engineering; vol 49(6),pp. 63-70, (**1997**).
10. ITASCA Consulting Group, FLAC3D User's Manual, Version 3.00, pp. 227-248, (**2003**).

Hazard (Plastic) Zone Estimation of Tuff Rock Mass Produced by TNT Explosion

M. Amini Mazrae No[1]

E. Kavoosian[2]

Abstract

Today, underground spaces are known as safe places for engineering and military applications. One of the hazards threatening these spaces is implosion. In this paper plastic zone produced by is implosion in Tuff Rock Mass has been investigated. This implosion is modeled by FLAC3D and the results have been compared with those of the PPV method. The results produced by numerical analyses show greater space boundary as plastic zone than space determined by PPV method. Therefore; it shows that numerical analysis gives more careful and safer structures.

Key Words: *Implosion, Hazard Zone, Modeling of Explosion, PPV Method*

1- Instructor and Academic member of Imam Hussein Comprehensive University
2- MS in Stone Mechanics (Elyar.kavoosian@gmail.com) - Writer in Charge