اثر بارگذاری انفجار روی پایداری رمپ قره چنگول در معدن سرب و روی زهآباد

فاطمه ابطحی، مهدی حسینی^{*}؛ دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) اکبر شاه حسینی؛ معدن سرب و روی زهآباد تاریخ: دریافت ۹۲/۱۰/۲۶ پذیرش ۹۷/۰۶/۲۹ حکیده

انفجار و لرزش های حاصل از آن در مقایسه با ساختارهای زمین شناسی و آب زیرزمینی، بهدلیا , قابلیت کنترل بهتر آن، تأثیر کمتری در ناپایداری حفریات زیرزمینی دارند. عدم اجرای اصولی فرآیند انفجار، ممکن است منجر به آسیبهای جدی شود. در این تحقیق مدلسازی روی رمپ قره چنگول معدن سرب و روی زهآباد در برابر بارهای انفجاری انجام شده است. این معدن در جنوب روستای زمآباد واقع در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان قـزوین در بخـش طارم سفلی واقع است. بهمنظور بهدست آوردن خواص فیزیکی و مکانیکی سـنگهـای در برگیرنده رمپ و پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگیها، آزمایش هایی شامل آزمایش های تکمحوری، سهمحوری، برزیلی، برش مستقیم، تعیین وزن مخصوص و سرعت امواج طولی انجام شد. همچنین برای شبیهسازی شرایط پیچیده حاکم بر فرایند انفجار، با توجه ناپیوسته بودن محیط، برای مدلسازی عددی از نرم افزار المان مجزای UDEC استفاده شد. در انجام یک تحلیل دینامیکی ابتدا باید مدل در حالت استاتیکی به تعادل برسد. بعد از تعریف شرایط مرزی جاذب، بارهای دینامیکی بر اساس مدت زمان تعریف شده به مـدل وارد مـیشـود. در بحث پایداری معادن و فرآیند انفجار، بار دینامیکی حاصل از آن اغلب بهصورت یک پالس به مدل اعمال می شود. با وارد کردن بار دینامیکی و در نظر گرفتن سایر تغییرات یاد شده نسبت به تحلیل استاتیکی، می توان پاسخ دینامیکی فضای زیرزمینی را تحت بار لرزشی انفجار و یا زلزله پیش بینی کرد. برای این منظور موج ضربه ناشی از انفجار بهصورت پالس نمایی با فشار بیشینه ٤/٤١ مگاپاسکال و پهنای زمانی ٧/٠ تا ٧ میلی ثانیه به مرز سـمت چـپ

^{*}نویسنده مسئول mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

نشریهٔ زمینشناسی مهندسی، جلد سیزدهم، شمارهٔ ۳ پاییز ۱۳۹۸

مدل اعمال شد. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می دهد که در حالت استاتیکی فضای زیرزمینی مورد نظر پایدار است و بلوکی ریزش نمی کند. بعد از اعمال بار حاصل از انفجار نتایج نشان می دهد، رمپ پایدار می ماند و نیازی به نصب سیستم نگهداری نیست و در اطراف رمپ موردنظر ریزشی صورت نمی گیرد.

واژههای کلیدی: معدن سرب و روی زه آباد، رمـب قـره چنگـول، بارگـذاری انفجـار، پایـداری، تحلیـل دینامیکی، مدلسازی عددی.

مقدمه

فرآیند انفجار بسیار پیچیده است و عمدتاً تمام طراحیهای انفجاری بـر اسـاس روابـط تجربي مبتني بر سعى و خطا انجام مي شوند. امروزه بـا افـزايش سـرعت و تـوان محاسـباتي کامپیوترها امکان شبیهسازی این فرآیند وجود داشته و می توان از این فرصت بـرای شـناخت بهتر مکانیزم انفجار و طراحی های دقیقتر استفاده کرد. در این راستا نرم افزارهای محاسبانی زیادی برای شبیهسازی فرایند انفجار توسعه داده شده و استفاده شدهاند. با توجـه بـه توسـعهٔ قابل توجه روش های عددی در دهه های اخیر، امکان بررسی اثرات انفجار بر سازه های سطحي و زيرزميني با دقت زياد فراهم شده است. از جمله اين روش هـ ا مـي تـوان بـه روش اجزا مرزی، روش تفاضل محدود و روش اجزا محدود اشاره کرد. شایان ذکر است که در حال حاضر هیچ نرمافزاری قادر به شبیهسازی کامل فرایند انفجار نیست اما نرمافزارهای موجود با سادهسازی و تمرکز بر ابعاد مختلف فرایند قادر به شبیهسازی ابعاد مختلف این پديده هستند. از اينرو، انتخاب و استفاده از نتايج اين نرمافزارها با توجه به شرايط حاكم بـر یروژه و مبتنی بر قضاوت مهندسی و تجربه انجام می شود. بررسی پاسخ تودهٔ سـنگ در برابـر تنش های دینامیکی با دامنهٔ بالا بسیار پیچیده است و نیازمنـد شـناخت رفتـار تـودهٔ سـنگ در برابر تنشهای بالا است. بنابراین برای بررسی چنین پدیده هایی استفاده از روش های آزمایشگاهی و عددی ضروری است. گویی و چی ان در سال ۲۰۰۳، با استفاده از نـرمافـزار FLAC^{2D} اثر انفجار را روی تونلی که در زیر فرودگاهی در تایوان ساخته شده بود مدلسازی کردند و تأثیر ویژگی های خاک از جمله سختی دینامیکی خـاک، مقاومـت برشـی زهکشی نشده، نسبت میرایی خاک و شدت بار انفجاری و ابعاد گودال ایجاد شده را در پاسخ سازه بررسی کردهاند [۱]. فَن و همکاران در سال ۲۰۰۶ تأثیر شرایط مرزی را بـا توجـه بـه ورودی تاریخچه تنش و ورودی تاریخچه سرعت بر انتشار موج تـنش در تـودهٔ سـنگ درزه دار، بهوسيلهٔ نرمافزار UDEC شبيهسازي كردند. نتايج تحقيقات آنها نشان داد، تاريخچه ورودی به صورت حداکثر سرعت ذرهای تطابق بیش تری با نتایج آزمایش های برجا دارد [۲]. موریس و همکاران (۲۰۰٤) یاسخ دینامیکی مجموعههای بزرگ مقیاس چنـد تونـل در برابـر بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار زیرزمینی را با استفاده از کد محاسباتی سـهبعـدی اجـزاء مجزا شبیهسازی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که هندسهٔ درزهها نقش بسیار مهمی را در ارزیابی پایداری سازههای زیرزمینی تحت بارگذاری ناشی از انفجار ایفا میکنند [۳]. لو و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از روش تفاضل محدود به مقایسهٔ اثر انفجار بر سازههای زیرزمینی در تحلیل های دینامیکی دوبعدی و سه بعدی بهوسیلهٔ نرمافزار AUTODYN یرداختند [٤]. هیوز و موریس در سال ۲۰۰۶ به منظور مدل سازی اثرات انفجار در محیط سنگی درزه دار، یک سری آزمایش های آزمایشگاهی و برجا انجام دادند و نتایج را با استفاده از روش عددی اجزاء مجزا مدلسازی کردند. از مقایسهٔ نتایج مدلسازی اجزاء مجزا با نتایج واقعي، سطح قابل قبولي از تطابق را بين آنها مشاهده كردند [٥]. جيائو و همكاران (٢٠٠٧) بهمنظور بررسی اثرات گسترش موج انفجاری در محیط سنگی درزهدار، مرزهای ویسکوز را با کد محاسباتی Shi's DDA اعمال کردند [۲]. همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۸) گسترش موج و پوسته پوسته شدن ناشی از پدیدهٔ انفجار را با استفاده از روش های عددی بررسی كردند [٧]. سلمي و مرتضوى نيز در سال ٢٠٠٩ اثر تأخير بين چالهـا را بـهصـورت كيفـي روی شکست سنگ با استفاده از نرمافزار پیشرفته FLAC^{3D} شبیهسازی کردند [۸]. هـمچنـین یانگ و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی انفجارهای سطحی بر سازههای کم عمق مانند تونل های مترو با استفاده از روش المان محدود و نـرمافـزار ANSYS پرداختنـد [۹]. نگـو و همكـاران (۲۰۱۰) اثر انفجار سطحی بر سازه های مدفون را با استفاده از مدلسازی عددی غیرخطی بررسی کردند [۱۰]. اولاریواژو و همکاران (۲۰۱۰) نیز به بررسی لوله های مدفون در برابر انفجار سطحي، بهروش المان محدود يرداختند [١١]. كامر و همكاران سازهٔ مدفون را در برابر انفجار با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازهٔ بررسی کردند؛ بهطوریکه یک سازهٔ

نيمه مدفون را يک بار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و يک بار بدون در نظر گرفتن اين اثر، تحت بار انفجار تحليل كرده و به مقايسه نتايج حاصل از تحليل پرداختند [١٢]. شين و همکاران (۲۰۱۱) [۱۳]، ژیانگ و چوانبو (۲۰۱۲) [۱٤] و ژیا و همکاران (۲۰۱۳) [۱۵] با استفاده از نرمافزارهای عددی، اثر بارگذاری انفجار را روی تونل ها بررسی کردند. آنیربان (۲۰۱۲)، با استفادہ از نرمافزار ANSYS AUTODYN 13 اثر یک انفجار سطحی را روی تونل های زیرزمینی در قالب یک مدل سهبعدی المان محدود شبیهسازی کرد [۱۲]. بونسانتی و لئوناردی (۲۰۱۳) به کمک اجزای محدود سه بعدی به الگوسازی سازهٔ تونل تحت اثر بار انفجار پرداختند و تحلیلهای تغییرشکل و حرارتی آن را بهکار گرفتنـد [۱۷]. شـاو و وانـگ (۲۰۱۳) اثر انفجار سطحی را بر لرزش ایجاد شده بر تونل های موجود بررسی کردنـد [۱۸]. چاکرابورتی و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد جذب شوک مواد مختلفی مانند فوم و فـولاد را بـر لاينينگ بتنی تونل تحت بارگذاری انفجار با هم مقايسه كردند. همچنين بار انفجار از طريق شبیهسازی فرمول های اویلر و لاگرانیژ بهطور کامل برای اندرکنش سیال-سازه تحت بارگذاری انفجاری در تحلیل ها ارزیابی شد و تونل های زیرزمینی بـهصـورت سـهبعـدی در خاک تحت تأثیر بارهای انفجاری با استفاده از نرمافزار ABAQUS Version 6.11 مدلسازی شد [۱۹]. همچنین قلندری و همکاران (۲۰۱٤)، با استفاده از نرمافزار اجزاء مجزای UDEC، پاسخ دینامیکی تونل های دایرهای را در عمق های مختلف تحت بارهای ناشی از انفجار تحلیل و ارزیابی کردند [۲۰]. هایتانو و همکاران (۲۰۱٦)، با استفاده از شبیهسازیهای عددی، تأثیر بارهای انفجاری داخلی را روی تونلهای مدفون در خاک بـرای سازهها و زیرسازههای مهندسی بررسی کردند [۲۱]. ایـن مقالـه بـه مـدلسـازی رمـپ قـره چنگول معدن سرب و روی زهآباد در برابر بارهای انفجاری می پردازد. این معدن در جنوب روستای زهآباد واقع در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان قـزوین در بخـش طـارم سـفلی واقـع است.

زمين شناسي ناحية معدني زهآباد

کانسار زهآباد در جنوب روستای زهآباد واقع در ٥٦ کیلومتری شـمال غربـی شهرسـتان قزوین با طول جغرافیایی ٤٩ درجه و ٢٥ دقیقه و عرض ٣٦ درجه و ٢٨ دقیقه در بخش طارم سفلی و در فاصلهٔ حدود ۲ کیلومتری از روستای زهآباد واقع است. در شکل ۱ موقعیت معدن زهآباد و راههای دسترسی به آن نشان داده شده است [۲۲]. مرز شمالی این پهنه، گسل البرز جنوبی و مرز شرقی آن امتداد شمال شرقی- جنوبیغربی خشکی کالدونی ایـران اسـت. مـرز جنوبی آن گسل سمنان و مرز غربی آن گسل های تبریز و ارومیه است. سازند در برگیرنـده کانسار به طورکلی از سنگهای آذرآواری، گدازی و سنگهای رسوبی ائوسن (سازند کرج) تشکیل شده است که به ۲۲ واحد چینه شناسی تقسیم بندی و بررسی شده است. ترکیب سنگشناسی واحدهای توفی بهطور عمده ریولیتی تا داسیتی است و واحدهای گدازهای بهصورت ریولیت، داسیت و آندزیت دیده می شوند. امتداد گسل یا گسل های اصلی و فرعبی که در منطقه وجود دارد شرقی– جنوب غربی است و راستالغز هستند و هیچگونـه نقشـی در کانی سازی معادن سرب و روی منطقه نداشته است. بر اساس گزاش زمین شناسی شرکت تهران یادیر حداکثر عیار سرب ۱٤/۷ درصد و حداکثر عیار روی ۱۵/۵ درصـد اسـت و عیـار میانگین آن ۵ درصد سرب و ٦ درصد روی است. عیار میانگین طلا ۱/٦ گرم در تن، نقره ۱٤ گرم در تن، کادمیوم ۱۱۰ گرم در تن و عیار میانگین مس ۷۰۰۰ گـرم در تـن اسـت. ذخیـره ممكن مجموعه معادن زهآباد ١٠١١٥٢ تن بر آورد شده است [٢٣]. هم چنين بهمنظور شـناخت کانی های تشکیل دهندهٔ و تشخیص نوع سنگ، ترکیب کانی شناسی و خصوصیات بافتی نمونه، مقاطع نازک در زیر میکروسکوپ بررسی شد. بررسی مقاطع نازک نشان داد که ایـن سـنگ توف آندزیتی است و دارای بافت پورفیری، دانـ، ریـز و تقریبـاً روشـن اسـت وکـانی اصـلی سازنده آن کوارتز، و کانی های فرعی آن آمفیبول- پلاژیوکلاز و ایک است. رنگ هوازده ایس سنگها خاکستری روشن تا سفید بوده است و نمونه تازه آنها نیز به رنگ خاکستری روشن است. از دگرسانی های موجود در کانسار میتوان به دگرسانی های سیلیسی، سری سیتی و کلسیتی اشاره کرد. شکل ۲ مقطع میکروسکوپی سنگ مذکور را نشان میدهد.

نمونههای بررسی شده

بهمنظور انجام این پژوهش، بلوکهای سنگی از رمپ قره چنگول برداشت شد. سـپس در آزمایشگاه از بلوکهای سـنگی بـهمنظـور تهیـه نمونـههـای اسـتوانهای شـکل بـرای انجـام

آزمایش های تراکم تکمحوری، سهمحوری، برزیلی و برش مستقیم مطابق با استاندارد ISRM مغزه گیری شد. تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه های توف مطابق استانداردهای انجمن بین المللی مکانیک سنگ انجام شد [۲۵]. نمونه ها دارای شکل منظم هندسی نیست، بنابراین برای تعیین چگالی و تخلخل از روش اشباع و غوطه ورسازی استفاده شده است. نتایج این آزمایش در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. موقعیت معدن زهآباد و راههای دسترسی به معدن [۲۲]



شکل۲. تصویر مقطع میکروسکوپی توف آندزیتی رمپ قره چنگول

در جدول ۲ نتایج آزمایش های انجام شده روی نمونه ها برای تعیین خواص مکانیکی سنگ (شامل آزمایش تراکم تک محوری، برزیلی و تراکم سه محوری) ارائه شده است. در ضمن آزمایش ها بر طبق استانداردهای ISRM انجام شده است [۲۵]. همچنین از روابط ۱ و ۲ برای تعیین مدول برشی و حجمی سنگ استفاده می شود. در این روابط Gs مدول برشی سنگ بر حسب (GPa)، K_S مدول حجمی سنگ بر حسب (GPa)، E مدول الاستیسیته سنگ بر حسب (GPa) و \mathfrak{G} نسبت پواسون سنگ است. (۱)

$$K_S = \frac{\frac{E}{E}}{3(1-2\vartheta)} \tag{(Y)}$$

جدول ۱. خواص فیزیکی سنگ

| تخلخل مؤثر (درصد) n _e | چگالی خشک (p _d (gr (cm ³) | حجم منافذ V _V (cm ³) | حجم کل V(cm ³) | جر _م خشک M _S (gr) | جرم غوط ^ه وری M _{Sub} (gr) | جرم اشباع M _{Sat} (gr) | نمونه |
|-------------------------------------|--|--|-------------------------------|--|---|------------------------------------|----------------|
| 1/29 | ۲/۶۳ | 1/14 | ۷۱/۶۹ | 188/99 | 117/44 | ۱۸۹/۸ | S ₁ |
| ۲۲۷ | ۲/۶۲ | ۱/۲۹ | 1.1/17 | 269/1 | 190/19 | 266/29 | S ₂ |

| نتايج | پارامتر |
|--------|---|
| ٥٣/١ | $\sigma_{c}^{}(\mathrm{MPa})$ مقاومت تراکم تکمحوری (MPa |
| ٤٢/٦١ | مدول الاستيسيته استاتيكي (E(GPa |
| •/٢٦ | ضريب پواسن U |
| ۱٦/٩ | مدول برشی (GPa |
| ۲٩/٥٩ | مدول حجمی (GPa) |
| ۱ ٥/٦٣ | $\sigma_t (\mathrm{MPa})$ مقاومت کششی |
| ۵۶ | φ(Degree) |
| ٩/۴٩ | C(MPa) |

جدول ۲. خصوصیات مقاومتی سنگ بکر در برگیرنده رمپ قره چنگول

خواص ناپيوستگىھا

تخمین پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه

تعیین پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزههای توده سنگ اهمیت بهسزایی دارد. یکی از مدلهایی که برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی در امتداد درزهها بهکار میرود، معیار

کولمب است. بهمنظور بهدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی، نمونههای استوانهای شکل توف آندزیتی مطابق شکل ۵ بهوسیلهٔ بتن قالب گیری شدند و آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM D4554 روی این درزهها انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایشها در جدول ٤ ارائه شده است [٢٦].

| مقادير | پارامتر |
|--------|----------------------------------|
| ١ | چسبندگی درزه (MPa) |
| ۲ | مقاومت کششی درزه (MPa) |
| ۳۲ | زاویه اصطکاک باقیمانده (Ø(Degree |
| ٥/٤٦ | سختی برشی (GPa/m) سختی برشی |
| ۱٥/٦ | سختی قائم (GPa/m) |

جدول ۳. پارامترهای مقاومت برشی درزه



شکل ۳. آزمایش برش مستقیم روی نمونه سنگی، الف) آمادهسازی نمونه برای آزمایش، ب) دستگاه آزمایش برش مستقیم

روشهای عددی

امروزه با پیشرفت کامپیوتر و گسترش نرمافزارهای عددی، استفاده از روش های عددی برای اعمال بارهای دینامیکی، نیز پیشرفت های زیادی داشته است. در روش های عددی، سازه به قطعات کوچکی به نام المان تقسیم می شود که رفتار مواد در هر المان، ثابت و مشخص در نظر گرفته می شود. ارتباط المان ها از طریق گره های محصور کننده آن برقرار می شود و المان ها به وسیلهٔ این گره های محصور کننده تعریف می شود. در روش های عددی تنش و جابه جایی در یک توده جسم از بارهای خارجی و شرایط مرزی تحمیل شده متأثر می شوند.

روش المان مجزا (DEM)

روش اجزاء مجزا، در سالهای اخیر و با توجه به ماهیت ناپیوسته محیطهای سنگی، برای ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست توده سنگ بـهطور روزافزونی بـهکار بـرده می شود. موارد کاربرد این روش در علم مکانیک سنگ متعدد است و تمامی فعالیتهای مرتبط با این دانش از جمله حفریات زیرزمینی، شـیروانیها و پـیهای سـنگی را در بـر مـی گیـرد. فرمولسازی و توسعهٔ روش المان مجزا نخستین بار به وسیلهٔ کنـدال^۱ و در سـال ۱۹۷۱ آغـاز شده و روند تکامل آن، طی چند دهه اخیر ادامه یافته است [۲۷]. نرمافزاری که بر مبنای ایـن روش به تحلیل مسائل می پردازد، تحت عنوان DEC شناخته شـده است و در سال ۱۹۸۰ است که بر مبنای روش المان مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیطهای ناپیوسته تهیـه به وسیلهٔ کندال به ثبت رسیده است [۲۸]. نرمافزار UDEC یک برنامه تحلیل عددی دوبعـدی است که بر مبنای روش المانهای مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیطهای ناپیوسته تهیـه شده است. این نرمافزار واکنش یک محیط ناپیوسته (بهعنوان مثال سنگ تکتونیزه و درزهدار) را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیهسازی میکند. برای انجام تحلیل های استاتیکی، در ابتدا باید مدل هندسی مسئله را ایجاد کرد. بعد از آن نوبت به تعیین مشخصات مصالح و شرایط مرزی و اولیه می رسد.

مدلسازی دینامیکی در سازههای سنگی

۱. هندسه مدل

پیش از آغاز تحلیل دینامیکی لازم است مدل از لحاظ استاتیکی حل شده و به تعادل برسد، تحلیل دینامیکی پس از پایان تعادل استاتیکی قابل اجرا خواهد بود. فضای موردنظر برای مدلسازی در این مسئله رمپی نعل اسبی شکل با قاعده ٤ متر، ارتفاع ٤ متر و شعاع قوس برابر با ١/٥ متر است که در محیط سنگی شامل سنگ توف واقع شده است و میزان ارتفاع روباره از سقف رمپ حدوداً ١٩٠ متر است. ابعاد مدل ساخته شده در نرمافزار UDEC، ٢٠×٢٠ است. در شکل ٤ الف مشخصات هندسی رمپ و شرایط مرزی نشان داده شده است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای بلوکهای سنگی، مدل الاستیک همسان گرد است. در این تحقیق برای تعیین مشخصات و پارامترهای مقاومتی درزهها، برداشتهای صحرایی انجام شده است و بر پایه این برداشتها سه دسته درزه اصلی تعیین شده اند که از نوع بسته، صفحه ای و زبر هستند. در جدول ٤ مشخصات درزه های برداشت شده در مسیر رمپ قره چنگول ارائه شده است و مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای ناپیوستگی ها در این پژوهش تماس سطحی درزه (الاستوپلاستیک) با شکست لغزشی کولمب است. پس از تعادل اولیه و ایجاد تنش های برجا در مدل، مدل حفاری شده تا به شکل نهایی خود برسد. در ادامه مدل با در نظر گرفتن مرزهای جابه جایی غلطکی در طرفین و کف تحلیل شد. شکل ٤ ب وضعیت نیروهای نامتعادل در مدل پس از حل است. چنان که مشاهده می شود مدل کاملاً به تعادل رسیده است و مقدار نیروهای نامتعادل نیز به صفر میل کرده است.

| J_3 | J_2 | J_1 | پارامتر |
|--------|---------|---------|---------------------|
| ۷۳/۱۵۰ | ٦٠ / ١٣ | ۳۰ / ۷۵ | جهت شيب/ شيب |
| ١/٥ | ٣/٥ | ۲ | پایایی یا تداوم (m) |
| ١ | ١ | ١ | (m) پايايى Std. |
| ٠/٢ | ۰/۲ | •/0 | گپ (m) |
| •/١ | ٠/١ | •/1 | (m) گپ Std. |
| ۰/۲٥ | ٠/٤ | ۰/٣ | فاصله داری(m) |
| •/١ | ٠/١ | •/1 | .(m) فاصله داری Std |

جدول ٤. درزههای برداشت شده در مسیر رمپ قره چنگول



شکل ٤. الف) مدل هندسی ساخته شده در نرمافزار UDEC



شکل ۵. هیستوگرام بیشینهٔ نیروهای نامتعادل کننده

شکل ٦ تغییر شکل بلوکها را پس از تعادل استاتیکی نشان میدهد. تغییر شکلها با بزرگنمایی بیش از ٥٠ برابر نمایش داده شدهاند. چنانکه مشاهده میشود در حالت استاتیکی ریزشی صورت نمیگیرد.



شکل ٦. بزرگنمایی بلوکها پس از تعادل اولیه

نشریهٔ زمینشناسی مهندسی، جلد سیزدهم، شمارهٔ ۳ پاییز ۱۳۹۸

۲. تحلیل دینامیکی

بعد از تحلیل پایداری مدل استاتیکی در این مرحله، سیستم از لحاظ دینامیکی بررسی می شود. با توجه به پیچیدگی اندرکنش دینامیکی سازه با توده سنگ اطراف و سازه های مجاور، تحلیل و طراحی برای انفجار ویژگی های مهمی دارد. در یک تحلیل دینامیکی این نکات را باید مورد توجه قرار داد:

میرایی مکانیکی،
 چگونگی انتقال موج در مدل،
 بارگذاری دینامیکی و نحوه اعمال شرایط مرزی.

۳. بارگذاری دینامیکی و نحوهٔ اعمال شرایط مرزی

بار دینامیکی باید بهصورت یک تاریخچهٔ بارگذاری اعمال شود. بدینصورت که بار اعمالی، بهعنوان یک تابع زمانی مشخص شده و این تابع در یک بازهٔ مشخص از زمان اعمال می شود. پس از این که مدل از لحاظ استاتیکی به تعادل رسید لازم است تا شرایط مرزی آن برای تحلیلهای دینامیکی تغییر کند. در تمام مدل بررسی شده شرایط مرزی بدین شرح تغییر کرده است: تمام مرزهای راست، پایین و بالای مدل در جهت x و در جهت Y بهصورت مرزهای ویسکوز یا (آرام) در نظر گرفته شدهاند. بعد از برخورد موج به این مرزها، موج گذاشته می شود و قابلیت انعکاس موج را دارد. همچنین برای جلوگیری از جابهجایی برشی، مرز طرف چپ مدل ثابت شده است (بهطوری که جابهجایی ذرهای و سرعت ذرهای در امتداد برشی بهصورت پالسی و با دامنه ای معادل P دیده می شود، ولی مرز چپ مدل به حالت آزاد کرد شری می مرز طرف چپ مدل ثابت شده است (بهطوری که جابهجایی ذرهای و سرعت ذرهای در امتداد برشی بهصورت پالسی و با دامنه ای معادل P دیده می شود، برای اعمال بار دینامیکی از یک موج برشی بهصورت پالسی و با دامنه ای معادل P کارگاه استخراج که در ۱ متری دیواره سمت است) که به مرز چپ (به علت این که انفجار در کارگاه استخراج که در ۱ متری دیواره سمت برشی شمایی مرزها و بارگذاری در راستای محور X انتشار یافته است، استفاده شده است. نمای شماتیک مرزها و بارگذاری در شکل ۷ دیده می شود. اثر بارگذاری انفجار روی پایداری رمپ قره چنگول در معدن سرب و روی زهآباد



شکل ۷. نحوهٔ انتشار موج در مدلسازی با نرمافزار UDEC با اعمال مرزهای ویسکوز در تحلیل دینامیکی

٤. میرایی مکانیکی

برای این که انتشار موج در یک محیط سنگی به طور صحیح مدل شود، باید از میرایی مکانیکی رایلی برای مدل کردن میرایی موج در محیط سنگی استفاده شود. در حقیقت میرایی از دست رفتن انرژی در نتیجهٔ اصطکاک داخلی در مواد بکر و لغزش در سطوح مشترک سیستم است. میرایی در نظر گرفته شده برای سیستم باید نمایندهٔ مناسبی از جنس مواد و دامنه فرکانسی ورودی باشد. میرایی در نظر گرفته شده در این تحقیق میرایی رایلی با فرکانس پایه برابر با ۱٤٥٠Hz و نسبت میرا شوندگی بحرانی برابر با ۱۰/۰ استفاده شده است.

٥. تاريخچه فشار انفجار در اين تحقيق

انفجار رویدادی سریع و پیچیده است. اندازه گیری تمام ویژگیهای انفجار در حال حاضر بسیار مشکل است. روش معمول در اعمال بار انفجاری پیش بینی اندازه انفجار از طریق روابط تجربی یا نتایج اندازه گیری سرعت ذرات در زمان انفجار است. عموماً اثر بار انفجار به صورت یک پالس تنش که دارای فشار شوک بسیار زیادی است، در شبیه سازی عددی در نظر گرفته می شود که این پالس تنش از مرکز انفجار در محیط اطراف آن گسترش پیدا

میکند و با طی مسافت، این فشار شوک کاهش مییابد. حداکثر فشار ناشی از انفجار بهوسیلهٔ محققان مختلفی بررسی شده است. در تمامی این روابط فشار حداکثر تابع فاصله مقیاسبندی شده Z مطابق با رابطهٔ (۳) تعریف میشود: (۳)

که در آن R فاصله شعاعی از نقطهٔ انفجار بر حسب (m) (در این مدلسازی دیواره سمت چپ به فاصلهٔ ۱ متری از محل انفجار واقع است) و W جرم خرج انفجاری معادل TNT بر حسب کیلوگرم است. قبل از این که پارامترها برای یک انفجار استخراج شوند، خرج معادل تیان تی معادل مورد نیاز هست. چندین روش برای بیان خرج معادل تیان تی وجود دارد، یکی از این روابط به صورت نسبت انرژی ویژه جرمی مواد منفجره واقعی به انرژی ویژه جرمی تیان تی است. به منظور محاسبهٔ وزن خرج معادل با TNT برای ماده منفجرهٔ امولایت از رابطه (٤) استفاده می شود:

$$W_{TNT} = W_{Emolite} \times \frac{Q_{Emolite}}{Q_{TNT}} = 15 \times \frac{4200(Kj/Kg)}{4520(Kj/Kg)} = 14 Kg$$
(£)

مقدار فاصله مقیاس بندی شده Z با توجه رابطهٔ (۳) برابر با $(\frac{m}{Kg^{\overline{3}}})$ ۱/٤۱۰ است. در نهایت بر مبنای رابطهٔ هنریچ (۱۹۷۹) مطابق با رابطهٔ (۵) بیشینه فشار انفجار محاسبه می شود [۲۹]. در جدول ٥ خصوصیات ماده منفجره ارائه شده است. P_h = $\frac{619.4}{7} - \frac{32.6}{7^2} + \frac{213.2}{7^3}$ (KPa) $0.3 \le Z \le 1$ (٥)

بنابراین با قرار دادن مقادیر پارامترهای مذکور در رابطهٔ (۵) مقدار بیشینه فشار دینامیکی حاصل از انفجار اعمال شده برابر ٤/٤ مگاپاسکال بر آورد می شود. همچنین مطابق با آئیننامهٔ 1-58-1M5 ارتش آمریکا زمان مربوط به پالس فشار در محیطهای خاکی و سنگی از راوبط (٦) و (۷) محاسبه می شود [۳۰]. که در این روابط ta زمان لازم برای رسیدن موج به نقطهای در فاصلهٔ R از محل انفجار (مدت زمان اعمال بار انفجاری) استه، Cs سرعت موج برشی در سنگ و t_r زمان لازم برای رسیدن فشار ایجاد شده در اثر انفجار به مقدار بیشینهٔ خود است.

- $t_a = \frac{R}{c_s} \tag{7}$
- $t_r = 0.1 t_a \tag{V}$

بهمنظور بارگذاری دینامیکی بار ضربه ناشی از انفجار، از رابطهٔ نمایی (۸) که بهوسیلهٔ یـون و ژئون (۲۰۱۰) ارائه شده است، استفاده میشود [۳۱]. (۸) $P(t) = P_h \frac{e^1 t}{t_r} \times e^{\left(-\frac{t}{t_r}\right)}$

رابطهٔ (۳) کاهش نمایی فشار موج شوک را نشان میدهد که در این رابطه (P(t) تابع بارگذاری دینامیک متغیر با زمان، P_h بیشینهٔ فشار اعمال شده به دیوارهٔ چال انفجار، t_r زمان خیز و t زمان اعمال فرایند بارگذاری دینامیکی موج ضربهٔ ناشی از انفجار به دیواره است. شکل ۸ تغییرات فشار انفجار بر حسب زمان را نشان میدهد. در شکل ۸ پالس محاسبه شده برای اعمال بار به مدل بر اساس زمانهای افت و خیز در تحلیل دینامیکی را پس از ۷ میلی ثانیه نمایش داده شده است.



شکل ۸ پالس ورودی به UDEC برای تحلیل دینامیکی

۲. کنترل پاسخهای دینامیکی

در انتها پاسخهای دینامیکی مدل در نقاط مختلف بررسی میشود. در این قسمت به بررسی خطوط تراز جابهجایی، تنش، اطلاعات زمان- جابهجایی نقاط بحرانی پرداخته میشود تا پایداری سیستم در حالت دینامیکی بررسی شود. بار حاصل از انفجار بهصورت آنی وارد میشود و بر سنگ و محیط پیرامون رمپ اثر میکند. با اعمال بار، جابهجایی سنگ شروع میشود و بالطبع با فاصله گرفتن از محل وارد شدن بار این میزان از جابهجایی کمتر میشود. لازم بهذکر است که با توجه به صفر کردن جابهجاییهای استاتیکی، در مرحلهٔ

تحلیل دینامیکی جابهجایی های نشان داده شده فقط جابهجایی های ناشبی از بار دینامیکی است. در شکل ۹ تا ۱۱ تاریخچهٔ زمانی جابهجاییهای افقی و قائم در نقاط شاهد پیرامون رمی در راستای x و y یس از گذشت مدت زمان های مختلف از اعمال بار دینامیکی انفجار برای مدل بررسی شدہ نشان دادہ شدہ است. چنانکہ در شکل ۹ مشاہدہ مے شود، بیشترین مقدار جابهجایی در نقطهٔ شاهد (۲/۱، ۰) در راستای x و y پس از مدت زمان ۱۵ میلی ثانیه از اعمال بار انفجار اتفاق افتاده و پس از آن با گذشت زمان میزان جابه جایی ها به علت کاهش فشار انفجارکاهش می یابد در ضمن چون جهت موج انفجاری در جهت x است بنابراین جابهجایی در جهت x بیشتر از جابهجایی در جهـت Y اسـت. هـمچنـین بـا توجه به شکل ۱۰ میزان جابه جایی های افقی و قائم (۲۰ میلی ثانیه یس از انفجار) در نقطهٔ شاهد (۰، ۲-) روی دیواره چپ رمپ بیش تر از نقط هٔ شاهد (۰، ۲) روی دیواره راست رمپ است اما در کل میزان این جابه جایی ها نسبت به حالت استاتیکی کمتر است. جهت حرکت دیوارہ چپ رمپ بعد از ۱۵ میلی ثانیہ بهدلیل کاهش فشار موج برعکس شدہ این کاهش جابه جایی ادامه می یابد تا در نهایت در حالتی که تحلیل دینامیکی ٤٠ میلی ثانیه ادامه داشته باشد این جابه جایی افقی مطابق شکل ۱۱ الف منفی می شود. همچنین چنان که در شکل ۱۰ و ۱۱ الف مشاهده می شود زمانی موج به دیوارهٔ راست می رسد که موج در حالت تضعيف شدن است، به همين دليل حداكثر جابهجايي در ديوارهٔ راست كمتر از ديـوارهٔ چـب است. در شکل ۱۱ ب تاریخچهٔ زمانی جابهجاییهای افقی در نقطهٔ شاهد در نظر گرفته شده روی تاج رمپ در مدت زمان ٤٠ میلی ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود پس از گذشت مدت زمان ۱۵ میلی ثانیه از اعمال بار انفجار مقدار جابهجایی کاهش و در نهایت مقدار ایس جابهجایی منفی می شود. در شکل ۱۲ تاریخچهٔ زمانی سرعتهای افقی و قائم روی دیوارهٔ سمت چـپ و راسـت رمـپ در مـدت زمان ۲۰ و ٤٠ میلی ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار نمایش داده شده است. چنانکه مشاهده می شود سرعت بعد از حدود ۷ میلی ثانیه به دیوارهٔ چپ و سـپس بعـد از حـدود ۱۵ میلیثانیه به دیوارهٔ راست برخورد کرده است. همچنین در دیوارهٔ چـب ابتـدا سـرعت مثبـت است و دیواره بهسمت راست حرکت میکند و بهتدریج با میرایی موج، موج برگشتی از دیواره بر موج رفت غلبه کرده و سرعت منفی میشود. در ضمن در دیوارهٔ راست در اثر موج

تراکمي که به ديوارهٔ چپ وارد شده است اين ديواره بهسمت راست حرکت ميکند ولي میزان سرعت در دیوارهٔ راست کمتر است چون موج میرا شده است. همچنین میزان تغییرات سرعت در سمت چپ ديواره رمپ بيشتر از سمت راست ديواره رمپ است که اين مطلب نشاندهندهٔ آن است که با گذشت زمان و با افزایش فاصله از محل انفجار موج میرا می شود. در شکل ۱۳ پلات تنش در راستای X در مدت زمان ۲۰ و ٤٠ میلی ثانیـه یـس از اعمـال بـار ديناميكي انفجار در اطراف رمپ نشان داده شده است. چنانكه مشاهده مي شود در مدت زمان ۲۰ میلی ثانیه از اعمال بار، موج انفجار بهصورت فشاری عمل کرده و یس از گذشت زمان بهعلت برگشت موج در اکثر نقاط اطراف رمپ تنش کششی ایجاد میکند. در شکل ۱٤ یلات میزان بازشدگی درزهها در پیرامون رمپ در مدت زمان ۲۰ و ٤٠ میلی ثانیه پس از اعمال بار انفجار نمایش داده شده است. چنانکه مشاهده می شود میزان باز شدگی درزهها در مدت زمان ٤٠ میلی ثانیه از اعمال بار انفجار به علت بر گشت موج بیش تر از مدت زمان ۲۰ میلی ثانیه از اعمال بار انفجار است. همچنین در شکل ۱۵ بزرگ نمایی بلوک ها یس از گذشت مدت زمان ٤٠ میلی ثانیه از اعمال بار انفجار نشان داده شده است. در نهایت با توجه به نمودارهای جابهجایی برای نقاط شاهد در نظر گرفته شده در اطراف تونل، کم بودن میزان تغییرات جابهجایی در حالت دینامیکی، میزان بازشدگی کم درزهها در اطراف سازه و شکل بزرگنمایی بلوکها پس از ٤٠ میلی ثانیه می توان گفت، رمپ پایدار می ماند و در حالت دینامیکی نیز ریزشی در اطراف حفریه موردنظر انجام نمی گیرد. لازم به ذکر است بعد از انفجارکارگاه استخراج در ناحیهٔ رمب بررسی شده، ناپایداری مشاهده نشده است که نشاندهندهٔ صحت مدلسازی عددی انجام شده است.





شکل ۹. تاریخچهٔزمانی جابهجایی های الف) افقی، ب) قائم در نقطهٔ شاهد (۲/۱ ، ۰) روی سقف رمپ پس از گذشت مدت زمان ۲۰ میلی ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار



شکل ۱۰. تاریخچهٔ زمانی الف) جابهجاییهای افقی، ب) قائم در نقاط شاهد (۰، ۲–) و (۰، ۲) روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ در مدت زمان ۲۰ میلی ثانیه از اعمال بار دینامیکی



شکل ۱۱. تاریخچهٔ زمانی جابهجاییهای افقی الف) در نقاط شاهد (۰ ، ۲–) و (۰ ، ۲) روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ، ب) در نقطه شاهد (۲/۱ ، ۰) روی سقف در مدت زمان ٤٠ میلی ثانیه از اعمال بار دینامیکی



[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-05-11]

30V







شکل ۱۳. کنتور تنش در راستای x (Sxx) در اطراف رمپ در مدت زمان الف) ۲۰ میلی ثانیه، ب) ٤٠ میلی ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار



شکل ۱٤. پلات بازشدگی درزهها الف) در ۲۰ میلی ثانیه، ب) در ٤٠ میلی ثانیه پس از اعمال بار



انفجار

نتىچەگىرى

- نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از: ۱. درحالت استاتیکی با توجه به پلات بزرگنمایی بلوکها پس از تعادل اولیـه مشـاهده میشود هیچ بلوکی به داخل رمـپ ریـزش نمـیکنـد در نتیجـه در حالـت بارگـذاری استاتیکی رمپ پایدار است.
- ۲. در حالت دینامیکی با توجه پلات بازشدگی درزهها و اعمال بار انفجار در مدت زمان ۲۰ و ٤٠ میلی ثانیه، چنان که مشاهده می شود با گذشت زمان میزان بازشدگی و تغییر شکل در اطراف دیوارهٔ سمت چپ رمپ افزایش می یابد.
- ۳. با گذشت زمان برای یک نقطه معین سرعت ذرمای حداکثر کاهش مییابد (بهعبارتی موج میرا میشود) که این کاهش برای نقاط نزدیکتر به منبع انفجار دیرتر اتفاق میافتد.
- ٤. در حالت دینامیکی با توجه به کنتور تنش در راستای x در مدت زمان ۲۰ و ٤٠ میلی ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار، در مدت زمان ۲۰ میلی ثانیه از اعمال بار، موج انفجار به صورت فشاری عمل کرده و پس از گذشت زمان به علت برگشت موج در اکثر نقاط اطراف رمپ تنش کششی ایجاد میکند.
- ٥. با توجه به تاریخچهٔ زمانی سرعتهای افقی و قائم روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ در مدت زمان ۲۰ و ٤٠ میلی ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار، سرعت بعد از حدود ۷ میلی ثانیه به دیوارهٔ چپ و سپس بعد از حدود ۱۵ میلی ثانیه به دیوارهٔ راست برخورد کرده است. همچنین در دیواره چپ ابتدا سرعت مثبت است و دیواره به سمت راست حرکت میکند و به تدریج با میرایی موج، موج بر گشتی از دیواره بر موج رفت غلبه کرده و سرعت منفی می شود.
- ۲. در حالت بارگذاری دینامیکی با توجه به نمودارهای جابهجایی برای نقاط شاهد در نظر گرفته شده در اطراف رمپ و کم بودن میزان این جابهجاییها و همچنین با توجه به پلات بزرگنمایی بلوکها بعد از گذشت ٤٠ میلی ثانیه پس از انفجار می توان گفت بلوکی به داخل رمپ ریزش نکرده است در نتیجه در حالت بارگذاری دینامیکی نیز رمپ پایدار است و نصب سیستم نگهداری نیازی نیست.

منابع

- Gui M. W., Chien M. C., "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport–a Parametric Study", Geotech. Geol. Eng. 24 (2004) 227-248.
- Fan S. C., Jiao Y. Y., Zhao J., "On modelling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method", Computers and Geotechnics, Vol. 31 (2004) 57-66.
- Morris J. P., Rubin M.B., Blair S. C., Glenn L. A., Heuze F. E., "Simulations of underground structures subjected to dynamic loading using the distinct element method", Engineering computations, Vol. 21 (2004) 384-408.
- Lu.Y., Wang .Z., Chong K., "A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25, School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore (2005).
- Heuze F. E., Morris J. P., "Insights into ground shock in jointed rocks and the response of structures there-in", Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., Vol. 44 (2006) 647-676.
- Jiao Y. Y., Zhang X. L., Zhao J., Q. S. Liu Q. S., "Viscous boundary of DDA for modeling stress wave propagation in jointed rock", Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., 44 (2007) 1070-1076.
- Wang Z., Li Y., Wang J. G., "Numerical analysis of blast-induced wave propagation and spalling damage in a rock plate", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 45 (2008) 600-608.

- Salmi E. F., Mortazavi A., "A Numerical Investigation of the Effect of Blast hole Delay in Rock Fragmentation", Rock Fragmentation by Blasting, London: Taylor & Francis Group (2009) 363-369.
- Yang Y. U., Xie X., Wang R., "Numerical simulation of dynamic response of operating metro tunnel", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2 (4) (2010) 373-384.
- Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J., "Blast loading and blast effects on structures-An overview", EJSE special issue: loading on structures (2007).
- Olarewaju A. J., Kameswara Rao N. S. V., Mannan M. A., "Response of underground pipes due to surface blast using finite element method", University Malaysia sabah (2010).
- Kumar, Matsagar V. A., Rao K. S., "Blast loading on semi buried structures with soil-structure interaction", IMPLAST 2010 conference, Rhode Island, USA (2010).
- Shin J. H., Moon H. G., Chae S. E., "Effect of Blast-Induced Vibration on Exiting Tunnels in Soft Rocks", Tunn. Undergr Sp. Tech. 26 (2011) 51-61.
- Jiang N., Chuanbo Z., "Blasting Vibration Safety Criterion for a Tunnel Liner Structure", Tunn. Undergr. Sp. Tech., 32 (2012) 52-57.
- 15. Xia X., Li H. B., Li J. C., Liu B., Yu C., "A Case Study on Rock Damage Prediction and Control Method for Underground Tunnels Subjected to Adjacent Excavation Blasting", Tunn.Undergr. Sp. Tech, 35 (2013) 1-7.

- Anirban De., "Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil", Comput Geotech, 43 (2012) 72–9.
- Buonsantia M., Leonardi G., "3-D simulation of tunnel structures under blast loading", archives of civil and mechanical engineering, 13 (2013) 128-134.
- Shao Z. S., Wang X. Y., "Investigation into the effect of free surface blast-induced vibration of existing tunnel", 9th international conference on fracture & strength of solids, Korea (2013).
- 19. Chakraborty T., Larcher M., Gebbeken N., "Comparative performance of tunnel lining materials under blast loading", 3rd International Conference Computational on Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering, Ruhr University Bochum (2013).
- Ghalandari S., Merufinia E.d., Pourbahram R. A., Ghalandari S.
 O., "Numerical study of the ynamic behavior of a rock mass under explosion load", International Journal of Current Life Sciences- Vol.4, Issue, 9 (2014) 6128-6135, September.
- Haitao Yu, Zhengbo Wang, Yong Yuan, Wenting Li, "Numerical analysis of internal blast effects on underground tunnel in soils", Structure and Infrastructure Engineering (2016).

۲۲. شرکت مهندسین مشاور فراپارس قشم، "گزارش بخش اول خـدمات فنـی و مهندسـی کانسـار سرب و روی زهآباد" (۱۳۸۵).

۲۳. شرکت مهندسین مشاور تهران پادیر، "گرزارش زمینشناسی– معدنی کانسار سرب و روی زهآباد"، سازمان زمینشناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۲).

Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2024-05-11

- ISRM, "Laboratory and Field Testing", International journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanical Abstracs (1982).
- 25. ISRM, "In: Ulusay, Hudson (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods, International Society for Rock Mechanics", ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey (2007).
- 26. ASTM D4554, "Standard test Method for in-situ determination of direct shear strength of rock discontinuities.
- 27. Cundall P. A., "A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock systems", International Symposium on Rock Mechanics, International Society of Rock Mechanic, Nancy (1971) II-8.
- Cundall P. A., et al., "NESSI-Soil Structure Interaction Program for Dynamic and Static Problems", Norwegian Geotechnical Institute, Report 51508-9 (1980).
- Nagy N., "Nonlinear numerical modeling for the effects of surface explosions on buried reinforced concrete structures", Geomechanics and Engineering, vol.2, No.1 (2010) 1-18.
- American society of civil engineers, "Protective design: Fundamentals of protectivedesign (non-unclear)", Department of the technical manual Tm5-855 (1965).
- Yoon J., Jeon S., "Use of a Modified Particle-Based Method in Simulating Blast-Induced Rock Fracture", Rock Fragmentation by Blasting, London: Taylor & Francis Group, (2010) 371-380.