

مدل سازی فیزیکی به منظور بررسی اثر زمان تأخیر بر روی سست شدگی ناشی از انفجار

محمد عطایی^{*}، حسین علی اکبری بیدختی^۲

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۱۱

دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۱۰

چکیده

در این مقاله تأثیر فاصله زمانی تأخیر بر روی سست شدگی ناشی از انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور سه بلوک بتنی مشابه با ابعاد ۱۴*۳۰*۵۰ سانتی متر ساخته شده است و تعدادی آزمایش بر روی این بلوک‌ها طراحی و انجام شده است. در هر بلوک ۳ ردیف چال و در هر ردیف ۳ چال حفر شده است. قطر چال‌ها ۶ میلی متر و بارسنگ و فاصله ردیفی الگوی انفجار به ترتیب ۵۰ و ۷۵ میلی متر با نسبت S/B برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شده است. برای اندازه گیری سرعت موج فراصوت پیش و پس از انفجار، دوازده نقطه بر روی بلوک‌ها در چهار خط و سه ردیف پیاده شده است. بلوک‌ها با استفاده از فتیله انفجاری ۱۲ میلی گرم بر متر در سه فاصله زمانی تأخیر بین ردیفی متفاوت (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی ثانیه) آتشکاری شد. شاخص سست شدگی با ترکیب تفاوت مقدار سرعت موج فراصوتی در بلوک‌های سالم و آتشکاری شده تعریف شد. نتایج برای جهت‌های مختلف اندازه گیری مورد تجزیه و تحلیل و بحث قرار گرفت و نقشه خطوط هم‌تراز سست شدگی بلوک‌ها نیز ترسیم شد. نتیجه حاصل از این مطالعه نشان داد که افزایش فاصله تأخیر زمانی تأثیر متفاوتی بر روی مقدار و توزیع سست شدگی دارد.

کلید واژه‌ها: فاصله زمانی تأخیر، سست شدگی ناشی از انفجار، بلوک بتنی، سرعت موج فراصوت.

۱. استاد، دانشکده ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، h.baydokhti@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

یکی از عوامل که در طراحی الگوی انفجار استفاده می‌شود ترتیب و توالی شروع انفجار خرج‌ها است. به‌طور معمول توالی انفجار با تعیین زمان تأخیر و استفاده از چاشنی یا رله‌های تأخیری ایجاد می‌شود. زمان تأخیر مناسب باید با توجه به تأثیر تأخیر بر روی زمان عملکرد انفجار و اثرات ناشی از آن واقع‌بینانه انتخاب شود. جیمنو و همکاران (Jimeno et al., 1995)، زمان بهینه‌ی تأخیر بین چالی را وابسته به نوع سنگ می‌دانند. اگر چه هنوز تأثیر توالی انفجار و زمان تأخیر مناسب بر نتایج انفجار به‌طور کامل و روشن درک نشده است اما بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط کلون و همکاران (Calvin et al., 1997)، زمان‌های تأخیر کم باعث افزایش آسیب‌های ناشی از انفجار از جمله پرتاب سنگ و لرزش زمین می‌شود. در مقابل تأخیرهای زیاد باعث کاهش میزان عقب‌زدگی و لرزش زمین می‌شود. روستن (Rustan et al., 1998) آزمایش‌های میدانی برای تعیین زمان تأخیر بین چال‌های انفجاری با مقایسه دو سیستم فوری و تأخیری میلی‌ثانیه‌ای انجام داد. آزمایش‌ها نشان داد که حداکثر طول ترک‌های شعاعی ناشی از انفجار همزمان در توده‌سنگ باقیمانده $1/3 - 0/9$ بار کمتر از سیستم تأخیری میلی‌ثانیه‌ای است که فقط ۱ میلی‌ثانیه بین انفجار چال‌ها تأخیر وجود دارد. همچنین در ارتباط با تأثیر تأخیر بر نتایج انفجار، گیت و همکاران (Gate et al., 2005) بر این باورند که دلیل اصلی عقب‌زدگی، زمان تأخیر کم و یا افزایش تعداد ردیف‌ها است. مکزی (McKenzie., 2013) بیان می‌کند که با انتخاب زمان تأخیر مناسب می‌توان کنترل حداکثری بر روی اثرات انفجار داشت به‌طوری‌که استفاده از این راهکار برای به حداقل رساندن آسیب ناشی از انفجار اغلب از تغییر قطر چال‌های انفجاری مؤثرتر است. ما (Ma., 2015) با آزمایش انفجار تأخیری چهار نوع مدل بتنی، اثر آسیب ناشی از انفجار برش‌های چاه را بررسی کرد. برای این منظور سرعت فراسوت قبل و بعد از انفجار در مدل‌های بتنی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میزان آسیب به تدریج از برش‌های

دایره‌ای در مرکز به سمت برش‌های دایره‌ای بیرونی کاهش می‌یابد. با تجزیه و تحلیل اثر بخش برش و ناحیه آسیب ناشی از انفجار پیشنهاد شد که برای کاهش آسیب‌دیدگی و اطمینان از اثربخشی چال‌های برش، دو دایره داخلی بطور همزمان انفجار شده و دایره بیرونی با ۲۵ میلی‌ثانیه تأخیر انفجار شود. در ارتباط با تأثیر زمان تأخیر بر روی خردایش به‌عنوان مهم‌ترین اثر نابرجای آتشکاری، پژوهش‌های زیادی انجام شده است. نتیجه کلی و مشترک حاصل از این مجموعه مطالعات نشان می‌دهد با صرف کمترین هزینه و ایجاد زمان تأخیر مناسب امکان بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در خردایش وجود دارد. در ادامه برخی از این پژوهش‌ها شرح داده شده است. کاتسابانیس و همکاران (Katsabanis et al., 2006) آزمایش‌های انفجاری تأخیری کوچک مقیاس بر روی بلوک‌های گرانیتی انجام دادند. با آنالیز سرنندی خرده‌های انفجاری دریافتند که اندازه متوسط خردایش برای انفجار فوری درشت است. با افزایش زمان تأخیر انفجارها این اندازه کاهش می‌یابد تا آنجا که به حداقل برسد. پس از آن اگر تأخیر بیشتر شود اندازه متوسط دوباره شروع به افزایش می‌کند. همین روند برای D80 نیز مشاهده شد. بلیر (Blair., 2009) با تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌های کاتساباتیس نتیجه گرفت که هیچ روند آماری قابل‌توجهی بین زمان تأخیر و خردایش وجود ندارد. همچنین ادعای درشت‌تر بودن قطعات خرد شده در اثر انفجار آبی را با توجه به داده‌های موجود نمی‌توان تأیید کرد. در واقع در یک طیف گسترده از زمان‌های تأخیر، هیچ تغییری در دانه‌بندی مشاهده نشده است. کیم (Kim., 2010) با انجام آزمایش‌های کوچک مقیاس انفجاری بر روی چند نمونه از انواع گرانیت، خردایش و قابلیت آسیابانی ناشی از انفجار تأخیری خیلی کوتاه را بررسی کرد. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش زمان تأخیر ابعاد خرده‌های انفجاری کوچک‌تر می‌شود. انفجارهای تأخیری متفاوت بر روی برخی از نمونه‌های گرانیتی تأثیر منفی و بر روی برخی دیگر تأثیر ناچیزی دارد. خرده‌های انفجارهای تأخیری در مقایسه با خرده‌های حاصل از انفجار

فوری بطور قابل توجهی ضعیف‌تر بودند. در این مطالعه زمان تأخیر مناسب به دست نیامد. جانسون و اخترلونی (Johansson and Ouchterlony., 2012) در پژوهشکده انفجار سوئد دانشگاه لولئا برای بررسی اثر تأخیرهای کوتاه بر روی خردایش ناشی از موج ضربه انفجار، یک مجموعه از آزمایش‌های انفجاری کوچک مقیاس طراحی و اجرا کردند. هر بلوک دارای دو ردیف چال بودند که ردیف دوم با تأخیر آتشکاری شد. نتایج نشان داد که متوسط اندازه خردایش برای تأخیرهای کوتاه‌تر در مقایسه با تأخیرهای بلندتر ۲۰٪ کاهش می‌یابد. در انفجار ردیف اول، پراکندگی ابعاد خرده‌های انفجاری بیشتر و اندازه قطعات درشت‌تر بود. در انفجار ردیف دوم پراکندگی ابعادی کمتر و خردایش نرم‌تر بود. امید (Omidi., 2015) به بررسی اثر تأخیر بر روی خردایش و آسیب ناشی از انفجار تأخیری پرداخت. برای این منظور یک مجموعه از بلوک‌های کوچک مقیاس ساخته شد. بلوک‌ها با تأخیرهای کوتاه و نسبتاً طولانی آتشکاری شدند. خرده‌های انفجاری حاصل جمع‌آوری و بر روی آن‌ها آنالیز سرنندی انجام شد. بطور کلی ابعاد خردایش حاصل از انفجار با تأخیرهای کوتاه نسبت به ابعاد حاصل از تأخیرهای طولانی، کوچک‌تر و مقدار عقب‌زدگی آن نیز حداقل بود. انفجار با تأخیرهای نسبتاً طولانی باعث خردایش بهتر ولی آسیب بیشتر به بلوک‌های پشتی شده است. در سال ۲۰۱۵ مطالعات انفجاری کوچک مقیاس بر روی نمونه‌های بلوکی توسط کاتسابانیس و امید انجام شد. هر بلوک دارای یک ردیف پنج چالی بود. نتایج نشان داد که بخش ریزدانه‌ی خردایش با تغییرات زمان تأخیر بجز تأخیرهای خیلی کوتاه، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و در مقابل، زمان بهینه تأخیر بخش درشت دانه‌ی خردایش را بخوبی و بطور کامل تحت تأثیر قرار می‌دهد (Calvin et al., 1997). در سال ۲۰۱۵ مطالعه میدانی توسط دانشگاه علم و صنعت میسوری در معدن سنگ ساختمانی گرانیت انجام شد. ارتفاع پله‌های این معدن ۲۵ متر است. نتایج نشان داد که با افزایش زمان تأخیر علاوه بر پراکندگی قابل توجه داده‌های حاصل از آنالیز سرنندی

خرده‌های انفجاری، اندازه متوسط خردایش دارای روند صعودی است (Katsabanis and Omidi., 2015). نیکلاس (Nikolaos., 2016) مجموعه‌ای از آزمایش‌های انفجاری کوچک مقیاس بر روی بلوک‌های سیمانی و گرانیتی با هدف دستیابی به خردایش بهینه ناشی از زمان تأخیر انجام داد. در این آزمایش‌ها از ابزار کرنش‌سنج، حسگر پیزوالکتریک و دوربین سرعت بالا برای درک بهتر فرایند انفجار استفاده شده است. در این آزمایش‌ها داده‌های حاصل از کرنش‌سنج و حسگر پیزوالکتریک مبهم بودند. با تجزیه و تحلیل آنالیز سرنندی خرده‌های انفجاری مشخص شد که در این مجموعه بازه‌ی تأخیر بهینه $\frac{3}{2}$ تا $\frac{8}{8}$ میلی‌ثانیه بر متر بارسنگ است. کیو و همکاران (Qiu et al., 2018)، اندرکنش امواج ضربه‌ای ناشی از انفجار تأخیری کم با یک سطح آزاد را با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق برای مطالعه تأثیر زمان تأخیر بر موج ضربه، امواج ناشی از دو چال انفجاری با تأخیرهای مختلف، با یک چال انفجاری مقایسه شده است. نتایج عددی نشان داد که وقوع موج ضربه قوی برای انفجار با یک سطح آزاد محدود به شرایطی است که با توجه به دقت تأخیرهای انفجاری موجود، دستیابی به آن دشوار خواهد بود. بنابراین، بهبود توزیع ابعادی خردایش از طریق برهم‌کنش موج ضربه ناشی از انفجار تأخیری کم در عمل تا حدودی زیادی غیرواقعی به نظر می‌رسد. ساساوکا و همکاران (Sasaoka et al., 2019) به بررسی تأثیر زمان تأخیر و روش شروع انفجار بر کنترل اندازه خردایش ناشی از انفجار پله‌ای در معادن روباز پرداخته‌اند. در این راستا دو طرح انفجاری اجرا شده است: (آ) ابتکاری، انفجار از وسط ردیف چال انفجاری شروع و در دو جهت متقابل به سمت کناره‌های ردیف ادامه می‌یابد (ب) معمول، انفجار از یک سو آغاز و به دیگر سوی ردیف ختم می‌شود. نتایج خردایش نشان داد که شروع آتشباری از وسط در مقایسه با حالت معمول منجر به خردایش یکنواخت‌تر می‌شود. هاشمی و کاتسابانیس (Hashemi and Katsabanis., 2020) با استفاده از مدل‌سازی عددی به مطالعه تأثیر تأخیر بر خردایش و آسیب ناشی از

بلوک‌های برجا به واسطه‌ی ایجاد و یا گسترش ریزترک‌های ناشی از انفجار، دچار تغییرات برگشت‌ناپذیر پنهان شده، به‌عنوان محدوده سست‌شدگی و مقدار تغییرات به‌عنوان شدت یا درجه سست‌شدگی پیشنهاد شده است. عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش محدوده سست‌شدگی و شدت آن، دو گروه عاملی مؤثر در طراحی الگوی انفجار، عوامل قابل کنترل (هندسه انفجار، مشخصات ماده منفجره) و غیرقابل کنترل (مشخصات ماده و توده سنگ) با درجات متفاوت تأثیرگذاری می‌باشند. وجود ناحیه سست‌شدگی به‌عنوان یک پیامد بر جای مثبت در ارزیابی جامع پیامدهای انفجار، طراحی الگوی مناسب و تعدیل و اصلاح قابلیت حفاری و انفجار، بر روی هزینه و ایمنی عملیات معدن‌کاری مؤثر است. بنابراین لازم است با انجام مطالعات جامع و کافی با هدف شناسایی، طبقه‌بندی و کمی‌سازی ناحیه سست‌شدگی، آگاهی و دانش مهندسان انفجار از رفتار این ناحیه افزایش یابد. در پژوهش حاضر با ساخت و انفجار تأخیری بلوک‌های بتنی و استفاده از آزمون فراصوت و سرعت موج عبوری، به بررسی اثر تأخیر بر روی سست‌شدگی پرداخته شده است.

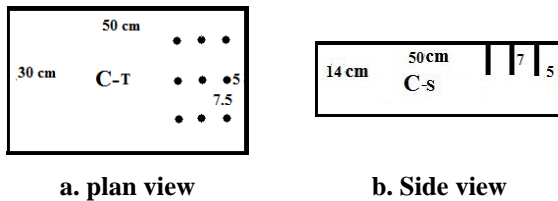
۲. مواد و روش مطالعه

در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل‌سازی فیزیکی و آزمون فراصوت، اثر تأخیر بین‌ردیفی در انفجار بر روی سست‌شدگی بلوک‌های بتنی با طراحی و اجرای سه زمان متفاوت تأخیر بررسی شده است. در این راستا و برای دستیابی به مقادیر سست‌شدگی و تجزیه و تحلیل آماری آن، گام‌های اجرایی در تحقیق پیش رو شامل موارد زیر است. روندنمای مراحل تحقیق نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

- ساخت بلوک‌های بتنی
- آزمایش و برداشت‌های پیش از انفجار
- آتشکاری نمونه‌ها
- برداشت‌های پس‌انفجار و محاسبه مقادیر سست‌شدگی

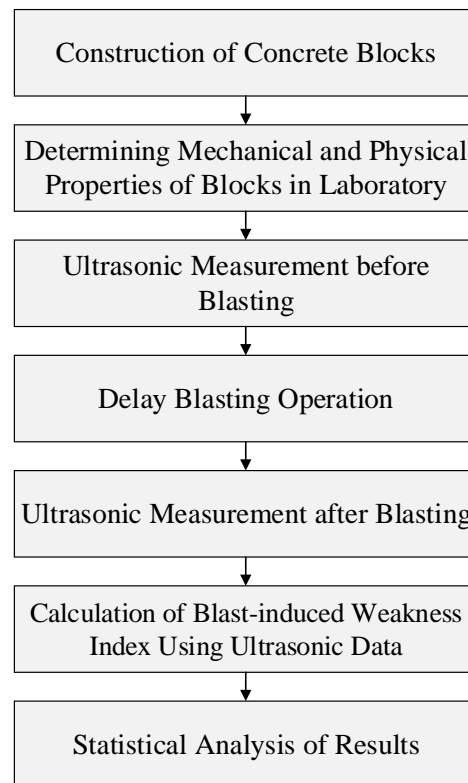
انفجار پرداخته‌اند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که تأخیر، با فراهم آوردن زمان کافی برای رشد ترک‌ها و همچنین تأثیر بر چگونگی تعامل امواج ضربه‌ای ناشی از انفجار بر روی آسیب و خردایش نقش قابل‌توجهی را بر عهده دارد. اکثر پژوهش‌های انفجاری تأخیری در دهه‌ی اخیر به بررسی اثر تأخیر بر روی خردایش و دانه‌بندی اختصاص داده شده است. با وجود تلاش بسیاری از محققان، انتخاب تأخیر برای بهبود یا بهینه‌سازی خردایش همچنان یک موضوع بحث‌برانگیز است. این مطالعه دراز مدت و زیاد باعث کم‌کاری پیرامون تأثیر این عامل بر روی دیگر نتایج انفجار مطالعات کمی انجام شده است. در حالی که هدف اصلی از اجرای انفجارهای تأخیری، کاهش آسیب‌های ناشی از انفجار از جمله لرزش زمین، عقب‌زدگی و ناپایداری دیواره‌ها در معادن است. به بیان دیگر، اثر تأخیر بر کاهش اثرات منفی ذکر شده نسبت به سایر پیامدهای انفجار از جمله خردایش بیشتر و محسوس‌تر است. از طرفی سهم انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره در ایجاد پیامدهای نامطلوب مانند لرزش زمین و هوا، پرتاب سنگ و عقب‌زدگی به مراتب بیش از اثرات مفید مانند خردایش و جابجایی سنگ است و این مقدار به بیش از ۸۰٪ انرژی منتقل شده به سنگ می‌رسد و تنها حدود ۱۵ درصد آن صرف خردایش سنگ می‌شود. انرژی انفجار علاوه بر پیامدهای بیان‌شده، همزمان باعث تضعیف توده‌سنگ باقیمانده نیز می‌شود. به عبارتی دیگر، محدوده نفوذ انفجار به بلوک آتشکاری شده (بلوک هدف) ختم نمی‌شود. انرژی انفجار ضمن خردایش و جابجایی توده سنگ بلوک هدف، همزمان بلوک‌های برجا (توده سنگ باقیمانده) را نیز در محدوده نفوذ خود، تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس می‌توان اثرات انفجار را به دو گروه کلی برجا و نابرجا تقسیم کرد. اثرات نابرجا که پس از حمل کپه انفجاری، تأثیر آن بر منطقه انفجار و محدوده‌ی معدنکاری حذف و یا به واحد خردایش منتقل می‌شود و در مقابل اثرات برجا که با تأثیرگذاری بر بلوک‌های اطراف محدوده انفجار باقی می‌ماند. محدوده‌ی آن از توده سنگ باقیمانده پس انفجار که در آن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

۲-۲. شبکه‌بندی بلوک‌ها، برداشت فراصوت پیش از انفجار و انجام آزمایش‌های مکانیکی



شکل ۲. طرح‌واره بلوک‌ها

روش فراصوتی به عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب، کم هزینه، آسان، سریع و با دقتی قابل قبول برای تعیین ویژگی‌های سنگ می‌توان بهره جست. در این روش سرعت موج با تقسیم طول نمونه بر زمان عبور موج اندازه‌گیری شده در نمونه (که بین مبدل‌های فرستنده و گیرنده قرار گرفته است) به دست می‌آید. این روش بیشتر برای سنگ‌هایی کاربرد دارد که تفاوت زیادی بین ماده و توده سنگ وجود ندارد. قبل از انفجار برای اندازه‌گیری زمان موج عبوری بر روی هر یک از بلوک‌ها، شبکه یک‌اندازه با ساختار چهار خطی (۱،۲،۳،۴) و سه ردیفی (دو ردیف کناری و یک ردیف میانی) ترسیم شد. خطوط شبکه به موازات خط آتش است و شماره خطوط بیانگر فاصله از خط آتش است بطوری‌که شماره ۱ کم‌ترین و شماره ۴ بیش‌ترین فاصله از خط آتش را دارد. ردیف‌ها در جهت عمود بر خط آتش است. دو ردیف کناری در راستای چال‌های کناری و ردیف میانی با چال وسط هم راستا است. آزمون فراصوت بر روی گره‌های شبکه انجام و میانگین زمان موج عبوری برای هر یک از بلوک‌ها محاسبه شد. این زمان در تمامی بلوک‌ها، برابر به دست آمد که گواه کیفیت یکسان مدل‌ها است. تصویر شبکه‌بندی در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات ایستا و پویای مدل (مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، چگالی) نیز پس از استانداردسازی و تعمیم داده‌های حاصل از آزمایش‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های معرف تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش مکانیکی و فراصوتی مدل در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱. روندنمای مراحل کار و روش تحقیق

۱-۲. ساخت مدل فیزیکی

در این تحقیق، سه بلوک بتنی (C1, C2, C3) با طرح اختلاط و شرایط بتن‌ریزی و نگهداری یکسان ساخته شدند. در هر بلوک بر اساس الگوی طراحی شده سه ردیف سه چالی حفاری شد. ابعاد تمامی بلوک‌ها با هم‌دیگر برابر و الگوی چال‌ها نیز در هر سه مدل همانند است. مشخصات ابعادی بلوک‌ها و الگوی چال‌ها در جدول ۱ آمده است. در شکل ۲ طرح‌واره بلوک‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱. ابعاد بلوک‌ها و الگوی چال‌ها

Blocks	Dimension (cm)	Burden (cm)	Spacing (cm)	Hole length (cm)	Hole diameter (cm)
C1, C2, C3	50 × 30 × 14	5	7.5	7	0.6

خرجگذاری شدند. در هر بلوک، چال‌های هر ردیف به صورت فوری و ردیف‌ها با تأخیر یکسان نسبت به یکدیگر آتشکاری شدند.

زمان تأخیر بین ردیفی در بلوک C1 برابر ۲۵ میلی ثانیه، در بلوک C2 برابر ۵۰ میلی ثانیه و در بلوک C3 برابر ۷۵ میلی ثانیه بوده است. در شکل ۴ بلوک‌ها پس از خرجگذاری و آتشکاری مشاهده می‌شوند.

۴-۲. برداشت فراصوت پس‌انفجار

پس از انفجار، نقاط شبکه بر روی لاشه‌های بلوک دوباره برداشت فراصوتی شد. در این مرحله تمامی نقاط شبکه برداشت در همه‌ی بلوک‌ها نسبت به آزمون فراصوت پاسخ مثبت دادند. شکل ۵ نشان دهنده شبکه‌ی برداشت فراصوتی بلوک‌ها پس از انفجار است. در ادامه با به‌کارگیری داده‌های

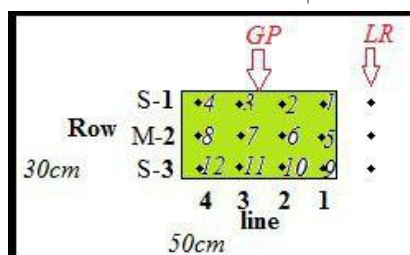
جدول ۲. نتایج آزمایش مکانیکی و فراصوتی مدل

Density (Kg/m ³)	Tensile strength (MPa)	UCS (MPa)	Ultrasonic wave velocity (m/s)
2150	2.8	26	4600

۳-۲. آتشکاری بلوک‌ها

پس از انجام آزمایش‌های مکانیکی و فراصوتی، بلوک‌ها برای آتشکاری آماده شدند. برای این منظور، طول کامل چال‌ها با

فتیله انفجاری ۱۲ گرم بر متر و قطر ۵/۸ میلی‌متر



شکل ۳. شبکه برداشت فراصوتی مدل



a. block C1



b. block C2



c. block C3

شکل ۴. نمای بلوک‌ها پس از خرجگذاری و آتشکاری

۳. تجزیه و تحلیل نتایج

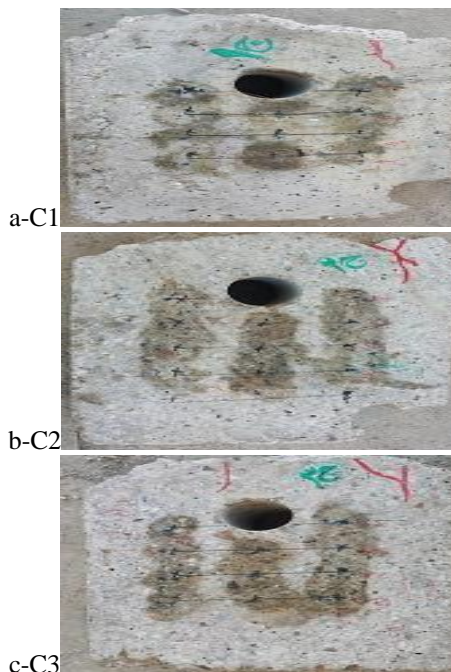
برای بررسی اثر تأخیر بر روی سست‌شدگی ناشی از انفجار، مقادیر و توزیع شبکه‌ای سست‌شدگی و نرخ تغییرات آن در جهت موازی و عمود بر خط انفجار و همچنین نقشه خطوط هم‌تراز سست‌شدگی سه بلوک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۱-۳. توسعه میزان سست‌شدگی بلوک C1 (تأخیر ۲۵

میلی‌ثانیه)

در شکل ۶ روند طولی و عرضی سست‌شدگی بلوک C1 نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود بزرگ‌ترین مقادیر سست‌شدگی مربوط به خط ۱ با کم‌ترین فاصله از ردیف انفجاری و کوچک‌ترین مقادیر مربوط به خط ۴ با بیش‌ترین فاصله از خط آتش است. حداکثر میزان سست‌شدگی برابر ۲۱/۲۶٪ در خط یک، ردیف کناری ۱ و حداقل آن برابر ۶/۸۳٪ در خط ۴، ردیف کناری ۳ اتفاق افتاده است؛ نیمی از نقاط شبکه برداشت (نقاط روی خطوط ۳ و ۴) دارای شدت سست‌شدگی کمتر از ۱۶٪ است (W50=16%). در اکثر خطوط، مقادیر سست‌شدگی در ردیف کناری ۱ بیشتر از دیگر ردیف‌ها است؛ در خط ۱ و ۴ مقادیر سست‌شدگی ردیف‌های کناری ۳ و میانی و در خط ۳ مقادیر ردیف‌های کناری ۱ و میانی به همدیگر نزدیک‌اند اما در خط ۲ مقادیر ردیف‌ها از یکدیگر متمایزند؛ روند تغییرات سست‌شدگی در ردیف‌ها تقریباً مشابه یکدیگرند در حالی که روند تغییرات در خطوط با یکدیگر متفاوت‌اند؛ مقادیر سست‌شدگی در خط ۴ در مقایسه با دیگر خطوط به طور قابل‌توجهی کاهش یافته است بطوری‌که اختلاف سست‌شدگی طولی این خط در مقایسه با خطوط ۲ و ۳ در حدود ۱/۵ تا ۳ برابر است؛ مقادیر سست‌شدگی در ردیف میانی بلوک C1 با تأخیر ۲۵ میلی‌ثانیه‌ای تقریباً حد وسط ردیف‌های کناری است.

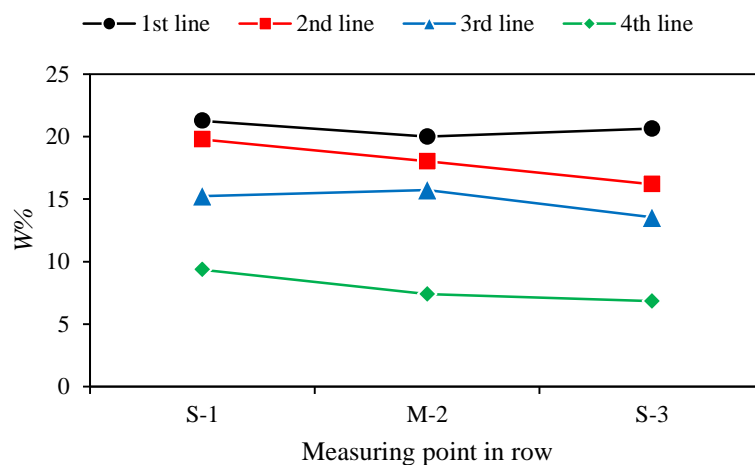
فراصوتی برداشت‌شده پیش و پس از انفجار و کسر نسبت بین زمان موج عبوری اولیه (t_0) به زمان موج عبوری ثانویه (t_s) از مقدار واحد مطابق رابطه ۴، مقدار شاخص سست‌شدگی (W) بر حسب درصد در نقاط پاسخ تعیین شد. رابطه $W(\%) = 1 - t_0/t_s$ نشانگر نرخ کاهش زمان موج عبوری فراصوت است که از آن به عنوان شاخص سست‌شدگی استفاده شده است. مقادیر شاخص سست‌شدگی در جدول ۳ آمده است.



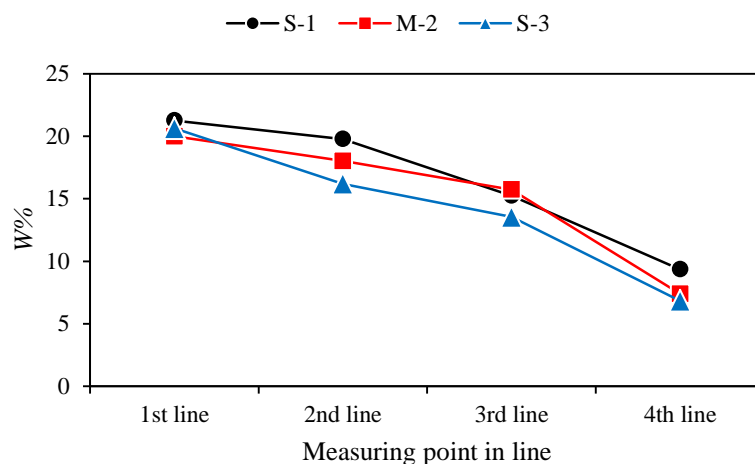
شکل ۵. برداشت فراصوتی پس‌انفجار نقاط شبکه‌بندی

جدول ۳. مقادیر شاخص سست‌شدگی پس‌انفجار بلوک‌ها

Block	Line	Row		
		S-1	M-2	S-3
C1	1	21.26	20	20.63
	2	19.79	18.03	16.20
	3	15.25	15.73	16.54
	4	9.37	7.41	6.83
C2	1	16.90	14.53	16.43
	2	15.73	12.28	15.25
	3	15.73	11.50	14.04
	4	8.81	7.12	7.69
C3	1	15.25	30.07	13.29
	2	12.02	27.36	11.50
	3	12.28	20.84	10.45
	4	7.41	12.02	7.21



a. W% in the line direction



b. W% in the row direction

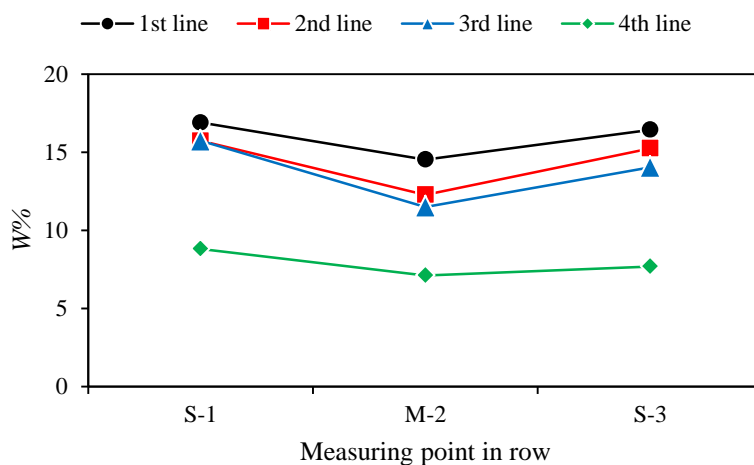
شکل ۶. روند سست شدگی بلوک C1

ردیف‌های کناری به هم نزدیک‌ترند؛ روند تغییرات سست-شدگی در ردیف‌ها مشابه یکدیگر است؛ روند تغییرات در خطوط نیز مشابه همدیگر و ۷- شکل است هر چند که روند تغییرات در خط ۴ بسیار نرم‌تر از دیگر خطوط است. مقادیر سست‌شدگی در خط ۴ در مقایسه با دیگر خطوط به طور قابل توجهی کاهش یافته است بطوری‌که اختلاف سست-شدگی طولی این خط با خطوط ۲ و ۳ در حدود ۵ برابر است؛ مقادیر سست‌شدگی در ردیف میانی بلوک با تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه‌ای کمتر از مقادیر سست‌شدگی ردیف‌های کناری است.

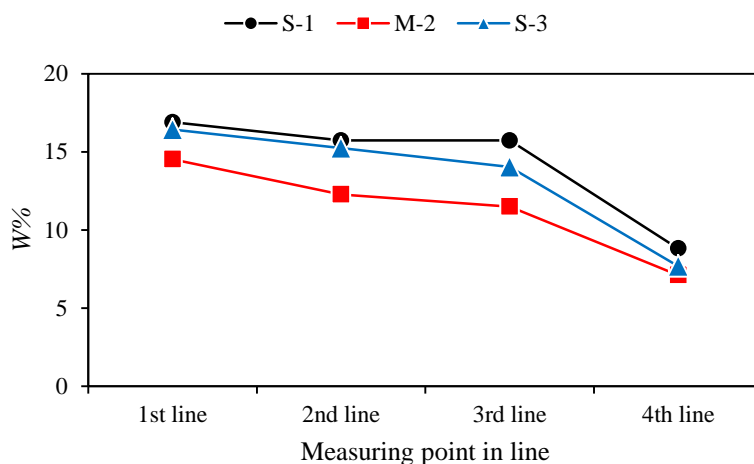
۲-۳. توسعه میزان سست‌شدگی بلوک C2 (تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه)

میلی‌ثانیه)

در شکل ۷ روند طولی و عرضی سست‌شدگی در بلوک C2 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر میزان سست‌شدگی ۱۶/۹٪ در خط ۱، ردیف کناری ۱ و کمترین آن ۷/۱۲٪ در خط ۴، ردیف میانی اتفاق افتاده است؛ نیمی از نقاط شبکه برداشت (نقاط روی خط ۴، ردیف میانی در خطوط ۳ و ۲ و ردیف کناری ۳ در خط ۳) دارای شدت سست‌شدگی کمتر از ۱۴٪ است (W50=14%). در تمامی خطوط، مقادیر سست‌شدگی در ردیف کناری ۱ بیشتر از دیگر ردیف‌ها است؛ در اکثر خطوط مقادیر سست‌شدگی



a. W% in the line direction



b. W% in the row direction

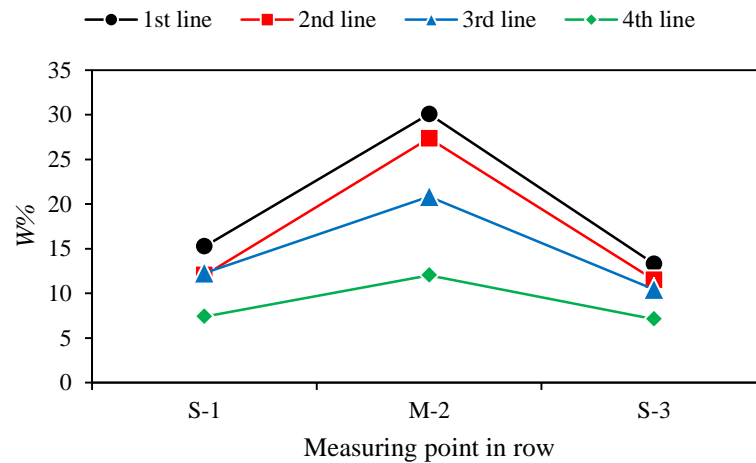
شکل ۷. روند سست‌شدگی بلوک C2

ردیف‌های کناری به همدیگر نزدیک‌ترند؛ روند تغییرات سست‌شدگی در ردیف‌های کناری مشابه یکدیگر است در حالی که این روند در ردیف میانی دارای شیب تند و بدون افت و خیز است؛ روند تغییرات در خطوط نیز مشابه همدیگر و ۸-شکل است هر چند که روند تغییرات در خط ۴ بسیار نرم‌تر از دیگر خطوط است. مقادیر سست‌شدگی نیز در خط ۴ در مقایسه با دیگر خطوط به طور قابل توجهی کاهش یافته است بطوریکه اختلاف سست‌شدگی طولی این خط در ردیف‌های کناری با خطوط ۲ و ۳ در حدود ۱/۵ تا ۲ برابر است؛ مقادیر سست‌شدگی در ردیف میانی بلوک با تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه‌ای با اختلاف قابل توجهی بزرگ‌تر از مقادیر سست‌شدگی ردیف‌های کناری است.

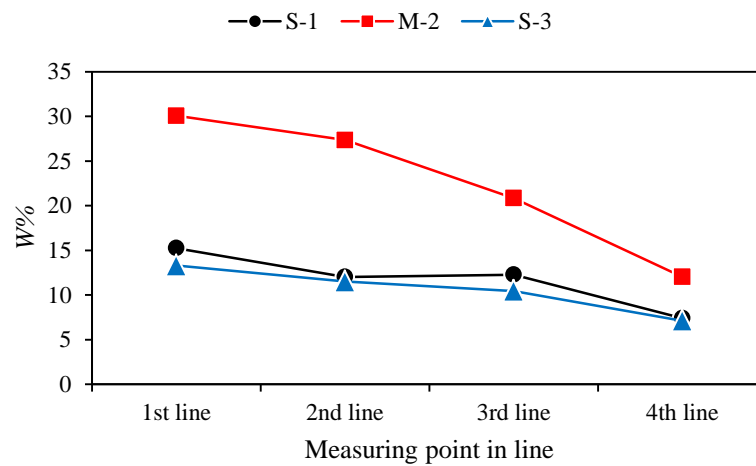
۳-۳. توسعه میزان سست‌شدگی بلوک C3 (تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه)

میلی‌ثانیه)

در شکل ۸ روند طولی و عرضی سست‌شدگی در بلوک C3 نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در بلوک C3 بزرگ‌ترین مقادیر سست‌شدگی مربوط به ردیف میانی است. حداکثر میزان سست‌شدگی ۳۰/۱٪ در ردیف میانی خط ۱ و کم‌ترین آن ۷/۱۲٪ در خط ۴، ردیف کناری ۳ اتفاق افتاده است؛ نیمی از نقاط شبکه برداشت (نقاط روی خط ۴، ردیف‌های کناری در خطوط ۲ و ۳) دارای شدت سست‌شدگی کمتر از ۱۲٪ است (W50=12%). در تمامی خطوط، مقادیر سست‌شدگی در ردیف کناری ۱ بیشتر از دیگر ردیف‌ها است؛ در تمامی خطوط مقادیر سست‌شدگی



a. W% in the row direction



b. W% in the line direction

شکل ۸: روند سست شدگی بلوک C3

متناظر سست شدگی در ردیف‌های کناری در خطوط مقدم (۱) و (۲) در بلوک C1 نسبت به دو بلوک دیگر بیشتر است؛ در خط ۳ این مقادیر در بلوک‌های C1 و C2 تقریباً با هم برابرند؛ در خط ۴ مقادیر متناظر هر سه بلوک نزدیک به هم‌دیگرند به عبارتی دیگر با فاصله گرفتن از خط انفجار، میزان اختلاف سست شدگی بلوک‌ها در ردیف‌های کناری کاهش می‌یابد همچنین بیشترین مقدار سست شدگی در ردیف‌های کناری در بلوک C1 و کم‌ترین آن در بلوک C3 اندازه‌گیری شده است. روند سست شدگی در ردیف‌های کناری بلوک C2 و C3 مشابه یکدیگر است. نرخ تغییرات کلی در بلوک C1 نسبت به

۳-۴. مقایسه توسعه سست شدگی مجموعه بلوک‌ها

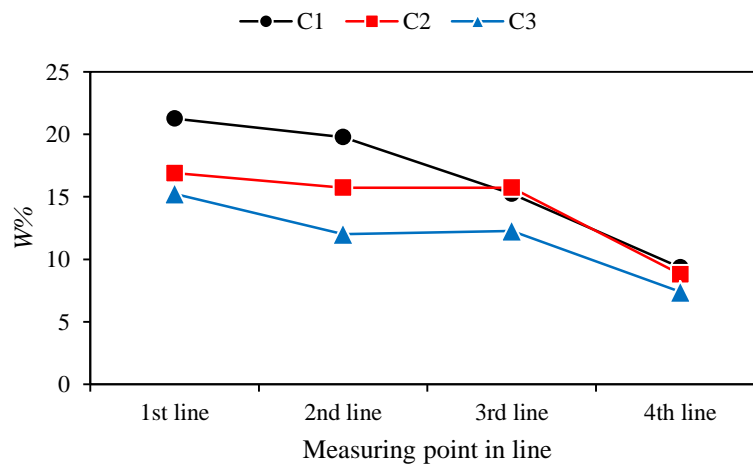
در ادامه مقادیر متناظر سست شدگی بلوک‌ها در دو بخش ردیف‌های کناری و ردیف میانی با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نمای کلی سست شدگی در هر یک از بلوک‌ها به کمک نقشه خطوط هم‌تراز نمایش و توضیح داده شده است.

۳-۴-۱. سست شدگی ردیف‌های کناری

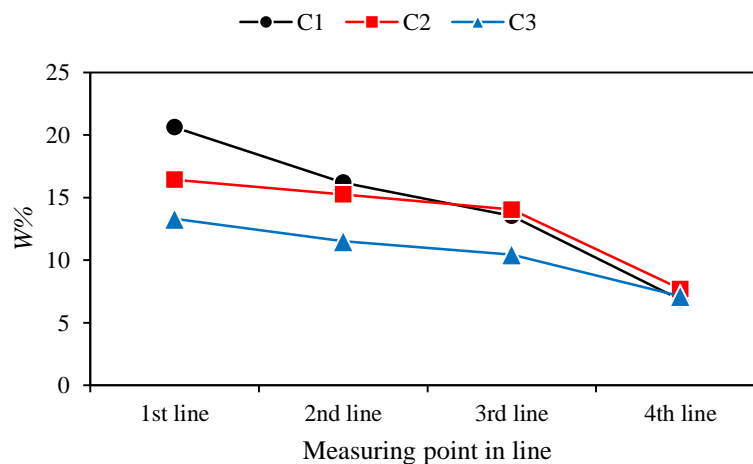
در شکل ۹ روند سست شدگی طولی ردیف‌های کناری بلوک‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقدار

بیشتر از ردیف کنار-۳ است. این اختلاف می‌تواند بیانگر اثر تجمعی سست‌شدگی ناشی از انفجار چال‌های هر ردیف در جهت عرضی و در انتهای خط آتش باشد.

دو بلوک دیگر تندتر است. بطور کلی در تمامی بلوک‌ها اختلاف سست‌شدگی ردیف‌های کناری نسبت به یکدیگر مشابه است هر چند که شدت سست‌شدگی در ردیف کنار-۱



a. W% in S-1 row



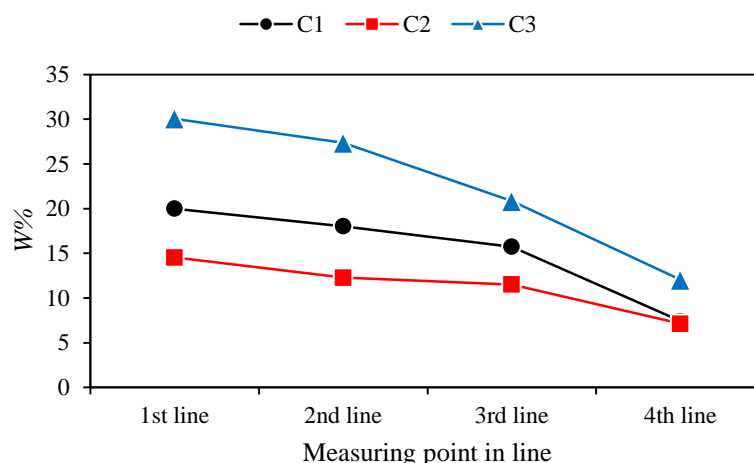
b. W% in S-3 row

شکل ۹. روند سست‌شدگی ردیف‌های کناری بلوک‌ها

۳-۴-۲. سست‌شدگی ردیف میانی

برداشت شده است. با بزرگ‌تر شدن شماره خطوط شبکه برداشت از میزان اختلاف سست‌شدگی بلوک‌ها در ردیف میانی کاسته می‌شود. در ردیف میانی روند سست‌شدگی بلوک C1 مشابه بلوک C2 است.

در شکل ۱۰ روند سست‌شدگی ردیف میانی در سه بلوک نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقدار متناظر سست‌شدگی در ردیف میانی بلوک C3 در تمامی خطوط از دو بلوک دیگر بطور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر است. کمترین مقدار سست‌شدگی در ردیف میانی در بلوک C2

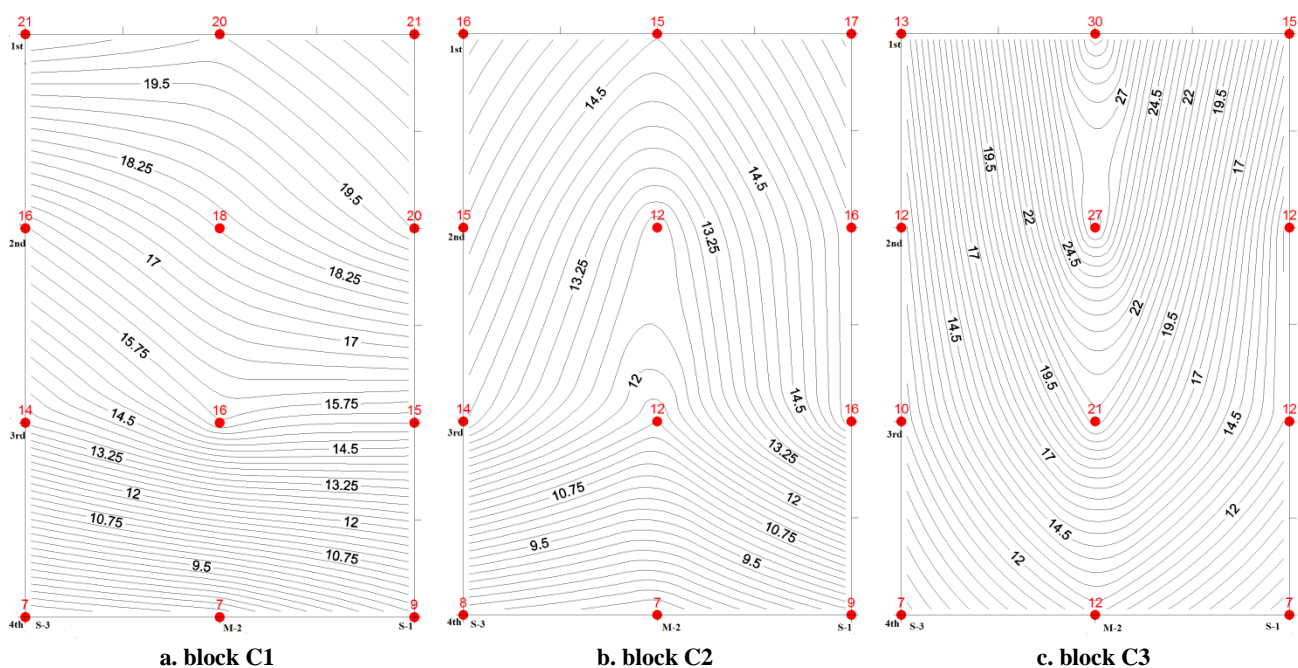


شکل ۱۰. روند سست شدگی ردیف میانی بلوک‌ها

میانی بلوک‌ها کاملاً با یکدیگر متفاوت است. بطوریکه شدت سست شدگی ردیف میانی در تأخیر ۲۵ میلی‌ثانیه حد وسط ردیف‌های کناری، در تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه کمتر از ردیف‌های کناری و در تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه نه تنها کمتر نیست بلکه دقیقاً در نقطه مقابل تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه بطور قابل توجهی بیشتر از ردیف‌های کناری است. به عبارتی دیگر با افزایش زمان تأخیر، شدت سست شدگی به‌ویژه در ردیف میانی از نظم معمول افزایشی و یا کاهشی تبعیت نمی‌کند. به نظر می‌رسد این تفاوت معنادار ناشی از فیزیک پیچیده امواج باشد که در تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه برهم‌نهی امواج ضربه ناشی از انفجار چال‌ها در ردیف میانی ناسازگار بوده و در نتیجه باعث تضعیف یکدیگر شده است. در مقابل در تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه برهم‌نهی این امواج سازنده بوده و باعث تقویت یکدیگر و در نتیجه افزایش شدت سست شدگی شده است.

۳-۴-۳. سست شدگی کلی

در شکل ۱۱ نقشه خطوط هم تراز سست شدگی بلوک‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سست شدگی در بلوک C1 دارای روند کاهشی قطری (شمال شرقی - جنوب غربی) است. شانه سمت راست (ردیف کنار - ۱) این بلوک دارای سست شدگی بیشتری شده است. از خط ۳ به بعد روند تغییرات شیب بیشتری دارد؛ در بلوک C2 شدت سست شدگی از قسمت میانه با کم‌ترین مقادیر به سمت کناره‌ها افزایش می‌یابد. البته شانه راست نسبت به شانه چپ سست‌تر شده است؛ در بلوک C3 روند سست شدگی کاملاً برعکس بلوک C2 است بطوریکه سست شدگی از کناره‌ها به سمت میانه افزایش چشمگیری دارد. شدت تغییرات در این بلوک در جهت عرضی قابل توجه است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان تأخیر، مقادیر سست شدگی در ردیف



شکل ۱۱. نقشه خطوط هم‌تراز سست‌شدگی بلوک‌ها

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

نسبت به یکدیگر مشابه است هر چند که شدت سست‌شدگی در ردیف کنار-۱ بیشتر از ردیف کنار-۳ است. این اختلاف می‌تواند بیانگر اثر تجمعی سست‌شدگی ناشی از انفجار چال-های هر ردیف در جهت عرضی و در انتهای خط آتش باشد. اما با افزایش زمان تأخیر، مقادیر سست‌شدگی در ردیف میانی بلوک‌ها کاملاً با یکدیگر متفاوت بودند بطوریکه شدت سست‌شدگی ردیف میانی در تأخیر ۲۵ میلی‌ثانیه حد وسط ردیف‌های کناری، در تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه کمتر از ردیف‌های کناری و در تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه بیشتر از ردیف‌های کناری است. در تأخیر ۵۰ میلی‌ثانیه برهم‌نهی ناسازگار امواج انفجار در میانه بلوک ناسازگار بوده و باعث تضعیف یکدیگر شده و در تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه سازگار امواج انفجار باعث افزایش شدت سست‌شدگی شده است. نتیجه‌ی حاصل از تأخیر ۷۵ میلی‌ثانیه می‌تواند نشانه‌ی برهم‌نهی سازنده امواج ضربه‌ای و تجمیع سست‌شدگی بخش میانی در مقایسه با بخش‌های محیطی و یا انتقال قوی‌تر امواج ضربه‌ای ناشی از انفجار ردیف آخر به واسطه‌ی آسیب‌دیدگی کمتر بخش میانی در اثر انفجارهای ردیف‌های قبلی (اختلاف کمتر در امپدانس‌ها) باشد.

استفاده از تأخیر مناسب در آتشکاری در ترکیب متناسب با دیگر عوامل طراحی می‌تواند باعث بهبود نتایج و اثرات انفجار شود. محدوده نفوذ انرژی انفجار به اثرات نابر جای آن از جمله خردایش و جابجایی بلوک آتشکاری شده ختم نمی‌شود. بلکه همزمان توده سنگ باقیمانده را نیز تحت تأثیر قرار داده و باعث اثرات برجا مانند سست‌شدگی می‌شود. در این پژوهش برای بررسی تأثیر تأخیر بر روی سست‌شدگی سه بلوک بتنی همگن و همسانگرد ساخته شد. بلوک‌ها پیش از انفجار شبکه‌بندی و آزمون فراصوت بر روی آن انجام شد. در هر بلوک سه ردیف سه چالی حفاری شد. سپس بلوک‌ها با سه زمان تأخیر بین ردیفی متفاوت (۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌ثانیه) با استفاده از فتیله انفجاری آتشکاری شد. بر روی لاشه بلوک‌ها دوباره برداشت فراصوتی انجام شد. داده‌های حاصل از آزمون فراصوت پیش و پس از انفجار برای محاسبه مقدار شاخص سست‌شدگی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد حداکثر مقدار سست‌شدگی (۳۰٪) در نزدیک‌ترین فاصله از خط انفجار در ردیف میانی C3 و کمترین مقدار آن (۷٪) در دورترین خط برداشت نسبت به محل انفجار رخ داده است. در تمامی بلوک‌ها اختلاف سست‌شدگی ردیف‌های کناری

تقدیر و تشکر

از مدیران و کارکنان شرکت‌های «معدن‌نگار نوین»، «مس کاوان عباس‌آباد شاهرود» و «نرده» به خاطر همکاری صمیمانه در این پژوهش تشکر می‌شود.

نتایج و روندهای مشاهده شده در این پژوهش به دلیل محدودیت تعداد آزمایش‌ها، از سطح اطمینان کافی برای تعمیم برخوردار نبوده و لازم است برای افزایش سطح اعتماد و تأیید نتایج، آزمایش‌های بیشتری انجام شود.

منابع

- Blair, D. P., 2009. Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation. Granada, CRC Press.
- Calvin J. Konya, Ph.D. and Edward J. Walter, Ph.D., 1997. Rock Blasting and Control Overbreak. Publication No. FHWA-HI-92-001.
- Gkikizas Lampropoulos N., 2016. Examination Of The Effect Of Time Delay On Fragmentation. M.A.Sc. Thesis. Kingston: Queen's University.
- Gate W.C., Ortiz B.L.T, Florez R.M., 2005. Analysis of rockfall and blasting backbreak problems. In: Proceedings of the 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Anchorage, Alaska, June 2005, vol (5): 671-680.
- Hettinger, M. R., 2015. The Effects Of Short Delay Times On Rock Fragmentation In Bench Blasts. M.A.Sc. Thesis. Missouri: Missouri University of Science and Technology.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. & Ayala Carcedo, F. J., 1995. Drilling and blasting of rocks. 1st ed. Rotterdam: CRC Press.
- Johansson, D. Ouchterlony, F., 2012. Shock wave interactions in rock blasting: the use of short delays to improve fragmentation in model-scale. Rock Mechanics and Rock Engineering, 46(1):1-18.
- Katsabanis, P. D., Tawadrous, A., Braun, C. & Kennedy, C., 2006. Timing effects on the fragmentation of small scale blocks of granodiorite. New Delhi, CRC Press.
- Kim, S.J., 2010. An experimental investigation of the effect of blasting on the impact breakage of rocks. Kingston, Queen's University.
- Katsabanis, P.D. Omid, O., 2015. The effect of delay time on fragmentation distribution through small and medium scale testing and analysis. Sydney, International Society of Explosives Engineers
- McKenzie C.K., 2013. Seed wave modelling applications for fragmentation, damage, and environmental impact control Blasting in Mines – New Trends – Ghose & Joshi (Eds), London, ISBN 978-0-415-62139-7 The 10th International Symposium on rock fragmentation by blasting, New Delhi, India:24-25.
- Omid, O., 2015. Timing Effects On Fragmentation By Blasting. M.A.Sc. Thesis. Kingston: Queen's University.
- Qin-yong Ma., Pu Yuan., Jing-shuang Zhang., Rui-qiu Ma., Bo Han., 2015. Blast-Induced Damage on Millisecond Blasting Model test with Multicircle Vertical Blastholes. Shock and Vibration Volume 2015, Article ID 504043:1-6
- Rustan, A.P., 1998. Micro-sequential contour blasting – how does it influence the surrounding rock mass. Engineering Geology (49):303-313.
- Saadatmand Hashemi, A., Katsabanis, P., 2020. The Effect of Stress Wave Interaction and Delay Timing on Blast-Induced Rock Damage and Fragmentation. Rock Mech Rock Eng 53, 2327-2346
- Taskashi Sasaoka., Yhiaski Takahashi., Akihiro hamanaka., 2019. Effect of delay time and firing patterns on the size of fragmented rocks by bench blasting, Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2019:450-466
- Xianyang Qiu., Yifei Hao. , Xiuzhi Shi., Hong Hao. , Shu Zhang. , Yonggang Gou., 2018. Numerical simulation of stress wave interaction in short-delay blasting with a single free surface. PLoS ONE 13(9): e0204166 .