[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

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 ۹۶/۱۰/۲٤ پذیرش ۹۷/۰٦/۲٦

چکیده

انفجار و لرزش‌های حاصل از آن در مقایسه با ساختارهای زمین‌شناسی و آب زیرزمینی، به‌دلیل 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 زه‌آباد واقع در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان قزوین در بخش طارم سفلی واقع است. به‌منظور به‌دست آوردن خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های در برگیرنده رمپ و پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها، آزمایش‌هایی شامل آزمایش‌های 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 مدل وارد می‌شود. در بحث پایداری معادن و فرآیند انفجار، بار دینامیکی حاصل از آن اغلب به‌صورت یک پالس به مدل اعمال می‌شود. با وارد کردن بار دینامیکی و در نظر گرفتن سایر تغییرات یاد شده نسبت به تحلیل استاتیکی، می‌توان پاسخ دینامیکی فضای زیرزمینی را تحت بار لرزشی انفجار و یا زلزله پیش‌بینی کرد. برای این منظور موج ضربه ناشی از انفجار به‌صورت پالس نمایی با فشار بیشینه ٤/٤١ مگاپاسکال و پهنای زمانی ۰/۷ تا ۷ میلی‌ثانیه به مرز سمت چپ

*نویسنده مسئول mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

مدل اعمال شد. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد که در حالت استاتیکی فضای زیرزمینی مورد نظر پایدار است و بلوکی ریزش نمی‌کند. بعد از اعمال بار حاصل از انفجار نتایج نشان می‌دهد، رمپ پایدار می‌ماند و نیازی به نصب سیستم نگه‌داری نیست و در اطراف رمپ موردنظر ریزشی صورت نمی‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: معدن سرب و روی زه‌آباد، رمپ قره چنگول، بارگذاری انفجار، پایداری، تحلیل دینامیکی، مدل‌سازی عددی.

مقدمه

فرآیند انفجار بسیار پیچیده است و عمدتاً تمام طراحی‌های انفجاری بر اساس روابط تجربی مبتنی بر سعی و خطا انجام می‌شوند. امروزه با افزایش سرعت و توان محاسباتی کامپیوترها امکان شبیه‌سازی این فرآیند وجود داشته و می‌توان از این فرصت برای شناخت بهتر مکانیزم انفجار و طراحی‌های دقیق‌تر استفاده کرد. در این راستا نرم افزارهای محاسبانی زیادی برای شبیه‌سازی فرایند انفجار توسعه داده شده و استفاده شده‌اند. با توجه به توسعهٔ قابل توجه روش‌های عددی در دهه‌های اخیر، امکان بررسی اثرات انفجار بر سازه‌های سطحی و زیرزمینی با دقت زیاد فراهم شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به 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 پدیده هستند. از این‌رو، انتخاب و استفاده از نتایج این نرم‌افزارها با توجه به شرایط حاکم بر پروژه و مبتنی بر قضاوت مهندسی و تجربه انجام می‌شود. بررسی پاسخ تودهٔ سنگ در برابر تنش‌های دینامیکی با دامنهٔ بالا بسیار پیچیده است و نیازمند شناخت رفتار تودهٔ سنگ در برابر تنش‌های بالا است. بنابراین برای بررسی چنین پدیده‌هایی استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و عددی ضروری است. گویی و چی ان در سال ۲۰۰۳، با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ اثر انفجار را روی تونلی که در زیر فرودگاهی در تایوان ساخته شده بود مدل‌سازی کردند و تأثیر ویژگی‌های خاک از جمله سختی دینامیکی خاک، مقاومت برشی زه‌کشی نشده، نسبت میرایی خاک و شدت بار انفجاری و ابعاد گودال ایجاد شده را در پاسخ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

سازه بررسی کرده‌اند [۱]. فَن و همکاران در سال ۲۰۰٤ تأثیر شرایط مرزی را با توجه به ورودی تاریخچه تنش و ورودی تاریخچه سرعت بر انتشار موج تنش در تودهٔ سنگ درزه دار، به‌وسیلهٔ نرم‌افزار UDEC شبیه‌سازی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد، تاریخچهٔ ورودی به‌صورت حداکثر سرعت ذره‌ای تطابق بیش‌تری با نتایج آزمایش‌های برجا دارد [۲]. موریس و همکاران (۲۰۰٤) پاسخ دینامیکی مجموعه‌های بزرگ مقیاس چند تونل در برابر بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار زیرزمینی را با استفاده از کد محاسباتی سه‌بعدی اجزاء 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 تحلیل‌های دینامیکی دوبعدی و سه بعدی به‌وسیلهٔ نرم‌افزار AUTODYN پرداختند [٤]. هیوز و موریس در سال ۲۰۰٦ به‌منظور مدل‌سازی اثرات انفجار در محیط سنگی درزه دار، یک سری آزمایش‌های 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 واقعی، سطح قابل قبولی از تطابق را بین آن‌ها مشاهده کردند [۵]. جیائو و همکاران (۲۰۰۷) به‌منظور بررسی اثرات گسترش موج انفجاری در محیط سنگی درزه‌دار، مرزهای ویسکوز را با کد محاسباتی Shi's DDA اعمال کردند [٦]. هم‌چنین وانگ و همکاران (۲۰۰۸) گسترش موج و پوسته پوسته شدن ناشی از پدیدهٔ انفجار را با استفاده از روش‌های عددی بررسی کردند [۷]. سلمی و مرتضوی نیز در سال ۲۰۰۹ اثر تأخیر بین چال‌ها را به‌صورت کیفی روی شکست سنگ با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته $FLAC^{3D}$ شبیه‌سازی کردند [۸]. هم‌چنین یانگ و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی انفجارهای سطحی بر سازه‌های کم عمق مانند تونل‌های مترو با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار ANSYS پرداختند [۹]. نگو و همکاران (۲۰۱۰) اثر انفجار سطحی بر سازه‌های مدفون را با استفاده از مدل‌سازی عددی غیرخطی بررسی کردند [۱۰]. اولاریواژو و همکاران (۲۰۱۰) نیز به بررسی لوله‌های مدفون در برابر انفجار سطحی، به‌روش المان محدود پرداختند [۱۱]. کامر و همکاران سازهٔ مدفون را در برابر انفجار با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازهٔ بررسی کردند؛ به‌طوری‌که یک سازهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

نیمه مدفون را یک بار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و یک بار بدون در نظر گرفتن این اثر، تحت بار انفجار تحلیل کرده و به مقایسه نتایج حاصل از تحلیل پرداختند [۱۲]. شین 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 تونل‌ها بررسی کردند. آنیربان (۲۰۱۲)، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS AUTODYN 13 اثر یک انفجار سطحی را روی تونل‌های زیرزمینی در قالب یک مدل سه‌بعدی المان محدود شبیه‌سازی کرد [۱٦]. بونسانتی و لئوناردی (۲۰۱۳) به‌کمک اجزای محدود سه‌بعدی به الگوسازی سازهٔ تونل تحت اثر بار انفجار پرداختند و تحلیل‌های تغییرشکل و حرارتی آن را به‌کار گرفتند [۱۷]. شاو و وانگ (۲۰۱۳) اثر انفجار سطحی را بر لرزش ایجاد شده بر تونل‌های موجود بررسی کردند [۱۸]. چاکرابورتی و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد جذب شوک مواد مختلفی مانند فوم و فولاد را بر لاینینگ بتنی تونل تحت بارگذاری انفجار با هم مقایسه کردند. هم‌چنین بار انفجار از طریق شبیه‌سازی فرمول‌های اویلر و لاگرانژ به‌طور کامل برای اندرکنش سیال- سازه تحت بارگذاری انفجاری در تحلیل‌ها ارزیابی شد و تونل‌های زیرزمینی به‌صورت سه‌بعدی 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 تونل‌های دایره‌ای را در عمق‌های مختلف تحت بارهای ناشی از انفجار تحلیل و ارزیابی کردند [۲۰]. هایتائو و همکاران (۲۰۱٦)، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، تأثیر بارهای انفجاری داخلی را روی تونل‌های مدفون در خاک برای سازه‌ها و زیرسازه‌های مهندسی بررسی کردند [۲۱]. این مقاله به مدل‌سازی رمپ قره چنگول معدن سرب و روی زه‌آباد در برابر بارهای انفجاری می‌پردازد. این معدن در جنوب روستای زه‌آباد واقع در ۷۰ کیلومتری شمال شهرستان قزوین در بخش طارم سفلی واقع است.

زمین‌شناسی ناحیهٔ معدنی زه‌آباد

کانسار زه‌آباد در جنوب روستای زه‌آباد واقع در ٥٦ کیلومتری شمال غربی شهرستان قزوین با طول جغرافیایی ٤۹ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض ۳٦ درجه و ۲۸ دقیقه در بخش طارم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

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 ایران است. مرز جنوبی آن گسل سمنان و مرز غربی آن گسل‌های تبریز و ارومیه است. سازند در برگیرنده کانسار به‌طورکلی از سنگ‌های آذرآواری، گدازی و سنگ‌های رسوبی ائوسن (سازند کرج) تشکیل شده است که به ۲۲ واحد چینه‌شناسی تقسیم‌بندی و بررسی شده است. ترکیب سنگ‌شناسی واحدهای توفی به‌طور عمده ریولیتی تا داسیتی است و واحدهای گدازه‌ای به‌صورت ریولیت، داسیت و آندزیت دیده می‌شوند. امتداد گسل یا گسل‌های اصلی و فرعی که در منطقه وجود دارد شرقی- جنوب غربی است و راستالغز هستند و هیچ‌گونه نقشی در کانی‌سازی معادن سرب و روی منطقه نداشته است. بر اساس گزاش زمین‌شناسی شرکت تهران پادیر حداکثر عیار سرب ۱٤/۷ درصد و حداکثر عیار روی ۱۵/۵ درصد است و عیار 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 گرم در تن است. ذخیره ممکن مجموعه معادن زه‌آباد ۱۰۱۱۵۲ تن برآورد شده است [۲۳]. هم‌چنین به‌منظور شناخت کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ و تشخیص نوع سنگ، ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات بافتی نمونه، مقاطع نازک در زیر میکروسکوپ بررسی شد. بررسی مقاطع نازک نشان داد که این سنگ توف آندزیتی است و دارای بافت پورفیری، دانه‌ریز و تقریباً روشن است وکانی اصلی سازنده آن کوارتز، و کانی‌های فرعی آن آمفیبول- پلاژیوکلاز و اپک است. رنگ هوازده این سنگ‌ها خاکستری روشن تا سفید بوده است و نمونه تازه آن‌ها نیز به رنگ خاکستری روشن است. از دگرسانی‌های موجود در کانسار می‌توان به دگرسانی‌های سیلیسی، سری سیتی و کلسیتی اشاره کرد. شکل ۲ مقطع میکروسکوپی سنگ مذکور را نشان می‌دهد.

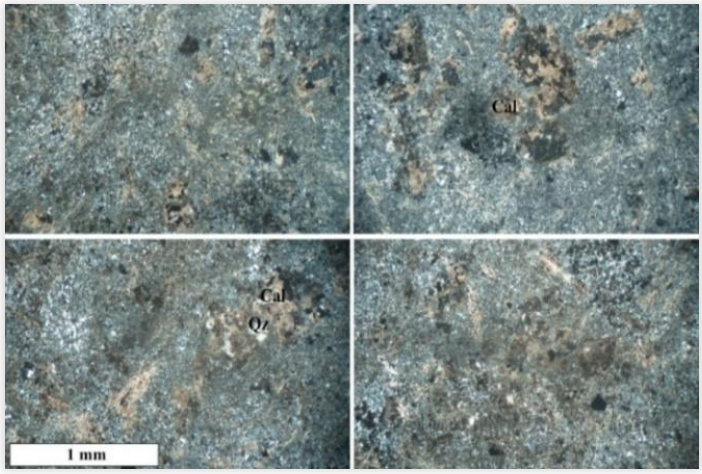
نمونه‌های بررسی شده

به‌منظور انجام این پژوهش، بلوک‌های سنگی از رمپ قره چنگول برداشت شد. سپس در آزمایشگاه از بلوک‌های سنگی به‌منظور تهیه نمونه‌های استوانه‌ای شکل برای انجام

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

آزمایش‌های تراکم تک‌محوری، سه‌محوری، برزیلی و برش مستقیم مطابق با استاندارد ISRM مغزه‌گیری شد. تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌های توف مطابق استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ انجام شد [۲٤]. نمونه‌ها دارای شکل منظم هندسی نیست، بنابراین برای تعیین چگالی و تخلخل از روش اشباع و غوطه‌ورسازی 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

در جدول ۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌ها برای تعیین خواص مکانیکی سنگ (شامل آزمایش تراکم تک‌محوری، برزیلی و تراکم سه‌محوری) ارائه شده است. در ضمن آزمایش‌ها بر طبق استانداردهای ISRM انجام شده است [۲۵]. هم‌چنین از روابط ۱ و ۲ برای تعیین مدول برشی و حجمی سنگ استفاده می‌شود. در این روابط G_S مدول برشی سنگ برحسب (GPa)، K_S مدول حجمی سنگ بر حسب (GPa)، E مدول الاستیسیته سنگ بر حسب (GPa) و ϑ نسبت پواسون سنگ است.

$$G_S = \frac{E}{2(1+\vartheta)} \quad (۱)$$

$$K_S = \frac{E}{3(1-2\vartheta)} \quad (۲)$$

جدول ۱. خواص فیزیکی سنگ

نمونه	جرم اشباع $M_{Sat}(gr)$	جرم غوطه‌وری $M_{Sub}(gr)$	جرم خشک $M_S(gr)$	حجم کل $V(cm^3)$	حجم منافذ $V_V(cm^3)$	چگالی خشک $\rho_d(\frac{gr}{cm^3})$	تخلخل مؤثر n_e (درصد)
S_1	۱۸۹/۸	۱۱۷/۸۴	۱۸۸/۶۶	۷۱/۶۹	۱/۱۴	۲/۶۳	۱/۵۹
S_2	۲۶۶/۳۹	۱۶۵/۲۶	۲۶۵/۱	۱۰۱/۱۳	۱/۲۹	۲/۶۲	۱/۲۷

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

پارامتر	نتایج
مقاومت تراکم تک‌محوری σ_c(MPa)	۵۳/۱
مدول الاستیسیته استاتیکی E(GPa)	٤۲/٦۱
ضریب پواسن υ	۰/۲٦
مدول برشی G_s(GPa)	۱٦/۹
مدول حجمی K_s(GPa)	۲۹/۵۹
مقاومت کششی σ_t (MPa)	۱۵/٦۳
φ(Degree)	۵۶
C(MPa)	۹/۴۹

خواص ناپیوستگی‌ها

۱. تخمین پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه

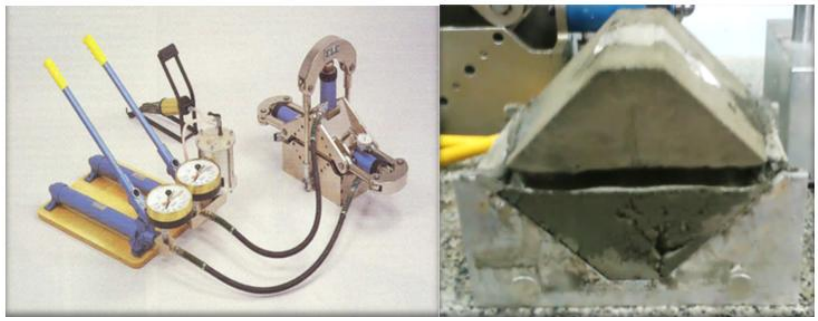
تعیین پارامترهای مقاومت برشی سطوح درزه‌های توده سنگ اهمیت به‌سزایی دارد. یکی از مدل‌هایی که برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی در امتداد درزه‌ها به‌کار می‌رود، معیار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

کولمب است. به‌منظور به‌دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی، نمونه‌های استوانه‌ای شکل توف آندزیتی مطابق شکل ۵ به‌وسیلهٔ بتن قالب‌گیری 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].

جدول ۳. پارامترهای مقاومت برشی درزه

پارامتر	مقادیر
چسبندگی درزه C(MPa)	۱
مقاومت کششی درزه σ_t(MPa)	۲
زاویه اصطکاک باقی‌مانده φ(Degree)	۳۲
سختی برشی K_S(GPa/m)	٥/٤٦
سختی قائم K_n (GPa/m)	۱٥/٦



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 روش‌های عددی برای اعمال بارهای دینامیکی، نیز پیشرفت‌های زیادی داشته است. در روش‌های عددی، سازه به قطعات کوچکی به نام المان تقسیم می‌شود که رفتار مواد در هر المان، ثابت و مشخص در نظر گرفته می‌شود. ارتباط المان‌ها از طریق گره‌های محصور کننده آن برقرار می‌شود و المان‌ها به‌وسیلهٔ این گره‌های محصورکننده تعریف می‌شود. در روش‌های عددی تنش و جابه‌جایی در یک توده جسم از بارهای خارجی و شرایط مرزی تحمیل شده متأثر می‌شوند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

۱. 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 به‌طور روزافزونی به‌کار برده می‌شود. موارد کاربرد این روش در علم مکانیک سنگ متعدد است و تمامی فعالیت‌های مرتبط با این دانش از جمله حفریات زیرزمینی، شیروانی‌ها و پی‌های سنگی را در بر می‌گیرد. فرمول‌سازی و توسعهٔ روش المان مجزا نخستین بار به‌وسیلهٔ کندال[1] و در سال ۱۹۷۱ آغاز شده و روند تکامل آن، طی چند دهه اخیر ادامه یافته است [۲۷]. نرم‌افزاری که بر مبنای این روش به تحلیل مسائل می‌پردازد، تحت عنوان UDEC شناخته شده است و در سال ۱۹۸۰ به‌وسیلهٔ کندال به ثبت رسیده است [۲۸]. نرم‌افزار UDEC یک برنامه تحلیل عددی دوبعدی است که بر مبنای روش المان‌های مجزا برای تحلیل مکانیک سنگی محیط‌های ناپیوسته تهیه 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 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.

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 ۱/۵ متر است که در محیط سنگی شامل سنگ توف واقع شده است و میزان ارتفاع روباره از سقف رمپ حدوداً ۱۹۰ متر است. ابعاد مدل ساخته شده در نرم‌افزار UDEC، ۲۰×۲۰ 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 هم‌سان‌گرد است. در این تحقیق برای تعیین مشخصات و پارامترهای مقاومتی درزه‌ها، برداشت‌های

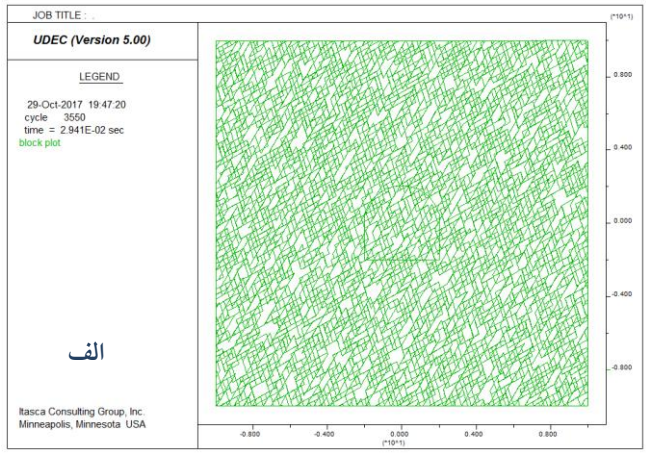
1. Cundall

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

صحرایی انجام شده است و بر پایه این برداشت‌ها سه دسته درزه اصلی تعیین شده‌اند که از نوع بسته، صفحه‌ای و زبر هستند. در جدول ٤ مشخصات درزه‌های برداشت شده در مسیر رمپ قره چنگول ارائه شده است و مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای ناپیوستگی‌ها در این پژوهش تماس سطحی درزه (الاستوپلاستیک) با شکست لغزشی کولمب است. پس از تعادل اولیه و ایجاد تنش‌های برجا در مدل، مدل حفاری شده تا به شکل نهایی خود برسد. در ادامه مدل با در نظر گرفتن مرزهای جابه‌جایی غلطکی در طرفین و کف تحلیل شد. شکل ٤ ب وضعیت نیروهای نامتعادل در مدل پس از حل است. چنان‌که مشاهده می‌شود مدل کاملاً به تعادل رسیده است و مقدار نیروهای نامتعادل نیز به صفر میل کرده است.

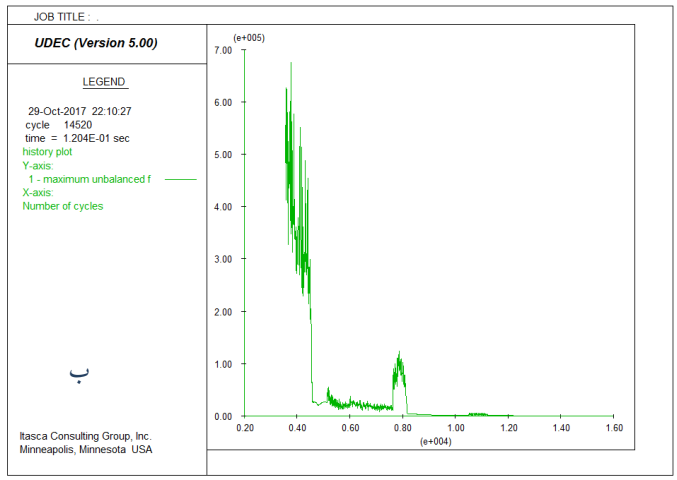
جدول ٤. درزه‌های برداشت شده در مسیر رمپ قره چنگول

پارامتر	J_1	J_2	J_3
جهت شیب/ شیب	۳۰ / ۷۵	٦۰ / ۱۳	۷۳ / ۱۵۰
پایایی یا تداوم (m)	۲	۳/۵	۱/۵
Std. پایایی (m)	۱	۱	۱
گپ (m)	۰/۵	۰/۲	۰/۲
Std. گپ (m)	۰/۱	۰/۱	۰/۱
فاصله داری(m)	۰/۳	۰/٤	۰/۲۵
Std. فاصله داری (m)	۰/۱	۰/۱	۰/۱



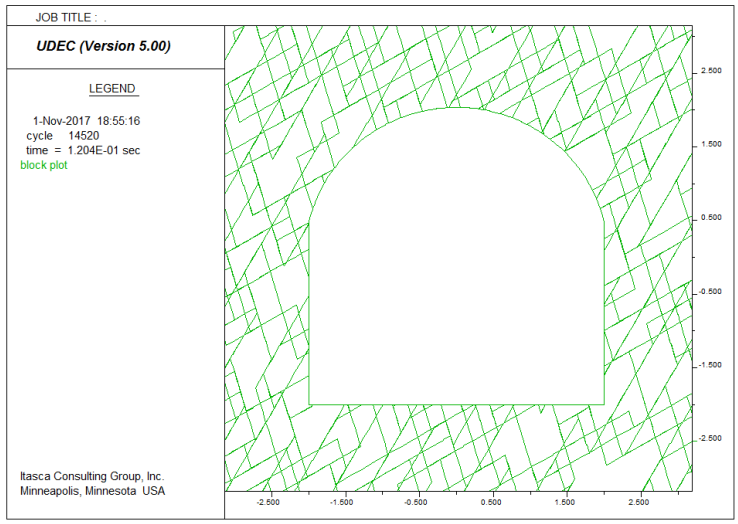
شکل ٤. الف) مدل هندسی ساخته شده در نرم‌افزار UDEC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]



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 ۵۰ برابر نمایش داده شده‌اند. چنان‌که مشاهده می‌شود در حالت استاتیکی ریزشی صورت نمی‌گیرد.



شکل ٦. بزرگ‌نمایی بلوک‌ها پس از تعادل اولیه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

۲. تحلیل دینامیکی

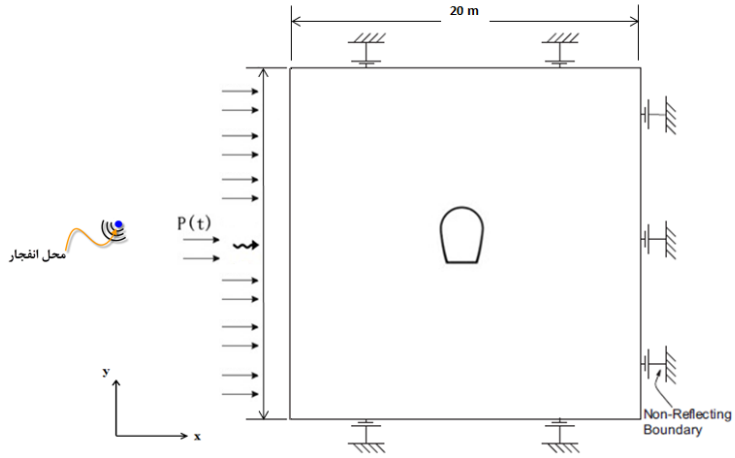
بعد از تحلیل پایداری مدل استاتیکی در این مرحله، سیستم از لحاظ دینامیکی بررسی می‌شود. با توجه به پیچیدگی اندرکنش دینامیکی سازه با توده سنگ اطراف و سازه‌های مجاور، تحلیل و طراحی برای انفجار ویژگی‌های مهمی دارد. در یک تحلیل دینامیکی این نکات را باید مورد توجه قرار داد:

۱. میرایی مکانیکی،
۲. چگونگی انتقال موج در مدل،
۳. 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 می‌شود. پس از این‌که 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 برخوردی جذب شده و به داخل آن برگردانده نمی‌شود، ولی مرز چپ مدل به حالت آزاد گذاشته می‌شود و قابلیت انعکاس موج را دارد. هم‌چنین برای جلوگیری از جابه‌جایی برشی، مرز طرف چپ مدل ثابت شده است (به‌طوری‌که جابه‌جایی ذره‌ای و سرعت ذره‌ای در امتداد محور x صفر باشد). چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود، برای اعمال بار دینامیکی از یک موج برشی به‌صورت پالسی و با دامنه‌ای معادل ٤/٤١ MPa (محاسبات در بخش ۵ ذکر شده است) که به مرز چپ (به‌علت این‌که انفجار در کارگاه استخراج که در ۱ متری دیواره سمت چپ تونل قرار دارد انجام می‌شود.) در راستای محور x انتشار یافته است، استفاده شده است. نمای شماتیک مرزها و بارگذاری در شکل ۷ دیده می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]



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

٤. میرایی مکانیکی

برای این‌که انتشار موج در یک محیط سنگی به‌طور 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 ١٤٥٠Hz و نسبت میرا شوندگی بحرانی برابر با ۰/۰۱ استفاده شده است.

۵. تاریخچه فشار انفجار در این تحقیق

انفجار رویدادی سریع و پیچیده است. اندازه‌گیری تمام ویژگی‌های انفجار در حال حاضر بسیار مشکل است. روش معمول در اعمال بار انفجاری پیش‌بینی اندازه انفجار از طریق روابط تجربی یا نتایج اندازه‌گیری سرعت ذرات در زمان انفجار است. عموماً اثر بار انفجار به‌صورت یک پالس تنش که دارای فشار شوک بسیار زیادی است، در شبیه‌سازی عددی در نظر گرفته می‌شود که این پالس تنش از مرکز انفجار در محیط اطراف آن گسترش پیدا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

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:

$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \qquad (۳)$$

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 این‌که پارامترها برای یک انفجار استخراج شوند، خرج معادل تی‌ان‌تی معادل مورد نیاز هست. چندین روش برای بیان خرج معادل تی‌ان‌تی وجود دارد، یکی از این روابط به‌صورت نسبت انرژی ویژه جرمی مواد منفجره واقعی به انرژی ویژه جرمی تی‌ان‌تی است. به‌منظور محاسبهٔ وزن خرج معادل با TNT برای ماده منفجرهٔ امولایت از رابطه (٤) استفاده می شود:

$$W_{TNT} = W_{Emolite} \times \frac{Q_{\text{Emolite}}}{Q_{TNT}} = 15 \times \frac{4200(Kj/Kg)}{4520(Kj/Kg)} = 14\,Kg \qquad (٤)$$

مقدار فاصله مقیاس‌بندی شده Z با توجه رابطهٔ (۳) برابر با $(\frac{m}{Kg^{\frac{1}{3}}})$ ۰/٤١٥ است. در نهایت بر مبنای رابطهٔ هنریچ (۱۹۷۹) مطابق با رابطهٔ (۵) بیشینه فشار انفجار محاسبه می‌شود [۲۹]. در جدول ۵ خصوصیات ماده منفجره ارائه شده است.

$$\mathrm{P_h} = \frac{619.4}{\mathrm{Z}} - \frac{32.6}{\mathrm{Z}^2} + \frac{213.2}{\mathrm{Z}^3}\ (\mathrm{KPa}) \qquad 0.3 \le \mathrm{Z} \le 1 \qquad (۵)$$

بنابراین با قرار دادن مقادیر پارامترهای مذکور در رابطهٔ (۵) مقدار بیشینه فشار دینامیکی حاصل از انفجار اعمال شده برابر ٤/٤١ مگاپاسکال برآورد می‌شود. هم‌چنین مطابق با آئین‌نامهٔ TM5-855-1 ارتش آمریکا زمان مربوط به پالس فشار در محیط‌های خاکی و سنگی از راوبط (٦) و (۷) محاسبه می‌شود [۳۰]. که در این روابط t_a 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.

$$\mathrm{t_a} = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{C_s}} \qquad (٦)$$

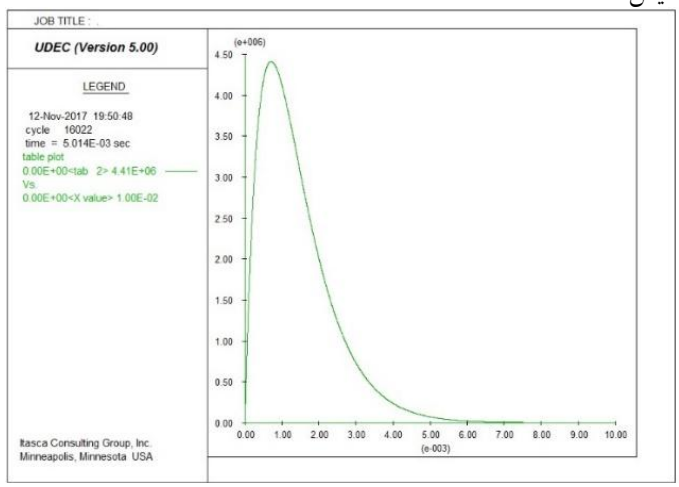
$$\mathrm{t_r} = 0.1\mathrm{t_a} \qquad (۷)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

به‌منظور بارگذاری دینامیکی بار ضربه ناشی از انفجار، از رابطهٔ نمایی (۸) که به‌وسیلهٔ یون و ژئون (۲۰۱۰) ارائه شده است، استفاده می‌شود [۳۱].

$$P(t) = P_h \frac{e^1 t}{t_r} \times e^{\left(-\frac{t}{t_r}\right)} \qquad (۸)$$

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 میلی‌ثانیه نمایش داده شده است.



شکل ۸. پالس ورودی به UDEC برای تحلیل دینامیکی

٦. کنترل پاسخ‌های دینامیکی

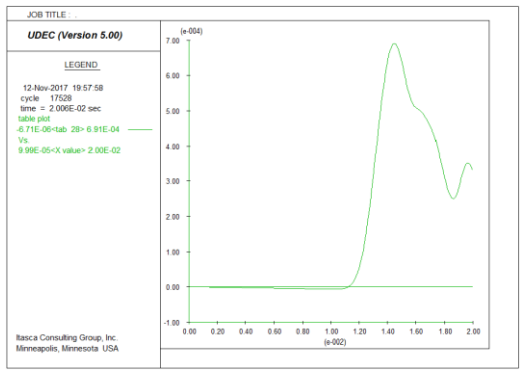
در انتها پاسخ‌های دینامیکی مدل در نقاط مختلف بررسی می‌شود. در این قسمت به بررسی خطوط تراز جابه‌جایی، تنش، اطلاعات زمان- جابه‌جایی نقاط بحرانی پرداخته می‌شود تا پایداری سیستم در حالت دینامیکی بررسی شود. بار حاصل از انفجار به‌صورت آنی وارد می‌شود و بر سنگ و محیط پیرامون رمپ اثر می‌کند. با اعمال بار، جابه‌جایی 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

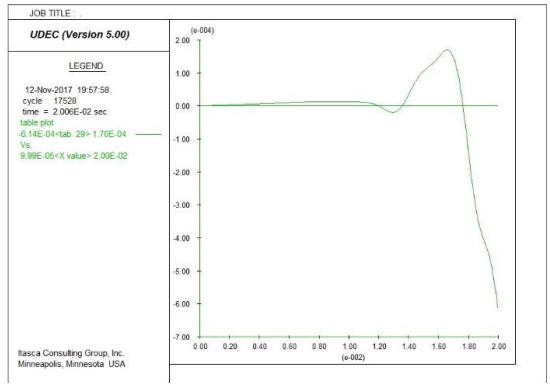
تحلیل دینامیکی جابه‌جایی‌های نشان داده شده فقط جابه‌جایی‌های ناشی از بار دینامیکی است. در شکل ۹ تا ۱۱ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی‌های افقی و قائم در نقاط شاهد پیرامون رمپ در راستای x و y پس از گذشت مدت زمان‌های مختلف از اعمال بار دینامیکی انفجار برای مدل بررسی شده نشان داده شده است. چنان‌که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی در نقطهٔ شاهد (۲/۱، ۰) در راستای x و y پس از مدت زمان ۱۵ میلی‌ثانیه از اعمال بار انفجار اتفاق افتاده و پس از آن با گذشت زمان میزان جابه‌جایی‌ها به علت کاهش فشار انفجارکاهش می‌یابد در ضمن چون جهت موج انفجاری در جهت x است بنابراین جابه‌جایی در جهت x بیش‌تر از جابه‌جایی در جهت Y است. هم‌چنین با توجه به شکل ۱۰ میزان جابه‌جایی‌های افقی و قائم (۲۰ میلی‌ثانیه پس از انفجار) در نقطهٔ شاهد (۰ ، ۲-) روی دیواره چپ رمپ بیش‌تر از نقطهٔ شاهد (۰ ، ۲) روی دیواره راست رمپ است اما در کل میزان این جابه‌جایی‌ها نسبت به حالت استاتیکی کم‌تر است. جهت حرکت دیواره چپ رمپ بعد از ۱۵ میلی‌ثانیه به‌دلیل کاهش فشار موج برعکس شده این کاهش جابه‌جایی ادامه می‌یابد تا در نهایت در حالتی که تحلیل دینامیکی ٤۰ میلی‌ثانیه ادامه داشته باشد این جابه‌جایی افقی مطابق شکل ۱۱ الف منفی می‌شود. هم‌چنین چنان‌که در شکل ۱۰ و ۱۱ الف مشاهده می‌شود زمانی موج به دیوارهٔ راست می‌رسد که موج در حالت تضعیف شدن است، به همین دلیل حداکثر جابه‌جایی در دیوارهٔ راست کم‌تر از دیوارهٔ چپ است. در شکل ۱۱ ب تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی‌های افقی در نقطهٔ شاهد در نظر گرفته شده روی تاج رمپ در مدت زمان ٤۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود پس از گذشت مدت زمان ۱۵ میلی‌ثانیه از اعمال بار انفجار مقدار جابه‌جایی کاهش و در نهایت مقدار این جابه‌جایی منفی می‌شود. در شکل ۱۲ تاریخچهٔ زمانی سرعت‌های افقی و قائم روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ در مدت زمان ۲۰ و ٤۰ میلی‌ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود سرعت بعد از حدود ۷ میلی‌ثانیه به دیوارهٔ چپ و سپس بعد از حدود ۱۵ میلی‌ثانیه به دیوارهٔ راست برخورد کرده است. هم‌چنین در دیوارهٔ چپ ابتدا سرعت مثبت 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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

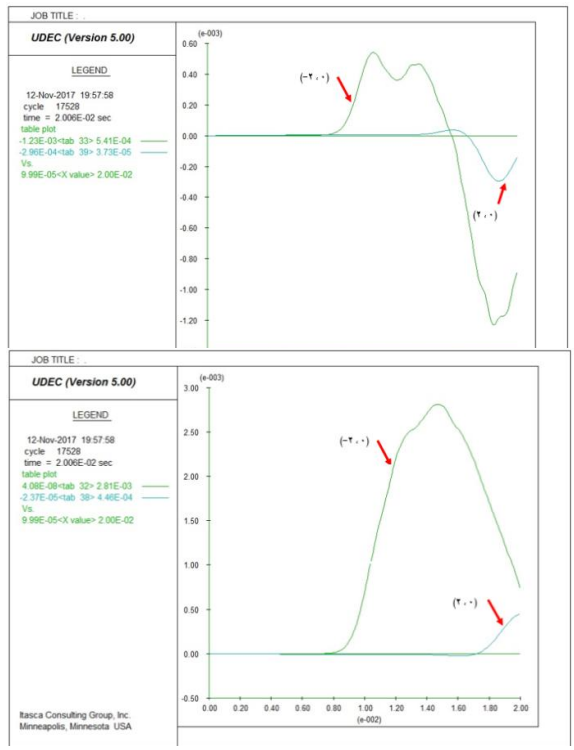
تراکمی که به دیوارهٔ چپ وارد شده است این دیواره به‌سمت راست حرکت می‌کند ولی میزان سرعت در دیوارهٔ راست کم‌تر است چون موج میرا شده است. هم‌چنین میزان تغییرات سرعت در سمت چپ دیواره رمپ بیش‌تر از سمت راست دیواره رمپ است که این مطلب نشان‌دهندهٔ آن است که با گذشت زمان و با افزایش فاصله از محل انفجار موج میرا می‌شود. در شکل ۱۳ پلات تنش در راستای x در مدت زمان ۲۰ و ٤۰ میلی‌ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار در اطراف رمپ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در مدت زمان ۲۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار، موج انفجار به‌صورت فشاری عمل کرده و پس از گذشت زمان به‌علت برگشت موج در اکثر نقاط اطراف رمپ تنش کششی ایجاد می‌کند. در شکل ١٤ پلات میزان بازشدگی درزه‌ها در پیرامون رمپ در مدت زمان ۲۰ و ٤۰ میلی‌ثانیه پس از اعمال بار انفجار نمایش داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود میزان باز شدگی درزه‌ها در مدت زمان ٤۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار انفجار به‌علت برگشت موج بیش‌تر از مدت زمان۲۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار انفجار است. هم‌چنین در شکل ۱۵ بزرگ‌نمایی بلوک‌ها پس از گذشت مدت زمان ٤۰ میلی‌ثانیه 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 ٤۰ میلی‌ثانیه می‌توان گفت، رمپ پایدار می‌ماند و در حالت دینامیکی نیز ریزشی در اطراف حفریه موردنظر انجام نمی‌گیرد. لازم به ذکر است بعد از انفجارکارگاه استخراج در ناحیهٔ رمپ بررسی شده، ناپایداری مشاهده نشده است که نشان‌دهندهٔ صحت مدل‌سازی عددی انجام شده است.



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

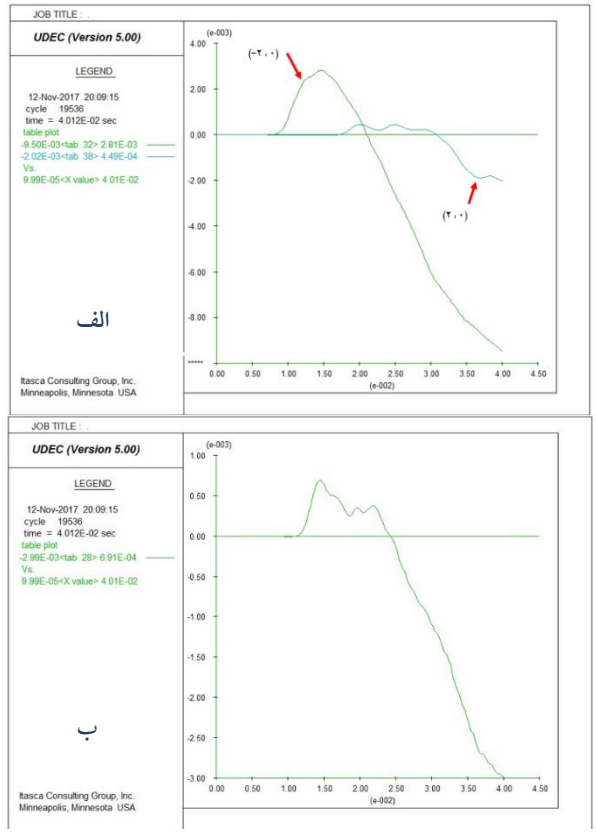


شکل ۹. تاریخچهٔ‌زمانی جابه‌جایی‌های الف) افقی، ب) قائم در نقطهٔ شاهد (۲/۱ ، ۰) روی سقف رمپ پس از گذشت مدت زمان ۲۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار

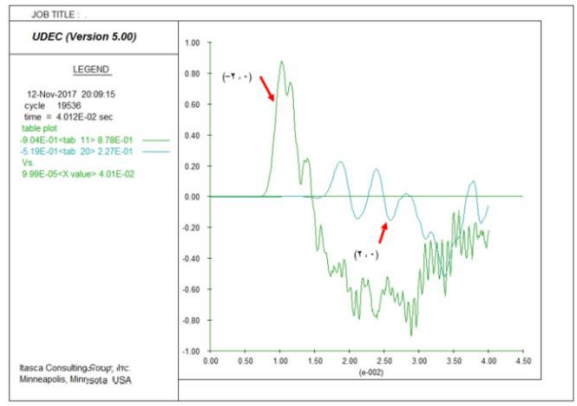


شکل ۱۰. تاریخچهٔ زمانی الف) جابه‌جایی‌های افقی، ب) قائم در نقاط شاهد (۰ ، ۲-) و (۰ ، ۲) روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ در مدت زمان ۲۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار دینامیکی

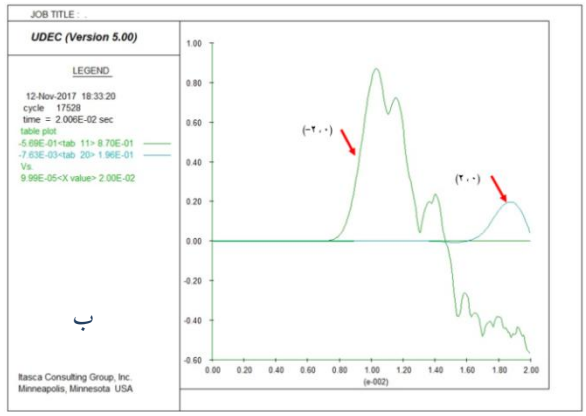
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]



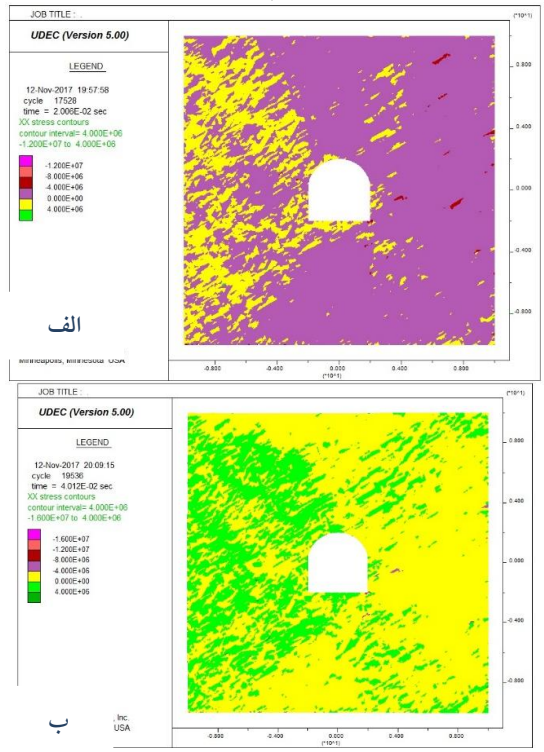
شکل ۱۱. تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی‌های افقی الف) در نقاط شاهد (۰ ، ۲-) و (۰ ، ۲) روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ، ب) در نقطه شاهد (۲/۱ ، ۰) روی سقف در مدت زمان ۴۰ میلی ثانیه از اعمال بار دینامیکی



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

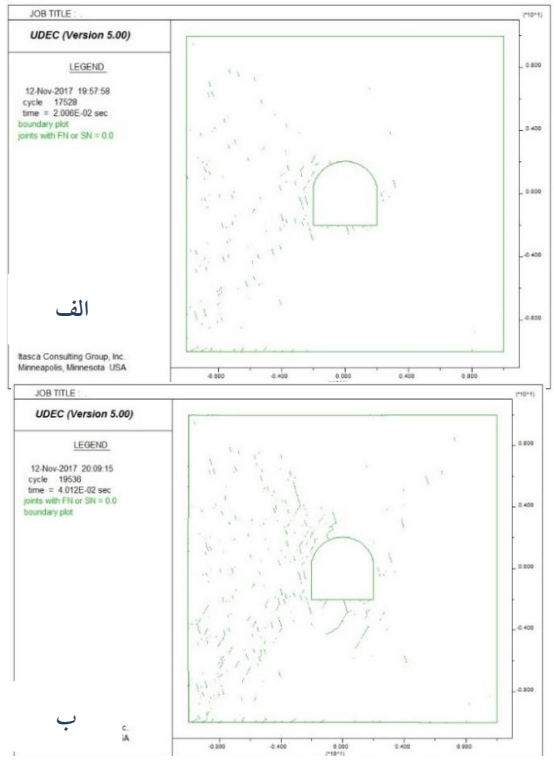


شکل ۱۲. تاریخچهٔ زمانی سرعت‌های افقی در نقاط شاهد (۰ ، ۲-) و (۰ ، ۲) روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ در مدت زمان الف) ۲۰ میلی‌ثانیه، ب) ٤٠ میلی‌ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار

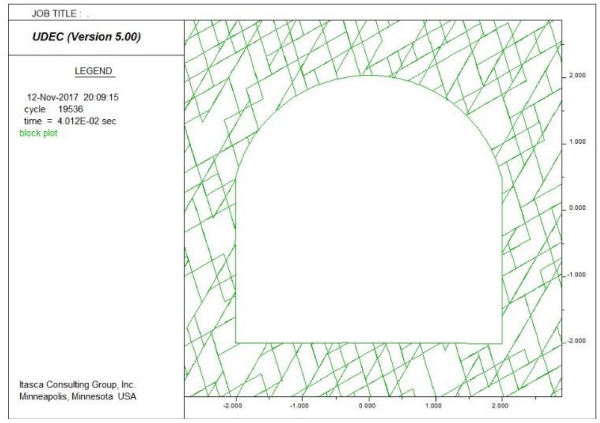


شکل ۱۳. کنتور تنش در راستای x (Sxx) در اطراف رمپ در مدت زمان الف)۲۰ میلی‌ثانیه، ب) ٤٠ میلی‌ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]



شکل ۱۴. پلات بازشدگی درزه‌ها الف) در ۲۰ میلی‌ثانیه، ب) در ۴۰ میلی‌ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار



شکل ۵:. بزرگ‌نمایی بلوک‌ها پس از گذشت مدت زمان ۴۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار دینامیکی انفجار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

۱. درحالت استاتیکی با توجه به پلات بزرگ‌نمایی بلوک‌ها پس از تعادل اولیه مشاهده می‌شود هیچ بلوکی به داخل رمپ ریزش نمی‌کند در نتیجه در حالت بارگذاری استاتیکی رمپ پایدار است.

۲. در حالت دینامیکی با توجه پلات بازشدگی درزه‌ها و اعمال بار انفجار در مدت زمان ۲۰ و ٤۰ میلی‌ثانیه، چنان‌که مشاهده می‌شود با گذشت زمان میزان بازشدگی و تغییر شکل در اطراف دیوارهٔ سمت چپ رمپ افزایش می‌یابد.

۳. با گذشت زمان برای یک نقطه معین سرعت ذره‌ای 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 ٤۰ میلی‌ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار، در مدت زمان ۲۰ میلی‌ثانیه از اعمال بار، موج انفجار به‌صورت فشاری عمل کرده و پس از گذشت زمان به‌علت برگشت موج در اکثر نقاط اطراف رمپ تنش کششی ایجاد می‌کند.

۵. با توجه به تاریخچهٔ زمانی سرعت‌های افقی و قائم روی دیوارهٔ سمت چپ و راست رمپ در مدت زمان ۲۰ و ٤۰ میلی‌ثانیه پس از اعمال بار دینامیکی انفجار، سرعت بعد از حدود ۷ میلی‌ثانیه به دیوارهٔ چپ و سپس بعد از حدود ۱۵ میلی‌ثانیه به دیوارهٔ راست برخورد کرده است. هم‌چنین در دیواره چپ ابتدا سرعت مثبت 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.

٦. 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 ٤۰ میلی‌ثانیه پس از انفجار می‌توان گفت بلوکی به داخل رمپ ریزش نکرده است در نتیجه در حالت بارگذاری دینامیکی نیز رمپ پایدار است و نصب سیستم نگه‌داری نیازی نیست.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

منابع

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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).
5. 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.
6. 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.
7. 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

8. 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.
9. 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.
10. Ngo T., Mendis P., Gupta A., Ramsay J., "Blast loading and blast effects on structures-An overview", EJSE special issue: loading on structures (2007).
11. 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).
12. Kumar, Matsagar V. A., Rao K. S., "Blast loading on semi buried structures with soil-structure interaction", IMPLAST 2010 conference, Rhode Island, USA (2010).
13. 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.
14. 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.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

16. Anirban De., "Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil", Comput Geotech, 43 (2012) 72–9.
17. Buonsantia M., Leonardi G., "3-D simulation of tunnel structures under blast loading", archives of civil and mechanical engineering, 13 (2013) 128-134.
18. 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 on Computational Methods in Tunnelling and Subsurface Engineering, Ruhr University Bochum (*2013*).
20. 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.
21. 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 خدمات فنی و مهندسی کانسار سرب و روی زه‌آباد" (۱۳۸۵).

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.5.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.339]

24. 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.
28. Cundall P. A., et al., "NESSI-Soil Structure Interaction Program for Dynamic and Static Problems", Norwegian Geotechnical Institute, Report 51508-9 (1980).
29. 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.
30. American society of civil engineers, "Protective design: Fundamentals of protectivedesign (non-unclear)", Department of the technical manual Tm5-855 (1965).
31. 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.