

## تحلیل عددی و میدانی انتشار امواج و ترک‌های حاصل از انفجار پیش‌شکافی در توده‌سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا

حسن بخشنده امنیه<sup>۱\*</sup> و معین بهادری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>گروه معدن، دانشکده مهندسی دانشگاه کاشان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۴)

### چکیده

یکی از عملیات پرکاربرد در فعالیت‌های معدنی و عمرانی، استفاده از روش‌های انفجار کنترل شده است. استفاده از روش‌های انفجار کنترل شده علاوه بر کاهش هزینه‌های نگهداری کیفیت ظاهری، جبهه کار را افزایش می‌دهد. یکی از روش‌های معمول در عملیات انفجار کنترل شده، انفجار پیش‌شکافی است. در این روش چال‌های انفجاری با فاصله‌داری کمتر نسبت به چال‌های تولید در آخرین ردیف حفاری می‌شود. برهم‌نهی امواج تراکمی حاصل از انفجار چال‌های مجاور، موجب تولید تنش‌های کششی در راستای عمود بر خط واصل بین چال‌ها و منجر به شکستگی‌های کششی در توده‌سنگ می‌شود. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC سازوکار انتشار ترک‌ها و برهم‌نهی امواج حاصل از انفجار پیش‌شکافی سه چال بررسی و با نتایج آزمایش میدانی انفجار در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا مقایسه شده است. در آزمایش میدانی چال‌های انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر، عمق ۳ متر و فاصله‌داری ۸۵ سانتی‌متر نسبت به هم حفاری می‌شوند که با هفت فشنگ ماده منفجره آمولایت ترکی ۲۷ و با رابط انفجار فیتیله انفجاری خرج‌گذاری شده‌اند. لرزش‌های ناشی از انفجار با دو دستگاه لرزه‌نگار VIBROLOC در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۱۷۵/۲۴ و ۷۷/۳۳ میلی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. نتایج مدل‌سازی عددی انطباق مناسبی با نتایج انفجار پیش‌شکافی دارد.

واژه‌های کلیدی: انفجار کنترل شده، کنگلومرا، مدل‌سازی عددی، سد گتوند علیا

## Numerical and field analysis of wave propagation and cracks caused by presplit blasting in conglomerate rock mass at Gotvand Olya dam

Hassan Bakhshandeh Amnieh<sup>1\*</sup> and Moein Bahadori<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining, Faculty of Engineering, University of Kashan, Iran

(Received: 15 March 2012, accepted: 24 April 2013)

### Summary

Controlled blasting is commonly employed in civil and mining engineering developments. This reduces maintenance and supporting system costs and improves the bench appearance. Safe maintenance of the wall and avoidance of damage caused by blasting is therefore important in all

\*Corresponding author:

bakhshandeh@kashanu.ac.ir

\*نگارنده رابط:

subsequent underground and surface excavations. Different types of controlled blasting nowadays include trim blasting, line drilling, cushion blasting, pre-split blasting, fracture controlled method and linear shaped charge. Although these approaches incur additional operational costs, but considering benefits associated with the safety condition necessary for such operations, increased production and faster progress resulting from more stable walls, improved waste/ore ratio, controlled ore concentration and the required size reduction of the rock for haulage and loading, these additional costs are justifiable. Controlled blasting is also common in open-pit mining, quarry mining, trenching and shaft drilling. In case spacing and charge quantity are evaluated based on engineering design principals, a uniform fracture with narrow width would result. This would dampen the transfer of the explosion wave outside the explosion block, when production blast holes are fired. In pre-split blasting, which is a more common technique often used in such operations, blast holes with smaller diameters and lesser spacing than normal production sizes, are applied in the last drilling row. The method could easily be applied to all types of rocks. However, drilling patterns and the required explosive charges should be determined based on rock mass characteristics, such as stiffness, roughness, existence of discontinuities. Also, in pre-split blasting, contrary to other methods, the controlled blast holes are fired 50ms sooner than the main production blast holes. In case this delay exceeds 50ms for whatever reason, the fracture produced by the controlled blast holes will be filled with post-explosion fragments and their ability in cushioning the explosive transmitted wave is seriously hampered. Hence, in applications of this technique for hard rock mass, it is customary to leave a proportion of the blast holes without charge. The blast holes diameter in this technique varies from 51 to 102 mm, with the diameter of charge ranging from 17 to 32 mm, hence decoupling is less than one. The explosive connection is often carried out by detonating cord and if wire and electric detonators are used, they should be fast triggered type of milli-second delay or better. Superposition of compression waves due to adjacent blasting holes lead to tension stresses, perpendicular to the direction of blast-hole lines. This results in tensional fractures within the rock mass. In this study, using UDEC distinct element software, the mechanism of crack propagation and superposition of pre-split blasting waves in three holes are investigated, and the data are compared with field data obtained on the conglomerate rock mass at Gotvand Olya dam. Blast holes of 76mm in diameter, 3m height, 85cm spacing were drilled at the rock mass and charging included 7 Emulite cartridges with cortex blasting. Ground vibrations of  $175.24 \text{ mms}^{-1}$  and  $77.33 \text{ mms}^{-1}$  were recorded by two VIBROLOC seismometers, placed at 8m and 13m away from the blast hole centre, respectively. The results suggest that numerical simulation could be employed with sufficient accuracy for predicting pre-split blasting.

**Keywords:** Presplit blasting, conglomerate, numerical modeling, Gotvand Olya dam

## ۱ مقدمه

کاربرد گسترده‌ای دارد. عموماً روش‌های انفجار کنترل شده به انواع انفجار آرام، حفاری خطی، انفجار بالشی، انفجار پیش‌شکافی، روش کنترل شکست و روش خرج‌گذاری خطی شکل تقسیم می‌شوند. هرچند که به‌کارگیری این روش‌ها با افزایش هزینه همراه است، اما به‌سبب وجود برخی ویژگی‌ها مانند ایجاد شرایط ایمن توأم با امکان پیشرفت سریع، افزایش پایداری دیواره نهایی، بهبود نسبت باطله‌برداری، کنترل رقت ماده معدنی

حفظ دیواره و کنترل آسیب‌های ناشی از عملیات انفجار در حفاریات زیرزمینی و سطحی بسیار حائز اهمیت است. به‌منظور کنترل آسیب‌های ناشی از انفجار بر دیواره نهایی حفاریات، از روش‌های انفجار کنترل شده استفاده می‌شود. امروزه روش‌های انفجار کنترل شده به‌صورت ابزاری معمول در کنترل آسیب‌های ناشی از عملیات انفجار مربوط به طرح‌های عمرانی و معدنی سطحی و زیرزمینی

منفجره مصرفی بین ۱۷ تا ۳۲ میلی‌متر است. در این روش رابط انفجار عموماً فتیله انفجاری است و در صورت استفاده از سیم و چاشنی الکتریکی از چاشنی‌های کم‌تأخیر استفاده می‌شود (هاسترویلد، ۱۹۹۹ و جیمینو و جیمینو، ۱۹۹۵).

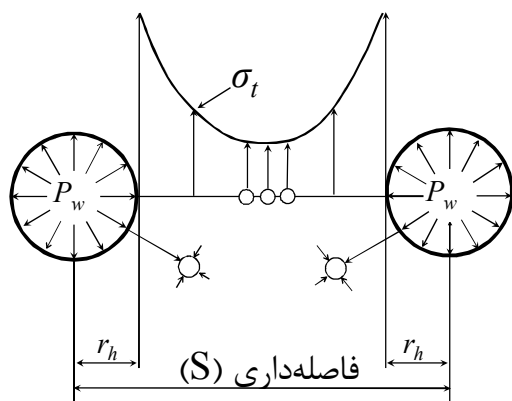
به‌منظور بررسی تأثیر چال‌های خالی جانبی بر کنترل رشد ترک‌های اطراف چال انفجار، موهانتی (۱۹۹۰) نتایج انفجار ماده منفجره PETN را در گرانیت، سنگ گچ، پلکسی‌گلاس و نوعی بسپار (پلیمر) با رفتار تُرد و مشابه محیط سنگی بررسی کرده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که وجود چال‌های راهنمای انتشار ترک حتی در صورت نداشتن گوشه‌های تیز می‌تواند مسیر انتشار ترک را به‌خوبی هدایت کند. بهاندیری و بدال در بررسی تأثیر شیب و امتداد ناپیوستگی‌ها به‌منزله ترک‌ها و شکاف‌های طبیعی موجود در توده‌سنگ بر شکل و ابعاد خرده‌های حاصل از انفجار، حالت‌های متفاوت امتداد یک ناپیوستگی را در توده تُرد و همگن آزمایش کرده‌اند (بهاندیری و بدال، ۱۹۹۰). چن و همکاران (۲۰۰۰) چگونگی انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده‌سنگ درزه‌دار را با استفاده از آزمایش میدانی بررسی کرده‌اند. براساس نتایج این بررسی برای حالت رفتار غیرخطی ضریب انتقال موج از سطح ناپیوستگی به مقدار طول موج وابسته است درحالی‌که در حالت رفتار خطی هیچ ارتباطی بین این دو پارامتر وجود ندارد. بخشنده امنیه و جواهریان (۱۳۸۶) با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC، تأثیر وجود عوارض ساختاری را بر انتشار امواج تراکمی حاصل از انفجار بررسی و با نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی فوردیس و همکاران (۱۹۹۳) مقایسه کرده‌اند. براساس نتایج این بررسی مدل‌سازی عددی به روش المان مجزا می‌تواند علاوه بر برآورد دقیق ضرایب جذب، بازتاب و عبور امواج در دو طرف سطح ناپیوستگی، مقادیر بیشینه سرعت و جابه‌جایی افقی ذره را

و رسیدن به ابعاد مناسب خردشدگی برای بارگیری و باربری آسان استفاده از این روش‌ها از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است (جیمینو و جیمینو، ۱۹۹۵). یکی از کاربردی‌ترین روش‌های انفجار محیطی، روش انفجار پیش‌شکافی است. در این روش قبل از انفجار چال‌های اصلی در پیرامون بلوک انفجار، شکاف‌هایی ایجاد می‌شود (هاسترویلد، ۱۹۹۹). این روش عموماً در هر نوع توده‌سنگی قابل‌استفاده است. البته مشخصات سنگ مانند سختی، تُردی، وجود ناپیوستگی‌ها از جمله پارامترهای مهم در تعیین آرایش چال‌ها و میزان ماده منفجره مصرفی هستند (هاسترویلد، ۱۹۹۹). در صورتی‌که فاصله چال‌ها از هم و میزان ماده منفجره مصرفی در چال‌ها مناسب باشد، برش موردنظر بین چال‌های پیش‌شکافی به‌طور کامل و با عرض کم تشکیل می‌شود. بنابراین هنگام انفجار چال‌های تولید، از عبور امواج به خارج از توده‌سنگ بلوک انفجار و در نتیجه وارد آمدن آسیب به توده‌سنگ پیرامون آن جلوگیری می‌شود (هاسترویلد، ۱۹۹۹). همانند سایر روش‌های انفجار کنترل شده، در این روش چال‌های کنترل در اطراف بلوک انفجار حفاری می‌شوند. در این روش برخلاف سایر روش‌ها، چال‌های کنترل در حدود ۵۰ میلی‌تانه قبل از چال‌های اصلی آتش می‌شوند. اگر به هر علت چال‌های تولید با فاصله زمانی به‌نسبت زیادی از چال‌های کنترل آتش شوند، در این حالت شکافی که با چال‌های کنترل شده تشکیل می‌شود، با خرده‌سنگ‌های حاصل از انفجار پُر می‌شود و خاصیت جلوگیری از انتقال امواج انفجار را از دست می‌دهد (جیمینو و جیمینو، ۱۹۹۵). هنگام استفاده از عملیات انفجار در توده‌سنگ سخت، به‌منظور بهبود نتیجه انفجار پیش‌شکافی توصیه می‌شود که بین چال‌های پیش‌شکافی یک یا چند چال خالی حفاری شود. در روش انفجار پیش‌شکافی قطر چال‌ها عموماً بین ۵۱ تا ۱۰۲ میلی‌متر است و با استفاده از روش جفت‌نشده‌گی بین ماده منفجره و چال، قطر ماده

## ۲ موقعیت جغرافیایی، مشخصات ابعادی و وضعیت

### زمین‌شناسی سد گتوند علیا

سد گتوند علیا در استان خوزستان در ۳۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان شوشتر و ۱۲ کیلومتری شهر گتوند واقع شده و آخرین سدی است که روی رودخانه کارون در حال احداث است. بدنه سد از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته رُسی، طول تاج ۷۶۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، ارتفاع از پی ۱۸۰ متر و عرض پی از قاعده ۱۱۰۰ متر و دارای حجم مخزن ۴۵۰۰ میلیون متر مکعب است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی سد گتوند علیا و در شکل ۳ موقعیت سرریز و سازه‌های موجود نسبت به منطقه انفجار نشان داده شده است (مشانیر، ۱۳۷۹). خصوصیات زمین‌شناسی ساختگاه محدوده احداث سد گتوند علیا را می‌توان به سه بخش مجزای تکیه‌گاه راست، جناح میانی و تکیه‌گاه راست تفکیک کرد.



شکل ۱. توزیع تنش در توده‌سنگ اطراف دوچال انفجاری (جیمینو و جیمینو، ۱۹۹۵).

به‌خوبی برآورد کند. رنشو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش گوشه‌دار کردن چال‌های مجاور، چگونگی هدایت ترک حاصل از انفجار دوچال را بررسی کرده‌اند. در این بررسی با فرض گرنش صفحه‌ای در ماده‌ای از جنس PMMA به ضخامت ۵ میلی‌متر با دو چال انفجاری به قطر ۶ میلی‌متر و به فاصله ۱۲ سانتی‌متر از هم استفاده شده است. با استفاده از روش تصویربرداری سریع و انتشار امواج فشاری و بُرشی در محیط پلکسی‌گلاس آهنگ رشد ترک افزایش یافته و در اثر انتشار هندسی و تغییر شکل موم‌سان (پلاستیک)، انرژی حاصل از انفجار میرا می‌شود.

یکی از عوامل مؤثر بر عملیات آتش‌کاری پیش‌شکافی، برهم‌نهی امواج حاصل از انفجار چال‌های متوالی است. هنگام انفجار یک ردیف چال پیش‌شکافی، موج حاصل از انفجار هر چال، با امواج انفجاری چال‌های بعدی تقویت می‌شود، به‌طوری‌که با پیشرفت انفجار در امتداد مسیر چال‌های مجاور، برهم‌نهی سازنده امواج موجب افزایش سطح انرژی شده و تغییر شکل‌های موم‌سان ایجاد خواهد شد. در این حالت انرژی انفجار به‌صورت پیش‌رونده و فزاینده در توده‌سنگ اطراف چال‌ها منتشر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، برهم‌نهی امواج تراکمی حاصل از انفجار چال‌های مجاور، موجب تولید تنش‌های کششی در راستای عمود بر خط واصل بین چال‌ها و باعث تولید شکستگی‌های کششی در توده‌سنگ می‌شود (جیمینو و جیمینو، ۱۹۹۵).

در این مقاله نتایج آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر، عمق ۳ متر و فاصله داری ۸۵ سانتی‌متر در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا با نتایج مدل‌سازی عددی انفجار در نرم‌افزار المان مجزای UDEC بررسی و مقایسه شده است.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی و مسیرهای دسترسی به سد گتوند علیا.

## ۱-۲ بخش میانی

نامتقارن، با دیواره‌هایی مرتفع با ارتفاع حدود ۳۷۰ متر را ایجاد کرده است. این ریخت‌شناسی متأثر از ویژگی‌های متفاوت این کنگلومرا در دو جناح رودخانه است. در این محدوده توده کنگلومرای حالت خُرد شده و زمین‌ساختی شده دارد. ماده‌سنگ به‌طور عمده از قطعات به هم پیوسته سنگ آهک، ماسه‌سنگ و چرت تشکیل شده است، و به سبب سیمانی‌شدگی آهکی، گاهی مقاومت زیادی دارد (مشانیر، ۱۳۷۹).

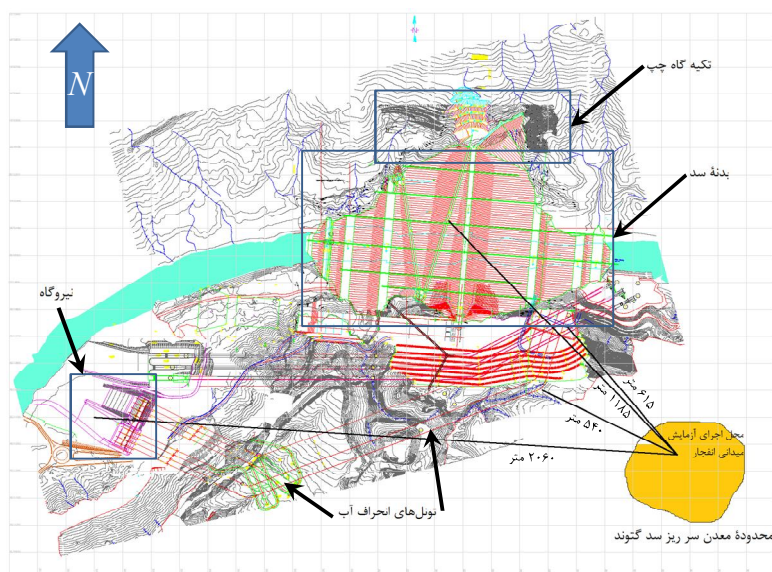
## ۳-۲ تکیه‌گاه چپ

توده‌ای از مصالح واریزه‌ای و بلوک‌های کنگلومرای در محدوده جناح چپ وجود دارد که به سنگ برجای سازند بختیاری محدود می‌شود. سازند بختیاری شیب توپوگرافی عمومی به نسبت زیاد (حدود ۶۰ تا ۶۵ درجه) و شیب لایه‌بندی کم (۰ تا ۵۵ درجه) دارد و شکستگی‌های موجود در آن فاصله‌دار با شیب زیاد است (مشانیر، ۱۳۷۹).

محدوده بستر رودخانه شامل سازند تخریبی سیلیسی و چین‌خورده آغاچاری است. این واحد سنگی تناوبی از ماسه‌سنگ‌های درشت تا متوسط دانه به رنگ سبز تا خاکستری، ماسه‌سنگ‌های ریزدانه قهوه‌ای، سیلت‌ستون‌ها و گل‌سنگ‌های آهکی (مارن) سرخ مایل به قهوه‌ای و خاکستری است. ضخامت لایه‌ها متفاوت است و از ماسه‌سنگ ضخیم لایه تا لامیناسیون‌های نازک گل‌سنگ تغییر می‌کند. چین‌خوردگی‌های این سازند به شکل تاقدیس با سطح محوری مایل است که باعث گسترش سامانه‌های شکسته و پُر درزه، به‌خصوص در نزدیکی محور تاقدیس شده، به‌طوری‌که در مرکز تاقدیس نفوذپذیری بالا و RQD پایین (۰ تا ۳۰) است. با افزایش عمق و فاصله از محور تاقدیس، وضعیت سنگ به نسبت بهبود می‌یابد (مشانیر، ۱۳۷۹).

## ۲-۲ تکیه‌گاه راست

در تکیه‌گاه‌ها کنگلومرای بختیاری دره‌ای به نسبت باز اما



شکل ۳. موقعیت سد و سازه‌های موجود نسبت به معدن سر ریز و منطقه انفجار (مشانیر، ۱۳۷۹).

سد گتوند علیا حفر شد. این چال‌ها با ۳ کیلوگرم ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ با رابط فتیله انفجاری خرج گذاری شد. در هر چال، خرج ته چال ۳ فشنگ ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ بود و به منظور بارگذاری یکنواخت به دیواره چال انفجار در هر ۳۰ سانتی‌متر از رابط فتیله انفجاری، یک فشنگ امولایت متصل شد. در جدول ۱ خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا و در جدول ۲ پارامترهای عملیات حفاری و انفجار و خصوصیات ماده منفجره امولایت بیان شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا.

ردیف	واحد	خصوصیات	مقدار
۱	(kg/m <sup>3</sup> )	چگالی	۲۴۶۰
۲	(MPa)	مقاومت فشاری تک‌محور	۳۲
۳	(MPa)	مقاومت کششی	۳/۷
۴	(MPa)	چسبندگی	۶/۴
۵	درجه	زاویه اصطکاک داخلی	۲۳
۶	(MPa)	مدول کشتان	۳۲
۷	-	نسبت پواسون	۰/۲۴

۳ عملیات حفاری و آتش کاری در سد گتوند علیا به‌طور کلی در عملیات انفجار روباز سد گتوند علیا چال‌های انفجاری عموماً با قطرهای ۶۴، ۷۶ و ۸۹ میلی‌متر، عمق‌های متفاوت تا ۱۷ متر و الگوهای حفاری متنوع ۲×۲ متر، ۳ × ۲/۷ متر، ۳/۵ × ۲/۸ متر و ۳/۷ × ۳/۱ متر، با دستگاه‌های حفار D7 و Tomrock (Ranger) حفر می‌شود. تعداد چال‌های انفجاری در هر نوبت انفجار به‌طور متوسط بین ۵۰ تا ۲۰۰ عدد متغیر است و به‌طور متوسط در هر روز یک نوبت انفجار صورت می‌پذیرد. ماده منفجره مصرفی در این عملیات انفجار عموماً آنفو و امولایت است و بسته به نوع سنگ و روش انفجار، از دستگاه‌های انفجار الکتریکی، نازل و فتیله انفجاری استفاده می‌شود (مشانیر، ۱۳۷۹).

#### ۴ آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی در توده سنگ

##### کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا

به‌منظور بررسی نتایج آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی، سه چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر، عمق ۳ متر و به فاصله ۸۵ سانتی‌متر از هم در توده سنگ کنگلومرای منطقه

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، در توده‌سنگ مجاور چال اول یک ترک شعاعی به طول ۱۶۰ سانتی‌متر و دو ترک تقریباً موازی از چال‌های دوم و سوم انتشار یافته‌اند. ترک‌های موازی اطراف چال‌های دوم و سوم به فاصله ۸۰ سانتی‌متر از هم قرار دارد و موجب جابه‌جایی یک بلوک سنگی به ابعاد ۸۰×۱۲۰ سانتی‌متر شده‌اند. لرزش‌های حاصل از انفجار، در دو دستگاه لرزه‌نگار VIBROLOC در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۱۷۵/۲۴ و ۷۷/۳۳ میلی‌متر بر ثانیه ثبت شده است.

۵ فشار چال، فشار انفجار و نواحی اطراف چال انفجار در شرایط جفت‌شدگی کامل، ماده منفجره در تماس مستقیم با توده‌سنگ اطراف قرار دارد و فشار عملیاتی انفجار ( $P_e$ ) تولید شده با فشار اعمال شده به دیواره چال ( $P_w$ ) برابر است. هنگام محاسبه پارامترهای عملیات انفجار، عموماً از فشار عملیاتی انفجار استفاده می‌شود که مقدار آن عموماً نصف فشار انفجار در نظر گرفته می‌شود (هاسترویلد، ۱۹۹۹ و جانسون، ۲۰۱۰).

با توجه به تأثیر متقابل ماده منفجره و توده‌سنگ در طی فرایند انفجار، در محاسبه مقدار فشار عملیاتی انفجار ماده منفجره، باید تأثیر خصوصیات ماده منفجره و توده‌سنگ منظور شود.

در این بررسی به منظور برآورد فشار عملیاتی انفجار ماده منفجره امولایت ترکی در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا از رابطه نیم‌تجربی لیو و تیدمان (۱۹۹۵)

$$P_e = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left( \frac{\rho_r \times V_p}{\rho_e \times VOD} \right), \quad (1)$$

استفاده شده است، که  $\rho_e$  چگالی ماده منفجره ( $\text{kg/cm}^3$ ).

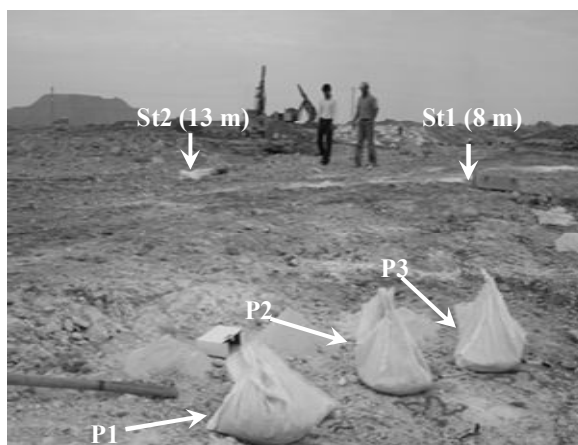
در شکل ۴ موقعیت حفر چال‌های انفجار و محل قرارگیری دستگاه‌های لرزه‌نگار نسبت به هم نشان داده شده است. در این آزمایش به‌منظور بررسی اثر موج ضربه و کاهش تأثیر گازهای حاصل از انفجار، عملیات خرج‌گذاری چال‌های انفجاری بدون انسداد صورت گرفته و به‌منظور جلوگیری از پرتاب مواد منفجره به خارج از چال انفجاری و آسیب به تجهیزات اندازه‌گیری از کیسه‌های مصالح سنگی استفاده شده است.

#### ۴-۱ نتایج آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی

پس از انفجار ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا، در توده‌سنگ مجاور چال انفجار تغییرشکل موم‌سان همراه با انتشار ترک اتفاق افتاد.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و هندسی چال‌های حفاری شده و ماده منفجره مصرفی در آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی.

ردیف	واحد	خصوصیات	مقدار
۱	( $\text{kg/m}^3$ )	چگالی ماده منفجره	۱۲۰۰
۲	(m/s)	سرعت انفجار ماده منفجره	۶۴۳۷
۳	(mm)	قطر فشنگ ماده منفجره	۲۷
۴	(mm)	ارتفاع فشنگ ماده منفجره	۲۲۵
۵	(gr)	وزن واحد ماده منفجره	۱۵۵
۶	-	تعداد فشنگ در چال	۷
۷	(gr/m)	فتیله کورتنس	۱۲
۸	(m)	قطر چال	۰/۰۷۶
۹	(m)	عمق چال	۲
۱۰	(m)	فاصله چال‌ها از هم	۰/۸۵

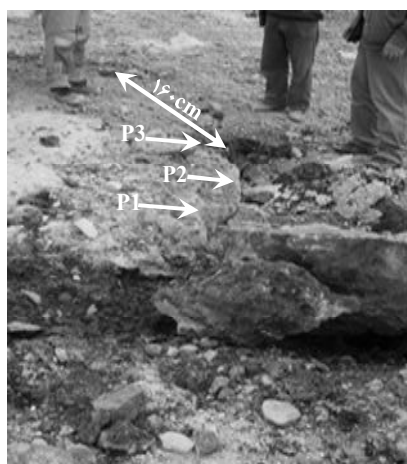
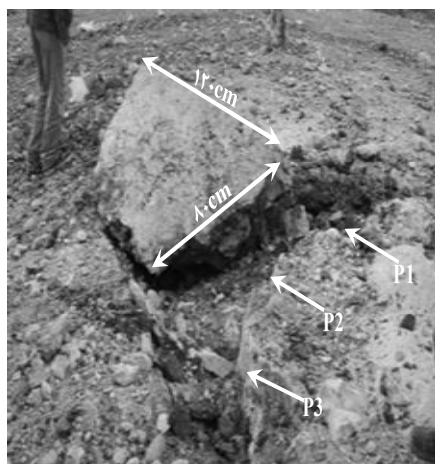


شکل ۴. موقعیت حفر چال‌های انفجاری در آزمایش پیش‌شکافی انفجار سه چال انفجاری در توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا و موقعیت دستگاه‌های لرزه‌نگار در فواصل ۸ و ۱۳ متری از محل انفجار.

$$\frac{P_h}{P_e} = \left( \frac{D_e}{D_h} \right)^{2\gamma} \quad (2)$$

که  $P_e$  فشار عملیاتی انفجار،  $P_h$  فشار اعمال شده به دیواره چال،  $D_e$  قطر ماده منفجره،  $D_h$  قطر چال و  $\gamma$  ثابت بی‌دررو (آدیاباتیک) انبساط گازها با مقدار ۱/۲ است. بنابراین مقدار بیشینه فشار انفجار اعمال شده به دیواره چال انفجار به قطر ۷۶ میلی‌متر در اثر انفجار یک فشنگ ماده منفجره امولایت ترکی به قطر ۲۷ میلی‌متر برابر (GPa) ۰/۷۳ برآورد می‌شود (هاسترویلید، ۱۹۹۹).

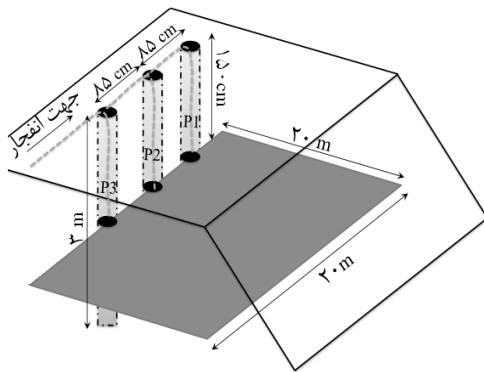
$VOD$  سرعت انفجار ماده منفجره  $\rho_r$  (km/s) چگالی گل‌سنگ  $V_p$  (kg/cm<sup>3</sup>) سرعت موج تراکمی در گل‌سنگ (km/s) و  $P_e$  بیشینه فشار دینامیک اعمال شده به دیواره چال انفجاری (kbar) است (لیو و تیدمان، ۱۹۹۵). ماده منفجره امولایت اغلب به شکل فشنگ‌های استوانه‌ای تولید و بسته بندی می‌شود. با توجه به تفاوت قطر چال و قطر ماده منفجره، فشار عملیاتی انفجار آن باید به مقدار فشار اعمال شده به دیواره چال تعدیل شود. مقدار این فشار از رابطه (۲) که به رابطه گاما مشهور است، محاسبه می‌شود:



شکل ۵. تغییر شکل‌های موم‌سان و ترک‌خوردگی‌های حاصل از آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی سه‌چال در توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا.



کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا ۴۳۰۰ متر بر ثانیه تعیین می‌شود. براساس پیشنهاد کولمبیر و لایزمر (۱۹۷۳) برای تحلیل درست و منطقی انتشار امواج در فضای عددی، ابعاد المان‌ها ( $\Delta l$ ) باید بین ۰/۱ تا ۰/۱۲۵ طول موج منتشر شده در محیط باشد. در این بررسی ابعاد بهینه المان‌های مثلثی در مدل ۱۶ سانتی‌متر انتخاب شده است. فرض بر آن است که در این نمونه چال‌های استوانه‌ای به‌صورت قائم با نسبت طول به قطر بسیار زیاد و جفت‌نشده بین چال انفجار به قطر ۷۶ میلی‌متر و یک فشنگ امولایت ترکی به قطر ۲۷ میلی‌متر تحت بارگذاری حاصل از انفجار قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده چگونگی بارگذاری دینامیک موج حاصل از انفجار پیش‌شکافی سه چال در مقطع میانی ارتفاع چال با فرض کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۷ هندسه مدل در تحلیل عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای



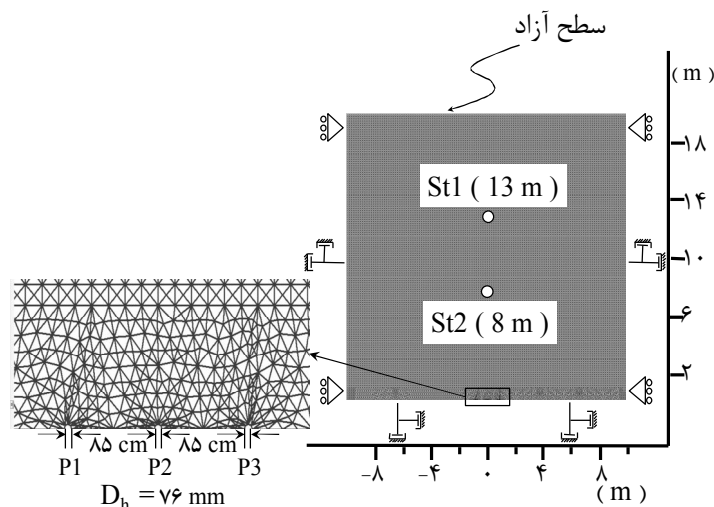
شکل ۶. مقطع فرض شده در ارتفاع ۱/۵ متری چال در مدل‌سازی عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری با رابط فنیله انفجاری و ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ در توده‌سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا.

## ۶ مدل‌سازی عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری به روش المان مجزا

به‌منظور بررسی نحوه انتشار و ترکیب موج تراکمی و ترک‌های حاصل از انفجار سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا، به کمک نرم‌افزار المان مجزای UDEC شرایط آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری مدل‌سازی شد. نرم‌افزار UDEC، ترکیبی از روش عددی المان مجزا و تفاضل متناهی است. در این بررسی سعی شد تا ابتدا یک بلوک صلب (یک جزء گسسته) از ناحیه مورد بررسی ایجاد شود و سپس با استفاده از روش المان‌بندی تفاضل متناهی، به حالت تغییر شکل‌پذیر تغییر یابد. علت استفاده از نرم‌افزار عددی المان مجزای UDEC قابلیت مدل‌سازی محیط‌های پیوسته و گسسته و مدل‌سازی مناسب تغییر شکل‌های موم‌سان محیط در اثر بارگذاری‌های ایستا و دینامیک است. در این نرم‌افزار شکست‌ها و ترک‌خوردگی‌های موم‌سان ایجاد شده در حین محاسبات بعدی مانند یک ناپیوستگی اولیه در نظر گرفته می‌شود.

### ۱-۶ هندسه مدل و شرایط مرزی

در تحلیل عددی با توجه به موقعیت دستگاه‌های لرزه‌نگار نسبت به محل انفجار، ابعاد مدل  $40 \times 20$  متر مربع انتخاب شده و به‌منظور کاهش حجم محاسبات و ایجاد تقارن، ابعاد مدل  $20 \times 20$  متر مربع منظور شده است. به‌منظور اجتناب از بازتاب امواج از مرزهای مدل، مرزهای جانبی و پایین مدل از نوع نامحدود و به‌منظور بررسی نحوه بازتاب امواج از سطح آزاد مرز بالایی مدل بدون هیچ محدودیتی مدل‌سازی شده است. با قرار دادن شرایط کشسان در مدل، سرعت انتشار موج تراکمی در توده‌سنگ



شکل ۷. هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت و ابعاد چال، شرایط مرزی و موقعیت دستگاه‌های لرزه نگار در تحلیل عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری.

منطقه سد گتوند علیا، شامل ابعاد مدل و موقعیت دستگاه‌های لرزه‌نگار، ابعاد و موقعیت چال‌های انفجار و شرایط مرزی نشان داده شده است.

است.

بر اساس محاسبات صورت گرفته، فشار انفجار امولایت برابر ۸/۷۱ گیگاپاسکال و بیشینه فشار دینامیک حاصل از انفجار اعمال شده به دیواره چال انفجار برابر ۰/۷۳ گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در تحلیل عددی به منظور بارگذاری دینامیک انفجار از رابطه اصلاح شده یون و ژنون (۲۰۱۰) به شکل رابطه (۳) استفاده شده است.

$$P(t) = P_h \frac{e^{-t/t_r}}{t_r} \times e^{\left(\frac{t}{t_r}\right)} \quad \text{if } t < t_r \quad (3)$$

$$P(t) = \frac{P_h}{b} \frac{e^{-t/t_r} \cdot (t + [a \times t_r])}{t_r} \times e^{\left(\frac{t + [a \times t_r]}{a \times t_r}\right)} \quad \text{if } t > t_r$$

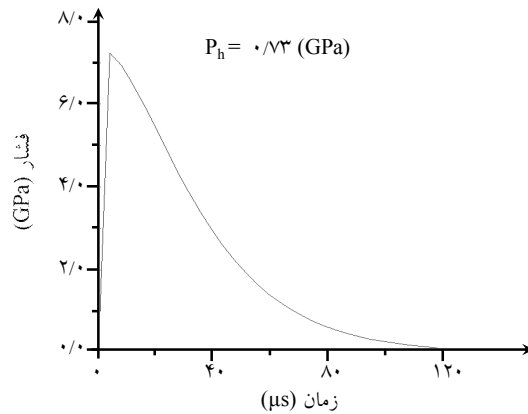
که  $P(t)$  تابع بارگذاری دینامیک متغیر با زمان  $P_h$  (GPa)،  $t$  بیشینه فشار اعمال شده به دیواره چال انفجار (GPa)،  $t_r$  زمان فرایند و  $t_r$  زمان خیز فشار در بارگذاری دینامیک اعمال بارگذاری دینامیک موج ضربه حاصل از انفجار به دیواره چال انفجاری است. ضرایب ثابت  $a$  و  $b$  کنترل‌کننده زمان خیز و اُفت فشار دینامیک حاصل از انفجار هستند. در تحلیل عددی زمان خیز فشار برابر ۱

## ۲-۶ انتخاب مدل رفتاری

مدل رفتاری استفاده شده برای محدوده مورد بررسی در این تحقیق، مدل موهر-کولمب است. این مدل با یک سطح تسلیم بُرشی، زاویه اصطکاک و چسبندگی داخلی تعیین می‌شود.

## ۳-۶ بارگذاری دینامیک موج ضربه حاصل از انفجار

از دهه ۸۰ میلادی روابط متفاوتی از سوی محققان گوناگون، به منظور بارگذاری دینامیک موج ضربه حاصل از انفجار عرضه شده است. در تحلیل عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری فشار انفجار ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ در توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا از رابطه نیم تجربی لیو و تیدمان (۱۹۹۵) محاسبه شده و با توجه به تفاوت قطر ماده منفجره و قطر چال، فشار اعمال شده به دیواره چال از رابطه گاما تعدیل شده



شکل ۸. منحنی بارگذاری دینامیک انفجار با بیشینه فشار ۰/۷۳ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکرو ثانیه و زمان اُفت فشار ۱۲۰ میکرو ثانیه.

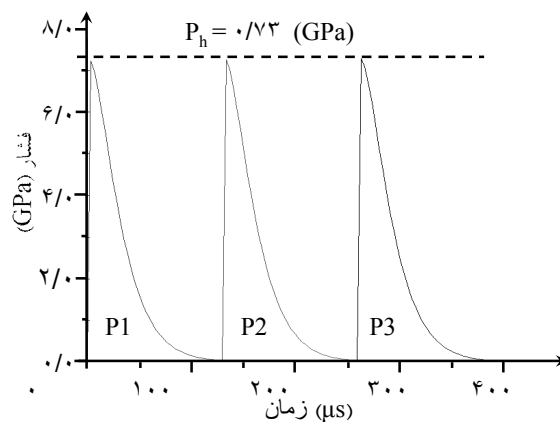
پالس‌های بارگذاری سه چال با اختلاف زمانی ۱۳۰ میکرو ثانیه در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۶ نتایج حاصل از تحلیل عددی

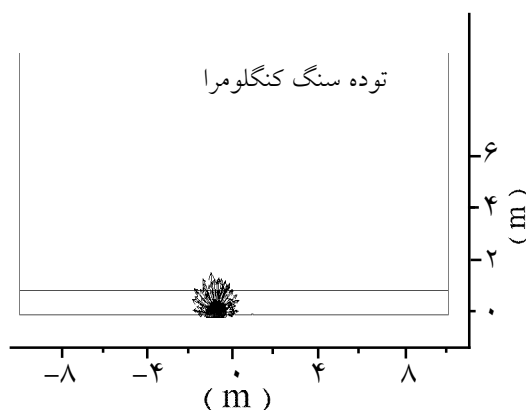
در مدل‌سازی عددی انفجار پیش‌شکافی، بارگذاری دینامیک انفجار به صورت یکنواخت به کل دیواره چال‌های انفجاری اعمال شده است. در شکل ۱۰ نحوه بارگذاری دینامیک انفجار به دیواره چال انفجاری  $P3$  در ۶ زمان ۱۳۰ میکروثانیه از آغاز انفجار و نحوه تشکیل و توزیع جبهه موج فشاری نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این زمان فقط بارگذاری حاصل از چال اول صورت گرفته و چال‌های دوم و سوم تحت بارگذاری دینامیک قرار نگرفته‌اند.

میکرو ثانیه، و مقادیر ثابت  $b = a - 1 = 17$  در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۸ منحنی اصلاح شده یون و ژنون (۲۰۱۰) در بارگذاری دینامیک موج ضربه انفجار ماده منفجره امولایت با بیشینه فشار اعمال شده به دیواره چال برابر ۰/۷۳ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان اُفت ۱۲۰ میکروثانیه که در نرم‌افزار المان مجزای UDEC مدل‌سازی شده، نشان داده شده است.

بارگذاری دینامیک انفجار بین دو چال مجاور برابر ۱۳۰ میکرو ثانیه است بنابراین بارگذاری چال سوم ۲۶۰ میکروثانیه پس از آغاز بارگذاری دینامیک چال اول شروع می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده



شکل ۹. پالس‌های بارگذاری دینامیک موج ضربه انفجار امولایت در شبیه‌سازی انفجار پیش‌شکافی سه‌چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا.

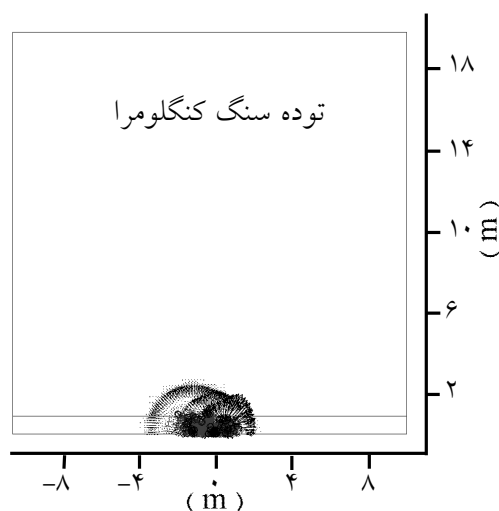


شکل ۱۰. تشکیل و توزیع جبهه موج فشاری در زمان ۱۳۰ میکروثانیه از آغاز انفجار پیش شکافی.

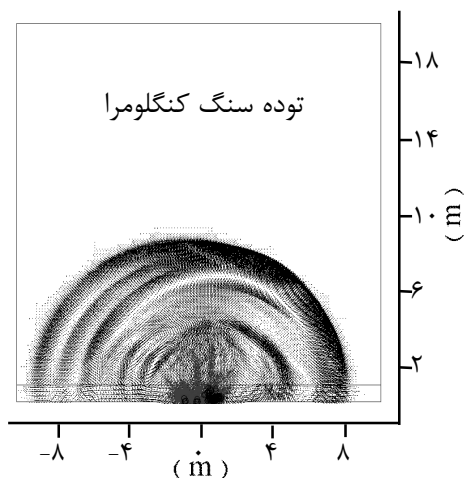
بارگذاری دینامیک و برهم‌نهی آن با امواج حاصل از سایر چال‌های انفجاری صورت می‌گیرد. در این شکل تمرکز برهم‌نهی حاصل از این امواج در توده‌سنگ مجاور چال سوم نشان داده شده است.

در شکل ۱۲ نحوه ترکیب موج تراکمی انفجار در زمان ۲ میلی‌ثانیه و در شکل ۱۳ نحوه بازتاب موج انفجار از سطح آزاد مدل در فاصله ۲۰ متری در زمان ۵/۸ میلی‌ثانیه از آغاز بارگذاری دینامیک موج ضربه ناشی از انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای

در شکل ۱۱ نحوه انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار چال‌های پیش‌شکافی در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گنوند علیا در زمان ۵۵۰ میکروثانیه از آغاز بارگذاری دینامیک انفجار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان ۵۵۰ میکروثانیه از آغاز فرایند، بارگذاری دینامیک انفجار چال‌ها آغاز شده و در اثر تأخیر زمانی، امواج تراکمی در چال‌های متوالی در وضعیت متفاوتی هستند. جبهه موج تراکمی حاصل از چال اول با توجه به زمان سپری شده از لحظه شروع



شکل ۱۱. ترکیب موج تراکمی در مدل‌سازی عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گنوند علیا در زمان ۵۵۰ میکروثانیه از آغاز بارگذاری دینامیک انفجار.



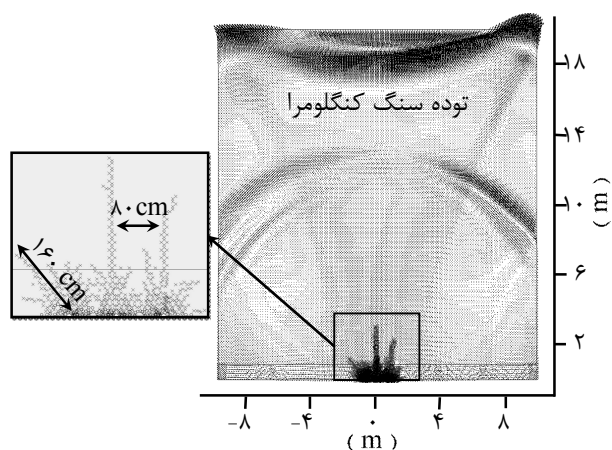
شکل ۱۲. ترکیب موج تراکمی در مدل‌سازی عددی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا در زمان ۲ میلی‌ثانیه از آغاز بارگذاری دینامیک انفجار.

تغییر شکل موم‌سان مناطق مجاور توده‌سنگ دربرگیرنده چال‌های انفجاری شده است.

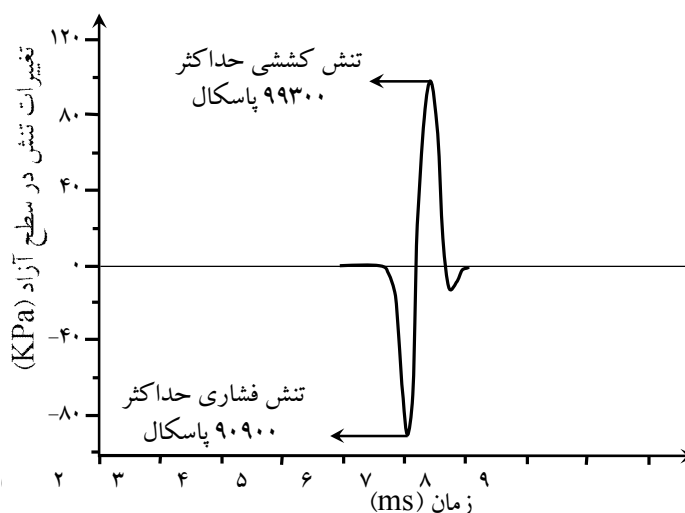
با توجه به تأخیر زمانی ۱۳۰ میکروثانیه‌ای ناشی از به‌کارگیری رابط فیلته انفجاری و برهم‌نهی امواج تراکمی حاصل از انفجار پیش‌شکافی، تنش‌های فشاری در توده‌سنگ مجاور چال دوم پس از آنکه تحت تأثیر موج تراکمی حاصل از انفجار چال اول قرار گرفته با بارگذاری موج تراکمی انفجار چال دوم دنبال شده و این امر موجب

منطقه سد گتوند علیا نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با توجه به جهت انفجار و برهم‌نهی امواج در توده‌سنگ، تغییر شکل‌های موم‌سان اطراف چال سوم بیشتر است. لذا ترک‌خوردگی‌های طول‌تر و پودر شدگی گسترده‌تری در توده‌سنگ مجاور چال‌های دوم و سوم نسبت به چال اول مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، انفجار ماده منفجره امولایت ترکی در توده‌سنگ کنگلومرا، موجب



شکل ۱۳. بازتاب موج تراکمی و گسترش محدوده موم‌سان در انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا در زمان ۵/۸ میلی‌ثانیه از آغاز بارگذاری دینامیک انفجار.

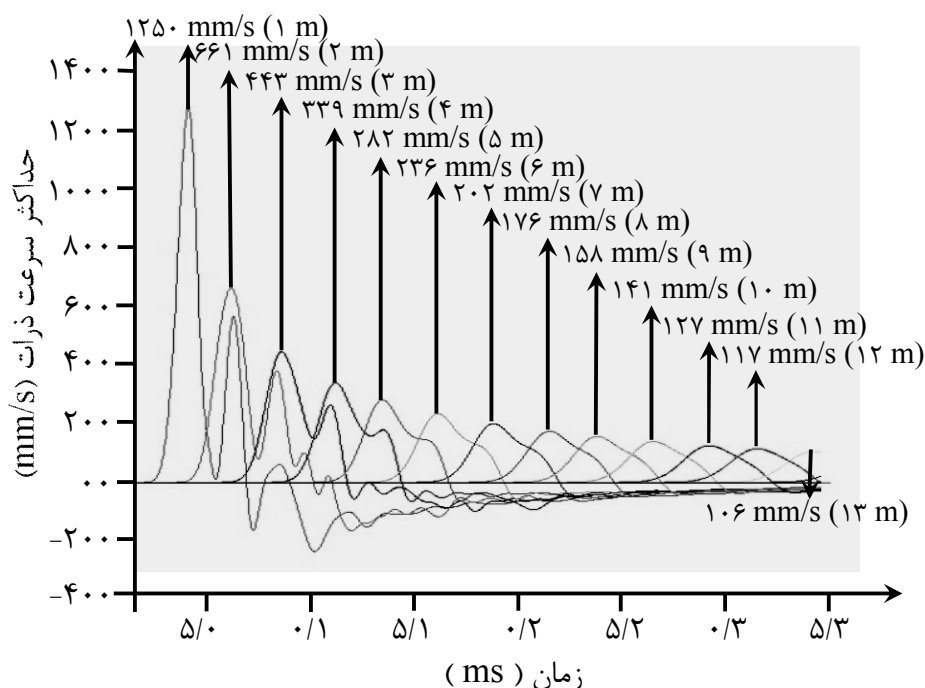


شکل ۱۴. تغییرات تنش فشاری به کششی در اثر بازتاب از سطح آزاد در فاصله ۲۰ متری از مرکز چال انفجار.

در شکل ۱۴ تغییرات تنش‌های فشاری اعمال شده در اثر برخورد و بازتاب موج تراکمی انفجار پیش شکافی سه چال انفجاری در توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه تنش‌های فشاری در سطح آزاد ۹۰۹۰۰ پاسکال است که در اثر بازتاب از سطح آزاد به تنش‌های کششی با مقدار حداکثر ۹۹۳۰۰ پاسکال تبدیل شده است. از آنجاکه این مقادیر بسیار کمتر از مقدار مقاومت‌های کششی و فشاری توده سنگ هستند، تغییرشکل‌های ناشی از برخورد و بازتاب موج تراکمی با سطح آزاد در محدوده کشسان قرار دارد و پدیده پوسته پوسته شدن اتفاق نخواهد افتاد.

پس از انفجار ماده منفجره، در اثر ایجاد تغییرشکل‌های موم‌سان در منطقه پودر شده و ترک‌های شعاعی انرژی، موج تراکمی حاصل از انفجار میرا می‌شود و در فواصل دورتر تغییرشکل‌ها عموماً در محدوده کشسان هستند و موجب لرزش‌های ناشی از انفجار می‌شوند. در مدل‌سازی عددی انفجار پیش شکافی سه چال انفجاری، مقدار بیشینه سرعت ذرات در فواصل ۱ تا ۱۳ متری از مرکز

گسترده‌گی ترک‌های شعاعی اطراف چال شده است. این فرایند در مورد چال سوم تکرار شده است و در اثر انفجار دو چال اول، توده سنگ مجاور چال سوم تحت بارگذاری امواج تراکمی انفجار دو چال اول در یک حالت کشسان دینامیک قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در توده سنگ مجاور چال اول یک ترک شعاعی به طول ۱۶۰ سانتی‌متر و دو ترک افقی قائم بر امتداد خط واصل بین چال‌ها به فاصله ۸۰ سانتی‌متر از هم گسترش یافته‌اند که این نشان‌دهنده احتمال جابه‌جایی بلوک سنگی به عرض ۸۰ سانتی‌متر و انطباق مناسب تحلیل عددی با نحوه انتشار ترک‌های اطراف چال در آزمایش میدانی انفجار پیش شکافی است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله، جبهه‌های موج تراکمی ناشی از انفجار سه‌چال ترکیب می‌شوند، به گونه‌ای که هنگام بازتاب از سطح آزاد مدل فقط یک جبهه موج تراکمی مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان ناشی از عواملی مانند برهم‌نهی امواج تراکمی و میرایی امواج گوناگون در حین انتشار دانست (آیتاسکا، ۲۰۰۴).



شکل ۱۵. تغییرات بیشینه سرعت ذرات در فاصله ۱ تا ۱۳ متری از مرکز چال انفجار.

متری، مقدار بیشینه سرعت ذرات برآورد شده در تحلیل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش میدانی متفاوت است. علت اختلاف بین مقادیر بیشینه سرعت ذرات اندازه‌گیری شده و برآورد شده در تحلیل عددی را می‌توان وجود عوارض ساختاری و ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا در مسیر انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار تا نقطه ایستگاه اندازه‌گیری دانست.

#### ۷ نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی نتایج عملیات انفجار پیش‌شکافی، سه چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر، عمق ۳ متر و فاصله ۸۵ سانتی‌متر نسبت به هم در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا حفر و با استفاده از ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ و رابط فنیله انفجاری خرج‌گذاری شده است. لرزش‌های حاصل از انفجار در دو دستگاه لرزه‌نگار

ماده منفجره بررسی شده است. در شکل ۱۵ منحنی تغییرات بیشینه سرعت ذرات بر اثر انتشار جبهه موج تراکمی در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله از منبع موج، دامنه بیشینه سرعت ذرات به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد. در آزمایش میدانی انفجار پیش‌شکافی سه چال انفجاری در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا، مقدار بیشینه سرعت ذرات در فاصله‌های ۸ و ۱۳ متری به‌ترتیب برابر ۱۷۵/۲۴ و ۷۷/۳۳ میلی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده و همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، در تحلیل عددی مقدار بیشینه سرعت ذرات در این فواصل به‌ترتیب برابر ۱۷۶ و ۱۰۶ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شده است. براساس مقایسه بین این مقادیر برای فواصل نزدیک، مقدار بیشینه سرعت ذرات برآورد شده در تحلیل انطباق مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی نشان می‌دهد. اما برای فاصله ۱۳

از انفجار در ماده بسپاری (پلیمری) پلکسی گلاس،  
مجله ژئوفیزیک ایران، ۱(۱)، ۱-۱۱.  
مشانیر (شرکت خدمات مهندسی برق)، ۱۳۷۹، خلاصه  
گزارش مطالعات توجیهی سد و نیروگاه سد گتوند  
علیا.

- Bhandari, S., and Badal, R., 1990, Post-blast studies of jointed rocks: Engineering Fracture Mechanics, **35**, 439-445.
- Chen, S. G., Zhao, J., and Zhao, Y. X., 2000, UDEC modeling of field explosion test. Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast 4): A. A. Balkema, Rotterdam, 447-456.
- Fordyce, D. L., Fourney, R. D., and Wang, X. J., 1993, Effect of jointson stress wave transmission. Rock Fragmentation by Blasting, Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast 4): A. A. Balkema, Rotterdam, 211-219.
- Hustrulid, W., 1999, Blasting Principles for Open Pit Mining: London: Taylor & Francis Group., **1**.
- Hustrulid, W., 1999, Blasting Principles for Open Pit Mining: London: Taylor & Francis Group., **2**.
- Itasca Consulting Group, Inc., 2004, Universal Distinct Element Code, Version 4, 01. Minneapolis: Minnesota.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., and Carcedo, F. J., 1995, Drilling and blasting of rocks: Balkema, Rotterdam.
- Johnson, J. C., 2010, The Hustrulid bar – A Dynamic Strength Test and its Application to the Cautious Blasting of Rock. The University of Utah.
- Kuhlmeyer, R. L., and Lysmer, J., 1973, Finite element method accuracy for wave propagation problems: Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 421-427.
- Liu, Q., and Tidman, P., 1995, Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blast hole. CANMET/MRL Experimental Mine: Retrieved from [www.clickok.ca/CANMET/WEB/doc/cm\\_094\\_e.pdf](http://www.clickok.ca/CANMET/WEB/doc/cm_094_e.pdf).
- Mohanty, B., 1990, Explosion generated fractures in rock and rock-like materials: Engineering Fracture Mechanics, **35**, 889-898.
- Renshu, Y., Yanbing, W., Huajun, X., and Maoyuan, W., 2012, Dynamic Behavior Analysis of Perforated Crack Propagation in

VIBROLOC در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۱۷۵/۲۴ و ۷۷/۳۳ میلی متر بر ثانیه ثبت شده است. پس از انفجار ماده منفجره، در توده سنگ مجاور چال تغییر شکل های مومسان به وجود می آید که موجب تولید ترک های شعاعی می شود. براساس اندازه گیری های صورت گرفته، در توده سنگ مجاور چال اول یک ترک شعاعی به طول ۱۶۰ سانتی متر و دو ترک موازی و عمود بر خط واصل مرکز چال های انفجار به فاصله ۸۰ سانتی متر از هم موجب جابه جایی یک بلوک سنگی به ابعاد ۸۰ × ۱۲۰ سانتی متر شده است. به کمک نرم افزار المان مجزای UDEC شرایط آزمایش میدانی انفجار پیش شکافی مدل سازی شده است. در تحلیل عددی با توجه به سرعت انفجار فیتله انفجاری برابر ۶۵۰۰ متر بر ثانیه و فاصله ۸۵ سانتی متری بین چال های متوالی، بار گذاری دینامیک موج ضربه حاصل از انفجار با تأخیر زمانی ۱۳۰ میکروثانیه منظور شده است. براساس نتایج مدل سازی عددی برآورد طول ترک های اطراف چال های انفجاری با دقت قابل قبولی صورت پذیرفته است. مقادیر لرزش انفجار در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۱۷۶ و ۱۰۶ میلی متر بر ثانیه برآورد شده است. اختلاف مقادیر بیشینه سرعت ذرات برای فاصله ۱۳ متری را می توان ناشی از وجود ناپیوستگی ها و عوارض ساختاری موجود در توده سنگ دانست. نتایج تحلیل عددی در برآورد نتایج انفجار شامل تغییر شکل های مومسان و لرزش های ناشی از انفجار نشان دهنده انطباق مناسب بین مدل سازی عددی و نتایج حاصل از انفجار است و در استفاده عملی، قابلیت اعتماد مناسبی دارد.

#### منابع

بخشنامه امنیه، ح.، و جواهریان، ع.، ۱۳۸۶، تحلیل عددی  
تأثیر عوارض ساختاری بر انتشار موج تراکمی حاصل



Yoon, J., and Jeon, S., 2010, Use of a Modified Particle-based method in simulating blast-induced rock fracture. Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast 9): A. A. Balkema, Rotterdam., 371-380.

Two-Hole Blasting. International Conference on Structural Computation and Geotechnical Mechanics. 5 Procedia Earth and Planetary Science, 254 – 261.