

تحلیل عددی اثرات ناشی از انفجار تک چال در توده گلسنگی سد گتوند علیا

حسن بخشنده امنیه^{۱*} و معین بهادری^۱^۱گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۱۶)

چکیده

نحوه تشکیل و انتشار ترک‌ها از عامل‌های مؤثر در کنترل آسیب‌های ناشی از انفجار، به‌خصوص در عملیات انفجار کنترل شده هستند. به‌منظور پیش‌بینی و کنترل ترک‌های ناشی از انفجار، نتایج آزمایش میدانی تک‌چال انفجاری در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا ثبت و با روش‌های تجربی برآورد زون‌های اطراف چال انفجاری مقایسه شده است. در این آزمایش چال انفجار به قطر ۷۶ میلی‌متر و عمق ۲ متر در توده گلسنگی حفاری و با یک کیلوگرم ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ و چاشنی الکتریکی آنی خرج‌گذاری شده است. مقادیر لرزش ناشی از این آزمایش انفجار، در دو دستگاه لرزه‌نگار VIBROLOC با فواصل ۸ و ۱۳ متری از چال انفجاری به‌ترتیب برابر ۱۷/۲۲ و ۹/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه ثبت شده است. شعاع منطقه پودر شده برابر ۲۵ سانتی‌متر و طول ترک‌های شعاعی برداشت شده از این آزمایش ۹۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. به‌کمک نرم‌افزار المان مجزای UDEC نحوه انتشار ترک‌ها و لرزش‌های ناشی از انفجار در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا مدل‌سازی و با نتایج آزمایش میدانی و روش‌های تجربی برآورد زون‌های اطراف چال مقایسه شده است. در تحلیل عددی شعاع منطقه پودر شده و طول ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری به‌ترتیب ۲۰ و ۹۰ سانتی‌متر و مقدار لرزش‌های ناشی از انفجار در فواصل ۸ و ۱۳ متری به‌ترتیب ۱۷/۲ و ۹/۲۷ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شده که نشان‌دهنده دقت و صحت زیاد روش عددی المان مجزا در برآورد نتایج انفجار مانند تغییر شکل‌های موم‌سان و لرزش‌زمین است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی انطباق مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی دارد و رابطه اسن و همکاران و مدل تجربی ایشان به‌ترتیب در برآورد منطقه پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری قابلیت اعتماد بیشتری دارند.

واژه‌های کلیدی: انفجار، منطقه پودر شده، ترک‌های شعاعی، گل‌سنگ، سد گتوند علیا

Numerical analysis for effects of single blast hole in mudstone rock-mass at Gotvand Olya dam

Hassan Bakhshandeh Amnieh^{1*} and Moein Bahadori¹¹ Dept. of Mining Eng., University of Kashan

(Received: 16 August 2011, accepted: 6 March 2012)

*Corresponding author:

bakhshandeh@kashanu.ac.ir

نگارنده رابط:

Summary

Drilling and blasting have numerous applications in civil and mining engineering. However, there are many unfavorable associated side effects and hazards, such as ground vibrations, air blasts, fly rocks, back-breaks, unwanted displacements, crack formation and propagation, and extended crushed zones, all of which need to be predicted and controlled effectively. Ground vibrations caused by blasting can damage the zones in the vicinity of the explosion block and its associated civilian structures and equipment. In addition to environmental and structural damages, air blasts can irreversibly damage the health by affecting the hearing sense and mental stability of the personnel. Damages to the front face, caused by open-pit and underground explosions, not only increase the maintenance costs, but also make the appearance unacceptable. An important factor in reducing hazards in controlled blasting is the prediction of crack formation around the blast-hole and its propagation, which has been the subject of research since early 1950's using field experiments, analytical methods and numerical simulations, paving way for many semi empirical correlations presented in the literature on this matter. As a rule of thumb, the radius of the crushed zone and the length of the radial cracks, are assumed to be in the order of 3 to 5 times and 40 to 50 times that of explosive radius, respectively. Hence, the radius of the crushed zone and the radial crack lengths were evaluated to be 10.16 cm and 114 cm, respectively. In this study, the results of the field studies from single blast-holes in the mudstones of Gotvand Olya dam were compared with several empirical correlations, using a blast-hole of 76 mm diameter, 2 m depth, 1 kg emulate 27 charge and a single instantaneous electrical cap. Two seismometers of VIBROLOC placed 8 m and 13 m away from the blast-hole recorded the ground vibration at 17.22 and 9.02 mms^{-1} , respectively. The crushed zone radius and the radial crack length were measured to be 25 cm and 90 cm, respectively. The crack propagation and the ground vibration were compared with the field study results using a UDEC discrete element method. In the simulation exercise, the dynamic loading on the surrounding walls of the blast hole were assumed to be uniform and in radial direction. Also, the blast was assumed to take place instantaneously along the cylindrical charge and the semi-empirical relationship of Liu and Tidman was used to evaluate the maximum detonation pressure produced. The simulation results included a variation in the peak particle velocity with respect to the distance from the blast hole centre, a variation in the particle displacement, a variation in the applied stresses caused by the shock wave travelling, reflecting the stress wave from a free face. The numerical analysis indicated the crushed zone radius and the radial crack length to be 20 and 90 cm, respectively. Also, the ground vibrations at 8 m and 13 m distances away from the blast-hole were simulated to be 17.2 mms^{-1} and 9.27 mms^{-1} , respectively. Amongst the empirical correlations used, Ash correlation (1963) revealed a radial crack length of 110 cm, and Essen et al. (2003) evaluated a crushed zone radius of 19 cm, indicating more accurate estimations. This study indicates that the numerical analysis used is capable of presenting acceptable accuracy.

Key words: Blasting, crushed zone, radial cracks, mudstone, Gotvand Olya dam

۱ مقدمه

کنترل نتایج ناشی از عملیات انفجار مانند لرزش زمین، لرزش هوا، پرتاب سنگ، عقب‌زدگی، جابه‌جایی نامطلوب، تشکیل و گسترش ترک‌های ناخواسته و گستردگی محدوده پودر شده اطراف چال اهمیت زیادی دارد. با توجه به گستردگی کاربرد عملیات انفجار در صنایع معدنی و عمرانی، کنترل آسیب‌های ناشی از آن و ارتقاع سطح ایمنی پرسنل و سازه‌های اطراف باید مورد توجه قرار گیرد. از اوایل دهه ۵۰ میلادی محققان گوناگون با عرضه مدل‌های ریاضی، تجربی و تحلیلی سعی کرده‌اند آثار نامطلوب انفجار را کنترل کنند یا کاهش دهند (شارپ، ۱۹۴۲؛ دووال، ۱۹۵۳؛ کووک، ۱۹۵۶؛ هینو، ۱۹۵۶؛ دووال و پتکف، ۱۹۵۹؛ اتکینسون و همکاران، ۱۹۶۴؛ استارفیلد و پاگلیس، ۱۹۷۴؛ گراف، ۱۹۷۵؛ هنریک، ۱۹۷۹؛ هاگان، ۱۹۸۳؛ فورنی، ۱۹۸۳ و کونیا و والتر، ۱۹۹۱). لرزش زمین ناشی از انفجار می‌تواند به محیط پیرامون انفجار آسیب برساند و موجب وارد آمدن خسارت به سامانه‌های نگهداری، تأسیسات و سازه‌های مجاور محیط انفجار شود (نیکولاس، ۱۹۶۴). انرژی آزاد شده در اثر عملیات انفجار به اندازه‌ای است که می‌تواند یک بلوک سنگی به ابعاد ۲۰ سانتی‌متر تا یک کیلومتر پرتاب کند و خطرات جانی و مالی سنگینی را به همراه داشته باشد (روث، ۱۹۷۹). لرزش هوا علاوه بر وارد ساختن آثار مخرب بر سازه و محیط زیست، موجب صدمه زدن به شنوایی انسان می‌شود و آثار روانی در پی دارد (مور و همکاران، ۱۹۹۳). آسیب به دیواره نهایی شیروانی در اثر عملیات انفجار روباز و انتشار ترک‌های ناخواسته در چال‌های محیطی در عملیات انفجار زیرزمینی علاوه بر افزایش دادن هزینه‌های نگهداری، کیفیت ظاهری جبهه کار را کاهش می‌دهد (هاسترولید، ۱۹۹۹).

به‌منظور پیش‌بینی و کنترل آسیب‌های اطراف چال انفجار روش‌های متفاوتی عرضه شده است. اش (a،

۱۹۶۳b) برای کنترل عوامل ناخواسته و بهبود نتایج مطلوب انفجار مدل‌های تجربی را پیشنهاد کرده است. در این مدل‌ها با استفاده از چگالی نسبی توده‌سنگ و قدرت نسبی مواد منفجره، شعاع منطقه آسیب دیده به‌صورت ضریبی از شعاع چال محاسبه می‌شود. دروکوانی و همکاران (۱۹۷۳) با استفاده از نظریه رفتار مواد ایلایشین (۱۹۷۱)، با فرض محیط همگن، کرنش صفحه‌ای برای انفجار ماده منفجره ستونی در توده‌سنگ، چگونگی توزیع نواحی اطراف چال را تحلیل کرده است. نقطه ضعف این مدل تأکید بر نظریه رفتار مواد ایلایشین است. ووک و همکاران (۱۹۷۳) با اجرای چند آزمایش میدانی چگونگی گسترش منطقه خرد شده اطراف چال انفجاری را بررسی و برای پیش‌بینی آن رابطه‌ای پیشنهاد کرده‌اند. سولادزینسکی (۱۹۹۳) با توجه به نظریه هیدرودینامیکی انفجار ماده منفجره در سنگ، برای پیش‌بینی شعاع منطقه خرد شده اطراف چال، رابطه تجربی پیشنهاد داده است. در این مدل از انرژی مؤثر ماده منفجره استفاده شده است که پارامتر دقیقی نیست. جرجویچ (۱۹۹۹) بر پایه معیار شکست گریفت رابطه‌ای تجربی در برآورد شعاع منطقه پودر شده اطراف چال عرضه کرده است. کانچیوتلا و همکاران (۱۹۹۹) شعاع منطقه پودر شده اطراف چال را تابع شعاع چال، فشار انفجار و مقاومت تراکمی تک‌محوری توده‌سنگ دانسته‌اند و به کمک این عامل‌ها رابطه‌ای تجربی برای برآورد شعاع منطقه پودر شده اطراف چال پیشنهاد کرده‌اند. لازم به ذکر است مقدار شعاع منطقه پودر شده در توده‌های سنگی از رابطه‌های سولادزینسکی، جرجویچ و کانچیوتلا بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌شود. اسن و همکاران (۲۰۰۳) به‌منظور پیش‌بینی منطقه خرد شده اطراف چال، نتایج ۹۲ آزمایش میدانی انفجار را به کمک پارامتر اندیس منطقه خرد شده (CZI) تشریح کرده‌اند. در این بررسی یک رابطه‌نمایی منفی براساس اندیس منطقه خرد شده اطراف چال عرضه

(۲۰۱۰)، مدل تجربی اش (b, ۱۹۶۳a) منطقه آسیب دیده اطراف چال انفجار را بهتر برآورد می‌کند. این در حالی است که برخلاف سایر روابط تجربی در مدل «اش» (a, ۱۹۶۳b) نیازی به خصوصیات فیزیکی ویژه توده سنگ و اندازه گیری‌های میدانی مانند حداکثر سرعت ذرات ندارد. علاوه بر این ایورسن و همکاران (۲۰۱۰) لرزش‌های ناشی از انفجار را با استفاده از معیار تجربی NIOSH پیش‌بینی و نتایج آن را با اندازه گیری‌های میدانی مقایسه کرده‌اند.

در این بررسی نتایج آزمایش میدانی تک‌چال انفجاری در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا ثبت و با روش‌های تجربی برآورد زون‌های اطراف چال انفجاری مقایسه شده است. در آزمایش میدانی لرزش‌های ناشی از انفجار، مناطق پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری ثبت و اندازه گیری شده است. سپس به کمک روابط تجربی، شعاع مناطق پودر شده و طول ترک‌های شعاعی اطراف چال برآورد و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC نتایج آزمایش میدانی انفجار ماده منفجره امولایت ترکی در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا مدل‌سازی شده است.

و نتایج آن با روابط تجربی مشابه مقایسه شده است. هاسترولید و جانسون (۲۰۰۸) در کنترل آسیب‌های ناشی از انفجار با مواد منفجره جفت شده و جفت نشده مدلی را پیشنهاد داده‌اند. ایورسن و همکاران (۲۰۱۰) نتایج آزمایش انفجار ماده منفجره آنفو در یک بلوک بتنی را با روابط تجربی مقایسه کرده‌اند. در این بررسی نواحی سه‌گانه اطراف چال انفجار با روش‌های تحلیلی، محاسبه شده و با نتایج آزمایش میدانی انفجار در بتن مقایسه شده است. در این آزمایش یک چال انفجاری به قطر ۳۸ میلی‌متر در یک بلوک بتنی حفاری و با ماده منفجره Dyno AP خرج گذاری شده است. نتایج آزمایش میدانی ایورسن و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که در مناطقی با تمرکز خرج گذاری بیشتر شعاع مناطق پودر شده و طول ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجار افزایش می‌یابد. براین اساس در مناطق پودر شده و ترک‌های شعاعی که به ترتیب در فواصل ۵۰ سانتی‌متر و ۱۷۶ سانتی‌متر از مرکز چال انفجاری قرار دارند، مقادیر حداکثر سرعت ذرات به ترتیب برابر 4500 mm/s و 280 mm/s ثبت شده است. از بین مدل‌های تجربی مورد بررسی ایورسن و همکاران



شکل ۱. تک‌چال انفجاری حفر شده در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا.

به منظور بررسی اثرات انفجار بر محیط پیرامون و سازه‌های مجاور منطقه انفجار، هاسترولید (۱۹۹۹) رابطه عمومی ۱ را بین حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار (PPV)، مقدار گرنش شعاعی (ε) و سرعت انتشار صوت در توده سنگ (c) پیشنهاد کرده است:

$$PPV = c\varepsilon, \quad (1)$$

که سرعت انتشار صوت در توده گلسنگی ۳۸۰۰ متر بر ثانیه برآورد می‌شود (هاسترولید، ۱۹۹۹). امواج کشسان، امواجی مکانیکی هستند که ذرات و یا مولکول‌های محیط را با تغییر شکل بسیار کم (در محدوده رفتار کشسان) جابه‌جا می‌کنند و رابطه خطی بین تنش و گرنش با مدول-های کشسانی بیان می‌شود که از پدیده‌های فیزیکی و مکانیکی محیط تبعیت می‌کند (کازمی و همکاران، ۱۳۸۸). به منظور تبدیل گرنش‌های شعاعی به تنش‌های دینامیکی شعاعی حاصل از انفجار می‌توان از رابطه عمومی هوک استفاده کرد:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2)$$

که E مدول کشسان (GPa)، σ تنش دینامیکی

۲ آزمایش میدانی انفجار تک‌چال در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا

به منظور بررسی نحوه انتشار ترک، تک‌چال انفجاری به عمق ۲ متر و قطر ۷۶ میلی‌متر در توده گلسنگی سد گتوند علیا حفر شد. در شکل ۱ موقعیت حفر چال در توده گلسنگی نشان داده شده است. این چال با امولایت ترکی ۲۷ (Magnum 365) و چاشنی الکتریکی آنی خرج-گذاری شد. خرج ته چال شامل ۴ فشنگ امولایت ترکی با یک چاشنی الکتریکی آنی و خرج میان چال شامل ۳ فشنگ امولایت ترکی با یک چاشنی الکتریکی آنی است. در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا بیان شده است. لرزش‌های ناشی از انفجار با دو دستگاه لرزه‌نگار VIBROLOC با لرزه‌سنج‌های سه‌مؤلفه‌ای در فواصل ۸ و ۱۳ متری از چال انفجاری برداشت و پردازش شد. مقدار حداکثر سرعت ذرات برداشت شده در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۱۷/۲۲ و ۹/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه ثبت شده است. در جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ بیان شده است.



شکل ۲. منطقه مومسان و ترک‌های شعاعی ناشی از انفجار تک‌چال در توده گلسنگی سد گتوند علیا.

منطقه پودر شده، ترک‌های شعاعی و منطقه لرزش‌های ناشی از انفجار تقسیم می‌شوند.

در شرایط جفت‌شدگی کامل، ماده منفجره در تماس مستقیم با توده سنگ اطراف قرار دارد و فشار انفجار (P_d) تولید شده با فشار اعمال شده به دیواره چال (P_w) برابر است. براساس پیشنهاد ایورسن و همکاران (۲۰۰۸) برای هر نوع ماده منفجره با چگالی و سرعت انفجار مشخص، فشار انفجار از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$P_d = \frac{\rho_e (VOD)^2}{4}, \quad (3)$$

که ρ_e چگالی (kg/m^3)، VOD سرعت انفجار (km/s) و P_d فشار انفجار ماده منفجره (MPa) است.

برای مثال برای ماده منفجره امولایت ترکی (Magnum 365)، با چگالی (kg/m^3) ۱۲۰۰ و سرعت انفجار (km/s) ۶۴۳۷ فشار انفجار معادل (GPa) ۱۲/۴۳ محاسبه می‌شود.

شعاعی (MPa) و ϵ کرنش شعاعی هستند. بنابراین مقدار کرنش شعاعی ناشی از انفجار ماده منفجره امولایت ترکی ۲۷ در توده گل‌سنگی منطقه سد گتوند علیا در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۵ و ۲ بوده و مقدار تنش متناظر با آن به ترتیب ۵۴/۴ و ۲۸/۵ مگاپاسکال برآورد شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، شعاع پودرشدگی اطراف چال ۲۵ سانتی‌متر و ۵ ترک شعاعی با حداکثر طول ۹۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است.

۳ فشار چال، فشار انفجار و نواحی اطراف چال انفجار

براساس پیشنهاد ایورسن و همکاران در اداره ایمنی و بهداشت آمریکا (۲۰۰۸)، در اثر انتشار تنش تراکمی حاصل از انفجار، توده سنگ اطراف چال انفجاری را می‌توان به پنج بخش مجزا تفکیک کرد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، این نواحی پنج‌گانه به ترتیب از مرکز به بیرون به مناطق ماده منفجره، دیواره چال،

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و ژئومکانیکی توده گل‌سنگی منطقه سد گتوند علیا.

ویژگی‌ها	مقدار
چگالی (kg/m^3)	۲۳۷۰
مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	۱۱
مقاومت کششی (MPa)	۱/۷
چسبندگی (MPa)	۴/۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۳
مدول کشسان (GPa)	۱۲
نسبت پواسون	۰/۲
سرعت انتشار موج در گل سنگ (m/s)	۳۸۰۰

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی ماده منفجره امولایت ترکی (Magnum 365).

ویژگی‌ها	مقدار
چگالی (kg/m^3)	۱۲۰۰
سرعت انفجار (m/s)	۶۴۳۷
قطر فشنگ ماده منفجره (mm)	۲۷
ارتفاع فشنگ ماده منفجره (mm)	۲۲۵
وزن واحد (gr)	۱۵۵
انرژی قابل دستیابی (Nmm/g)	۴/۴۳۳
قدرت نسبی انفو (RBS)	۱/۲
تعداد فشنگ در چال	۷
نوع و تعداد چاشنی	۲ عدد چاشنی الکتریکی آبی
قطر چال (mm)	۷۶
عمق چال (m)	۲

$$\frac{P_h}{P_e} = \left(\frac{D_e}{D_h} \right)^{2\gamma} \quad (4)$$

که P_e فشار عملیاتی انفجار، P_h فشار اعمال شده به دیواره چال، D_e قطر ماده منفجره، D_h قطر چال و γ ثابت بی‌دررو انبساط گازها با مقدار ۱/۲ است. بنابراین مقدار حداکثر فشار انفجار اعمال شده به دیواره چال انفجار به قطر ۷۶ میلی‌متر در اثر انفجار سه فشنگ ماده منفجره امولایت ترکی به قطر ۲۷ میلی‌متر و قطر معادل ۵۸ میلی‌متر برابر (GPa) ۳/۲۵ برآورد می‌شود.

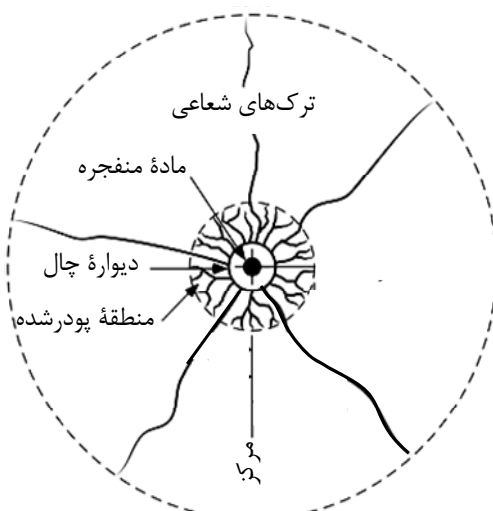
هنگام محاسبه پارامترهای عملیات انفجار، عموماً از فشار عملیاتی انفجار استفاده می‌شود که مقدار آن معمولاً نصف فشار انفجار در نظر گرفته می‌شود. بنابراین فشار انفجار امولایت ترکی برابر (GPa) ۶/۲۱ برآورد می‌شود. ماده منفجره امولایت ترکی غالباً به شکل لوله‌ای تولید و بسته‌بندی می‌شود. بنابراین با توجه به تفاوت 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 ۴ که به رابطه گاما مشهور است، محاسبه می‌شود (هاسترویلید، ۱۹۹۹).

۱-۳ معیارهای تجربی پیش‌بینی شعاع‌های آسیب اطراف چال انفجار

از اواسط دهه ۵۰ میلادی، محققان گوناگون به روش تحلیلی و با عملی ساختن آزمایش‌های میدانی، سازوکار شکست را بررسی و نواحی اطراف چال انفجار را پیش‌بینی کرده‌اند. از نخستین بررسی‌های میدانی انفجار می‌توان به آزمایش میدانی شارپ (۱۹۴۲) اشاره کرد. شارپ با فرض چال استوانه‌ای، فضای نیمه بی‌نهایت، کشتان و هموزن، فشار انفجار وارد بر جداره چال را به منزله متغیری از زمان $P(t)$ ، در نظر گرفته است. نتایج این آزمایش مانند تغییر شکل‌های موم‌سان ناشی از انفجار، لرزش زمین، نحوه بارگذاری دینامیکی بر دیواره چال از سوی محققان گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. براساس یک معیار سرانگشتی، شعاع منطقه پودر شده اطراف چال بین ۳ تا ۵ برابر شعاع ماده منفجره و شعاع ترک‌های شعاعی حداکثر اطراف چال بین ۴۰ تا ۵۰ برابر شعاع ماده منفجره برآورد می‌شود. براین اساس شعاع منطقه پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری به

طور متوسط به ترتیب برابر ۱۰/۱۶ سانتی‌متر و ۱۱۴ سانتی‌متر برآورد می‌شود. علاوه بر این برخی از محققان با استفاده از روابط ریاضی، شعاع منطقه پودر شده و طول ترک‌های ناشی از انفجار را پیش‌بینی کرده‌اند. در جدول ۳ برخی از روابط عرضه شده از سوی محققان گوناگون بیان شده است (اش، ۱۹۶۳؛ دروکوانی و همکاران، ۱۹۷۳؛ سولادزینسکی، ۱۹۹۳؛ جرجویچ، ۱۹۹۹؛ کانچیوتلا و همکاران، ۱۹۹۹ و اسن و همکاران، ۲۰۰۳). براین اساس با توجه به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده منفجره امولایت ترکی و توده گل‌سنگی منطقه سد گتوند علیا، مقدار شعاع پودر شده و طول ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری محاسبه شده است. با توجه به مقادیر برآورد شده مناطق تغییر شکل موم‌سان (پلاستیک) در جدول ۳ معیار تجربی اش (a, b, ۱۹۶۳) و رابطه اسن و همکاران (۲۰۰۳) به ترتیب در برآورد طول ترک‌های شعاعی (۱۱۰ سانتی‌متر) و شعاع منطقه پودر شده اطراف چال انفجار (۱۹ سانتی‌متر) که به نتایج آزمایش میدانی بسیار نزدیک است.

لرزش‌های انفجار



شکل ۳. مقطع چال انفجار و مناطق پنج‌گانه اطراف آن براساس پیشنهاد ایورسن و همکاران (۲۰۰۸).

۴ مدل‌سازی عددی آزمایش انفجار تک‌چال در توده

گلسنگی منطقه سد گوند علیا

به منظور تحلیل عددی نحوه انتشار ترک‌ها و برآورد منطقه پودر شده اطراف چال انفجاری، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده گلسنگی منطقه سد گوند علیا در نرم‌افزار المان مجزای UDEC مدل شد. تحلیل‌های دینامیکی در

این نرم‌افزار در حوزه زمان و با فرض کرنش صفحه‌ای یا تنش صفحه‌ای صورت می‌پذیرد. هر سامانه طبیعی بخشی از انرژی امواج لرزشی انتشار یافته را میرا می‌کند. تأثیر عواملی مانند بازتاب موج یا گذر از ناپیوستگی‌ها در کاهش دامنه امواج لرزه‌ای شناخته شده هستند. به‌طور کلی عواملی مانند انتشار هندسی، پراش، مسیرهای چندگانه و

جدول ۳. روابط گوناگون برآورد منطقه پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجار.

مقدار (cm)	پارامتر برآورد شده	رابطه	سال	نام محقق
۱۱۰	طول ترک‌های شعاعی	$\frac{r_{crack}}{r_h} = 25\sqrt{RBS} \times \sqrt{\frac{2.65}{\rho_r}}$	۱۹۶۳	اش
۲۹	شعاع منطقه پودر شده اطراف چال	$r_{crushed} = r_h \left(\frac{P_w}{-\frac{k}{f} + \left[\sigma_c + \frac{k}{f} \right] L^{\frac{1+f}{2f}}} \right)^{\frac{1}{2f}} \sqrt{L}$	۱۹۷۳	دروکوانی و همکاران (بر اساس معیار رفتار ایلیاشین، ۱۹۷۱)
۱۸۷	طول ترک‌های شعاعی	$r_{crack} = \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right) r_{crushed}$		
۴۱/۷	شعاع منطقه پودر شده اطراف چال	$r_{crushed} = r_h \sqrt{\frac{2\rho_e Q_{ef}}{F'_c}}$	۱۹۹۳	سولادزینسکی
۳۲/۹	شعاع منطقه پودر شده اطراف چال	$r_{crushed} = r_h \sqrt{\frac{P_w}{24\sigma_t}}$	۱۹۹۹	جرجویچ
۶۳/۴	شعاع منطقه پودر شده اطراف چال	$r_{crushed} = r_h \sqrt{\frac{P_w}{\sigma_c}}$	۱۹۹۹	کانچیوتلا و همکاران
۱۹	شعاع منطقه پودر شده اطراف چال	$r_{crushed} = 0.812 \times r_h \times (CZI)^{0.219}$ $CZI = \frac{(P_w)^3}{(S) \times \sigma_c^2}$	۲۰۰۳	اسن و همکاران

r_h شعاع چال انفجار (cm)، $r_{crushed}$ شعاع منطقه پودر شده (cm) و r_{crack} طول ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجار (cm). ρ_r چگالی توده سنگ (gr/cm^3)، ρ_e چگالی ماده منفجره (gr/cm^3)، RBS قدرت نسبی ماده منفجره نسبت به آنفو که برای امولایت ترکی برابر ۱/۲ پیشنهاد شده است، P_w فشار اعمال شده به دیواره چال انفجار (Pa)، σ_c مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ (Pa) و σ_t مقاومت کششی سنگ (Pa)، γ ثابت انبساط بی‌دررو گازها که در روابط دروکوانی و همکاران (۱۹۷۳) مقدار آن برابر ۳ پیشنهاد شده، S سختی سنگ (Pa)، CZI اندیس منطقه پودر شده اطراف چال و انرژی مؤثر ماده منفجره که برای امولایت ترکی مقدار آن $4/433 \times 10^9$ (Nmm/g) تعیین شده است.

فشنک امولایت ترکی (با قطر معادل ۵۸ میلی‌متر) به صورت جفت نشده خرج گذاری شده است. از آنجا که در آزمایش میدانی انفجار از چاشنی الکتریکی آبی استفاده شده، فرض بر آن است که انفجار ماده منفجره در سرتاسر طول ماده منفجره استوانه‌ای به صورت هم‌زمان اتفاق افتاده است. با توجه به عکس‌العمل متقابل توده سنگ و ماده منفجره در اثر بارگذاری دینامیکی حاصل از انفجار به منظور برآورد حداکثر فشار اعمال شده به دیواره چال انفجاری از رابطه نیمه تجربی لیو و تیدمان (۱۹۹۵) استفاده شده است:

$$P_{\max} = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left(\frac{\rho_r \times V_p}{\rho_e \times VOD} \right), \quad (7)$$

که ρ_e چگالی ماده منفجره (kg/cm^3)، VOD سرعت انفجار ماده منفجره (km/s)، ρ_r چگالی گل سنگ (kg/cm^3)، V_p سرعت موج تراکمی در گل سنگ (km/s) و P_{\max} حداکثر فشار دینامیکی اعمال شده بر دیواره چال انفجاری (kbar) هستند (لیو و تیدمان، ۱۹۹۵). با توجه به خصوصیات ذکر شده در جدول‌های ۱ و ۲ و رابطه نیمه تجربی لیو و تیدمان، مقدار حداکثر فشار ۸/۳۷ گیگاپاسکال برآورد می‌شود. از آنجا که قطر چال و ماده منفجره یکسان نیست این مقدار فشار باید با استفاده از رابطه ۴ به مقدار واقعی آن تصحیح شود. با توجه به محاسبات صورت گرفته، حداکثر فشار دینامیکی حاصل از انفجار اعمال شده به دیواره چال انفجار برابر ۳/۰۶ گیگاپاسکال برآورد شده است. شکل ۴ منحنی بارگذاری دینامیکی موج ضربه انفجار پیشنهادی یون و ژئون (۲۰۱۰) با مقدار حداکثر فشار ۳/۰۶ گیگاپاسکال، زمان خیز فشار ۱ میکروثانیه و زمان اُفت فشار ۹ میکروثانیه که در نرم‌افزار المان مجزای UDEC شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه در آزمایش میدانی انفجار، دستگاه‌های لرزه‌نگار در فواصل ۸ و ۱۳ متری از مرکز چال انفجار قرار داشته‌اند، به منظور جلوگیری از بروز

تغییر شکل موم‌سان عوامل اصلی میرایی امواج لرزه‌ای هستند (نوروزی و همکاران، ۱۳۸۶). در تحلیل‌های دینامیکی برای محیط کشسان یا موم‌سان عموماً از میرایی رایلی استفاده می‌شود. معادلات رایلی در این روش به شکل ترکیب خطی (C) از ماتریس‌های میرایی وابسته به جرم (M) و میرایی وابسته به سختی (K) به شکل رابطه ۵ داده می‌شود:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (5)$$

که α ضریب میرایی متناسب با جرم و β ضریب میرایی متناسب با سختی است (آیتاسکا، ۲۰۰۴).

فرایند انفجار ترکیبی پیچیده از بارگذاری‌های ناشی از موج ضربه توأم با انبساط محصولات گازی انفجار است. از آنجا که نرم‌افزار UDEC قابلیت شبیه‌سازی تمام فرایند انفجار را ندارد، فقط موج ضربه حاصل از انفجار مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی برای شبیه‌سازی بارگذاری دینامیکی موج ضربه حاصل از انفجار از رابطه پیشنهادی یون و ژئون (۲۰۱۰) استفاده شده است. یون و ژئون (۲۰۱۰) در مدل‌سازی نحوه شکست سنگ در یک تونل راه برای کنترل آسیب‌های ناشی از انفجار چال‌های محیطی از نرم‌افزار PFC^{2D} استفاده کرده و رابطه بارگذاری دینامیکی موج ضربه حاصل از انفجار را به صورت رابطه ۶ پیشنهاد کرده‌اند:

$$P(t) = P_h \frac{e^{-t}}{t_r} \times e^{\left(\frac{-t}{t_r} \right)}, \quad (6)$$

که P_h فشار اعمال شده به دیواره چال، t_r زمان خیز و t زمان اعمال فرایند بارگذاری دینامیکی موج ضربه ناشی از انفجار هستند. به منظور مدل‌سازی بارگذاری دینامیکی موج ضربه حاصل از انفجار، تپ (پالس) ضربه به صورت رابطه ۶ به شکل شعاعی یکنواخت روی دیواره چال اعمال شده است. فرض بر آن است که یک چال استوانه‌ای به قطر ۷۶ میلی‌متر به صورت قائم با نسبت طول به قطر بسیار زیاد تحت بارگذاری انفجار قرار می‌گیرد. این چال با سه

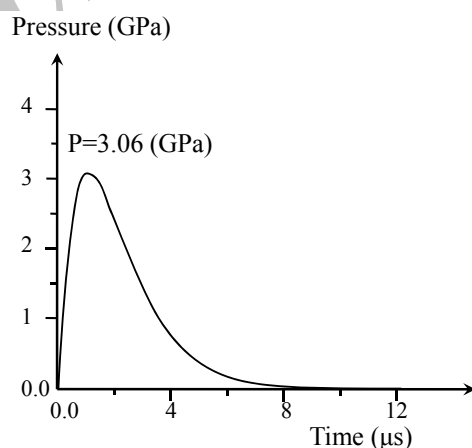
دستگاه‌های لرزه‌نگار نسبت به چال انفجاری را نشان می‌دهد.

کولمبیر و لایزمر (۱۹۷۳) روشن ساختند که برای تحلیل درست و جلوگیری از واپیچش هنگام انتشار امواج در مدل‌سازی‌های عددی، ابعاد المان‌بندی مدل باید بین ۰/۱ تا ۰/۱۲۵ طول موج منتشر شده در محیط باشد. همچنین سرعت انتشار موج تراکمی از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}}, \quad (8)$$

که K مدول حجمی (Pa)، G مدول برشی (Pa)، ρ چگالی توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا (gr/cm^3) هستند. با توجه به سرعت انتشار ۳۸۰۰ متر بر ثانیه در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا ابعاد المان‌ها ۱۶ سانتی‌متر انتخاب شده است. براین اساس تعداد المان‌ها ۶۸۶۸۰ عدد و تعداد نقاط گرهی ۳۴۷۳۶ عدد است. در شکل‌های ۶ و ۷ چگونگی انتشار جبهه موج تراکمی به ترتیب پس از گذشت ۰/۲۲۴ میلی‌ثانیه و ۳/۵ میلی‌ثانیه پس از آغاز انفجار نشان داده شده است.

خطای ناشی از شرایط مرزی ابعاد مدل 20×40 متر در نظر گرفته شده است. اما با توجه به وجود تقارن و به‌منظور کاهش حجم محاسبات، یک مقطع دو‌بعدی از میانه ارتفاع چال با ابعاد 20×20 متر در نرم‌افزار المان مجزای UDEC شبیه‌سازی شده است. با توجه به نسبت طول به قطر بسیار زیاد ماده منفجره، مسئله با فرض کرنش صفحه‌ای تحلیل شده است. مدل رفتاری استفاده شده برای محدوده مورد بررسی در این تحقیق، مدل موهر-کولمب است. معیار رفتاری موهر-کولمب به‌صورت یک سطح تسلیم بُرشی، با استفاده از پارامترهای زاویه اصطکاک و چسبندگی داخلی تعیین می‌شود. با توجه به شکل مدل هندسی و توزیع یکنواخت مش‌بندی از درزه کاذب استفاده شده است. معیار رفتاری این ناپیوستگی معیار تماس سطحی کشسان-موم‌سان موسوم به شکست لغزشی کولمب در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از بازتاب ناخواسته امواج از مرزهای جانبی و پایینی به داخل مدل، از شرایط مرزی نامحدود استفاده شده است. به‌منظور بررسی اثر بازتاب امواج از سطح آزاد، مرز بالایی مدل فاقد هرگونه محدودیتی تعیین شده است و بنا به تعریف، مانند سطح آزاد رفتار می‌کند. شکل ۵ هندسه مدل، موقعیت و ابعاد چال، شرایط مرزی و موقعیت

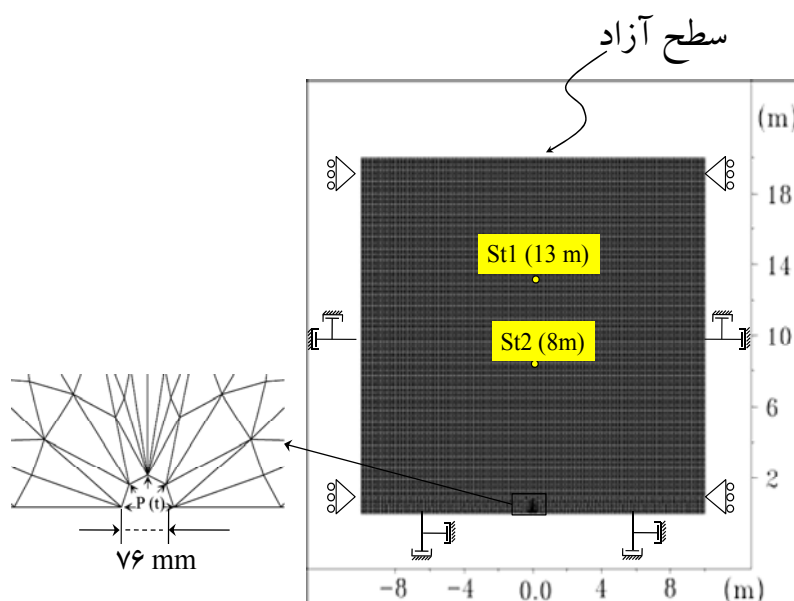


شکل ۴. منحنی پیشنهادی یون و ژنون (۲۰۱۰)، با حداکثر فشار ۳/۰۶ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان اُفت فشار ۹ میکروثانیه.

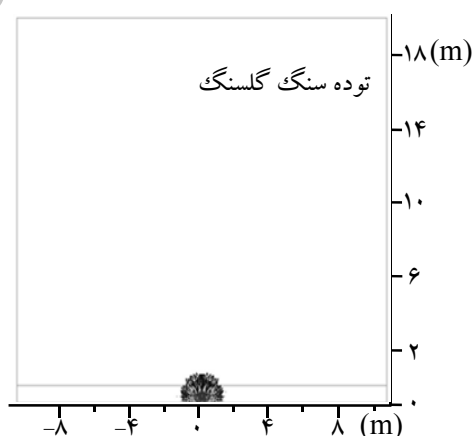
۱-۴ تغییرات جابه‌جایی ذرات

پس از انفجار ماده منفجره امولایت ترکی و انتشار موج در مدل، مقدار جابه‌جایی ذرات در فواصل ۱ تا ۱۰ متری از مرکز ماده منفجره بررسی شده است. در شکل ۸ منحنی تغییرات جابه‌جایی ذرات بر اثر انتشار جبهه موج تراکمی در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا نشان داده شده

نتایج به دست آمده از تحلیل عددی آزمایش میدانی انفجار، شامل تغییرات حداکثر سرعت ذرات نسبت به فاصله از محل انفجار، تغییرات جابه‌جایی ذرات، تغییرات تنش‌های اعمال شده به مدل بر اثر عبور جبهه موج تراکمی، چگونگی بازتاب موج از سطح آزاد و برآورد زون‌های پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری است.



شکل ۵. هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت و ابعاد چال، شرایط مرزی و موقعیت دستگاه‌های لرزه‌نگار.



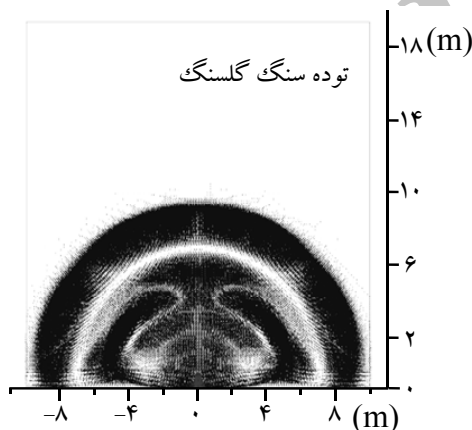
شکل ۶. موج تراکمی تولید شده اطراف چال انفجاری در زمان ۰/۲۲۴ میلی‌ثانیه از آغاز بارگذاری انفجار.

است. در شکل ۹ حداکثر سرعت ذرات در فواصل ۱ تا ۱۳ متری از مرکز تک‌چال انفجاری نشان داده شده است. نتایج برآورد تحلیل عددی حداکثر سرعت ذرات در فواصل ۸ و ۱۳ متری از مرکز چال انفجاری، با نتایج آزمایش میدانی تک‌چال انفجاری در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا انطباق مناسبی نشان می‌دهد. در جدول ۴ مقادیر حداکثر سرعت ذرات برای فواصل ۸ و ۱۳ متری حاصل از تحلیل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش میدانی آورده شده است.

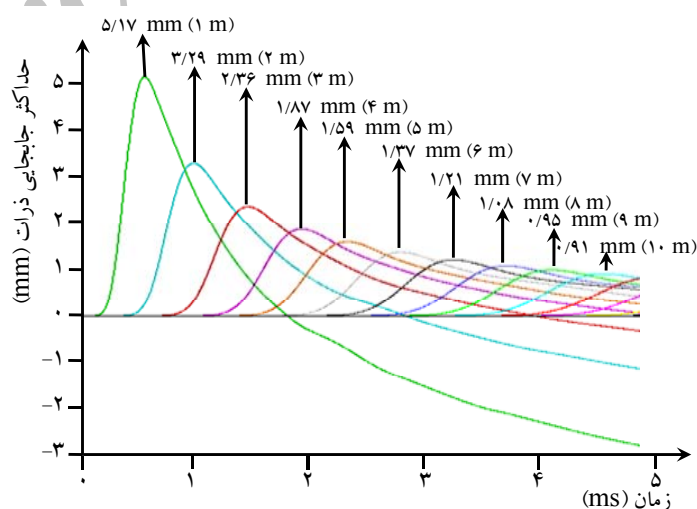
است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش فاصله از منبع موج، دامنه حداکثر جابه‌جایی ذرات به‌صورت نمایی کاهش یافته است و فقط در سطح آزاد، به علت بازتاب موج، روند میرایی دامنه موج کاهش می‌یابد.

۲-۴ تغییرات حداکثر سرعت ذرات

به‌منظور صحت سنجی مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش میدانی انفجار از عامل حداکثر سرعت ذرات استفاده شده



شکل ۷. انتشار موج تراکمی حاصل از انفجار ماده منفجره امولایت در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا در زمان ۳/۵ میلی‌ثانیه از آغاز بارگذاری انفجار.

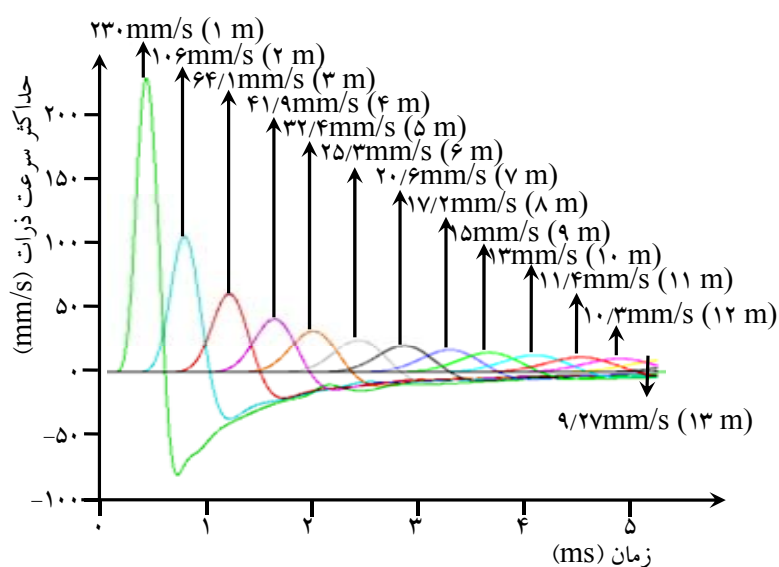


شکل ۸. روند تغییرات جابه‌جایی ذرات در فاصله ۱ تا ۱۰ متری از مرکز انفجار.

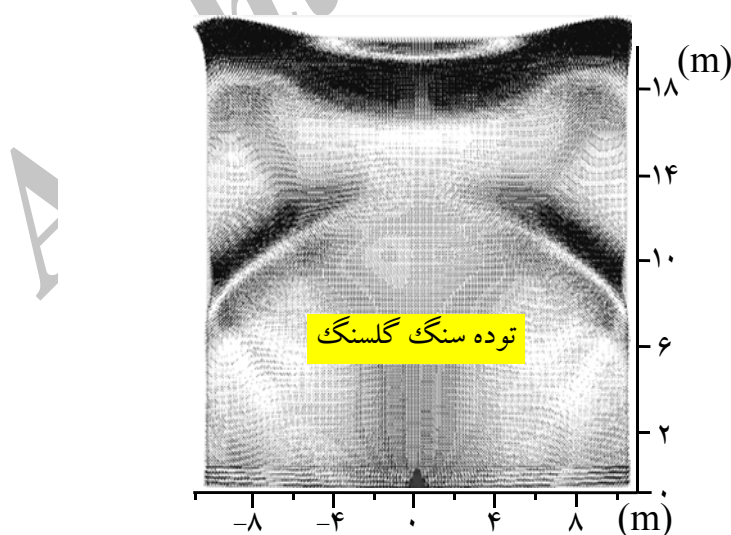
۳-۴ تغییرات تنش‌های اعمال شده در مدل

در شکل ۱۰ نحوه بازتاب جبهه موج فشاری ناشی از انفجار تک‌چال از سطح آزاد و در شکل ۱۱ تغییرات تنش‌های فشاری اعمال شده در اثر برخورد و بازتاب موج تراکمی انفجار از سطح آزاد نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار حداکثر تنش‌های

فشاری در سطح آزاد ۲۶۴۰ پاسکال بوده که در اثر بازتاب از سطح آزاد به تنش‌های کششی با مقدار حداکثر ۳۵۸۰ پاسکال تبدیل شده است. از آنجا که این مقادیر بسیار کمتر از مقدار مقاومت‌های کششی و فشاری توده سنگ هستند، تغییر شکل‌های ناشی از برخورد جبهه موج تراکمی با سطح آزاد و بازتاب آن در محدوده کشسان قرار دارد.



شکل ۹. تغییرات حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۱ تا ۱۳ متری از مرکز انفجار.

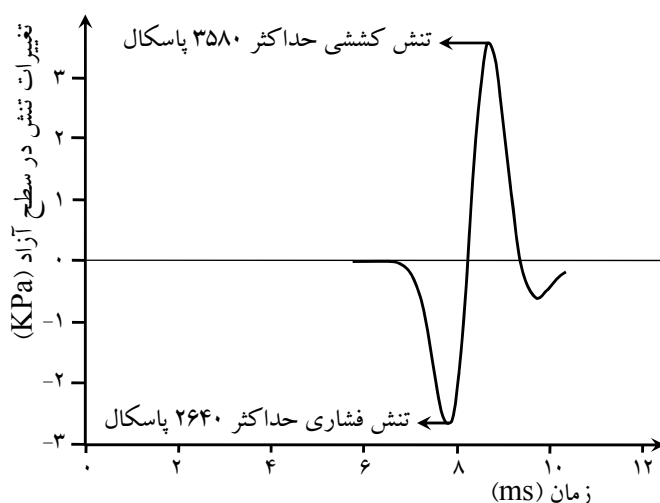


شکل ۱۰. بازتاب جبهه موج فشاری ناشی از انفجار از سطح آزاد در فاصله ۲۰ متری از مرکز انفجار پس از ۹/۲ میلی‌ثانیه.

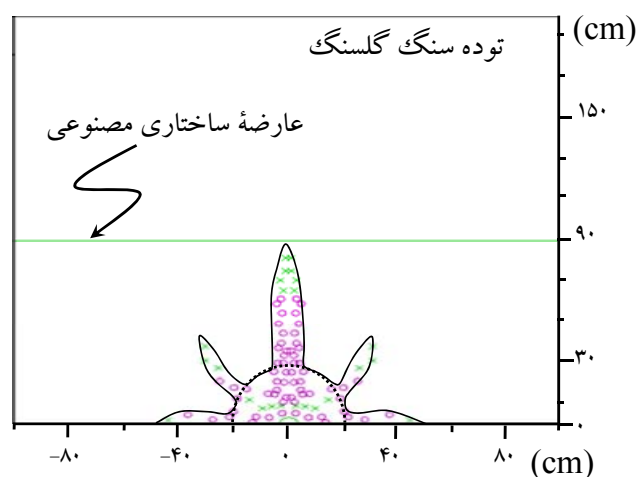
۴-۴ برآورد مناطق پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری

انفجار ماده منفجره در توده سنگ عموماً با ایجاد تغییر شکل‌های موم‌سان در محدوده اطراف چال و گسترش ترک‌های شعاعی اطراف آن همراه است. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است پس از انفجار توده سنگ

اطراف چال به مناطق کاملاً موم‌سان، منطقه ترک‌های شعاعی و کشسان با لرزش‌های ناشی از انفجار تقسیم می‌شود. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که شعاع منطقه پودر شده اطراف چال انفجار و ترک‌های شعاعی به ترتیب برابر ۲۰ سانتی‌متر و ۹۰ سانتی‌متر برآورد می‌شود که انطباق مناسبی با نتایج آزمایش میدانی انفجار دارد.



شکل ۱۱. تغییرات تنش فشاری به کششی در اثر بازتاب از سطح آزاد در فاصله ۲۰ متری از مرکز انفجار.



شکل ۱۲. منطقه پودر شده و ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری به ترتیب با شعاع ۲۰ و ۹۰ سانتی‌متر در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا.

جدول ۴. مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایش میدانی برای لرزش حاصل از انفجار تک‌چال انفجاری در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا.

شماره ایستگاه	وزن ماده منفجره (kg)	فاصله (m)	حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده (mm/s)	حداکثر سرعت ذرات در تحلیل عددی (mm/s)
۱	۱	۸	۱۷/۲۲	۱۷/۲
۲		۱۳	۹/۰۵	۹/۲۷

۵ نتیجه‌گیری

استفاده کرد. براساس نتایج این بررسی استفاده از روش عددی المان مجزا در برآورد نتایج انفجار مانند تغییر شکل‌های موم‌سان و لرزش‌زمین دقت و صحت زیادی دارد.

منابع

نوروزی، غ.، غفوری آشتیانی، م.، جوان دولوئی، غ. و مختاری، م.، ۱۳۸۶، تعیین وابستگی امواج S و P در ناحیه مشهد، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱، ۲۱-۳۵.
کازمی، م.، قاسم‌العسکری، م. ک. و جواهریان، ع.، ۱۳۸۸، مدل‌سازی لرزه‌ای محیط‌های همسانگرد صوتی و صوتی گرانرو در حیطه τ -p، مجله ژئوفیزیک ایران، ۳(۱)، ۳۳-۴۳.

به‌منظور بررسی اثرات ناشی از انفجار در توده گلسنگی منطقه سد گتوند علیا، آزمایش میدانی انفجار تک‌چال اجرا و نتایج آن شامل شعاع مناطق پودر شده، طول ترک‌های شعاعی اطراف چال و لرزش‌های ناشی از انفجار اندازه‌گیری و ثبت شد. در این آزمایش چال انفجاری به قطر ۷۶ میلی‌متر و عمق ۲ متر حفر شده است. شعاع منطقه پودر شده و طول ترک‌های شعاعی این چال به ترتیب برابر ۲۵ و ۹۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده و با روابط تجربی برآورد مناطق اطراف چال انفجاری مقایسه شده است. لرزش‌های این انفجار در فواصل ۸ و ۱۳ متری از مرکز چال انفجار به ترتیب برابر ۱۷/۲۲ و ۹/۰۵ میلی‌متر بر ثانیه ثبت شده است. از بین روابط و معیارهای تجربی پیش‌بینی تغییر شکل‌های موم‌سان اطراف چال انفجار، معیار تجربی «اش» (Ash, 1963a, b) و رابطه اسن و همکاران (۲۰۰۳) به ترتیب در برآورد طول ترک‌های شعاعی و شعاع منطقه پودر شده اطراف چال انفجار دقت بیشتری را نشان می‌دهند. در تحلیل عددی تک‌چال انفجاری شعاع منطقه پودر شده و طول ترک‌های شعاعی به ترتیب برابر ۲۰ و ۹۰ سانتی‌متر و لرزش‌های حاصل از انفجار در فواصل ۸ و ۱۳ متری به ترتیب برابر ۱۷/۲ و ۹/۲۷ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شده که انطباق مناسبی با نتایج آزمایش میدانی انفجار دارد. با توجه به دقت زیاد روش عددی در برآورد شعاع مناطق تغییر شکل موم‌سان و میزان لرزش‌های ناشی از انفجار تک‌چال، می‌توان در موارد مشابه از نتایج آن

- Ash, R. L., 1963a, The Mechanics of Rock Breakage (Part 1). Pit and Quarry, 56(2), 98-100.
Ash, R. L., 1963b, The Mechanics of Rock Breakage (Part 2), Standards for Blasting Design. Pit and Quarry, 56(3), 118-122.
Atchison, T. C., Duvall, W. I. and Pugliese, J. M., 1964, Effect of decoupling on explosion generated strain pulses in rock. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines (USBM).
Cook, M. A., 1956, Theory and new developments in explosives for blasting. 6th Annual Drilling and Blasting Symposium, University of Minnesota, 31-44.
Djordjevic, N., 1999, Two-component of blast fragmentation. Proceedings of the 6th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-6, Johannesburg, South Africa: South African Institute of Mining and Metallurgy, 9-213.
Drukovanyi, M. F., Komir, V. M., Myachina, N. I., Rodak, S. N. and Semenyuk, E. A., 1973, Effect

- Kanchibotla, S. S., Valery, W. and Morrell, S., 1999, Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. Proceedings of Explo'99—A Conference on Rock Breaking Kalgoorlie, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 44-137.
- Konya, C. J. and Walter, E. J., 1991, Rock Blasting and Overbreak Control. National Highway Institute, Virginia.
- Kuhlmeyer, R. L. and Lysmer, J., 1973, Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. Journal of Soil Mechanics and Foundations, 421-427.
- Liu, Q. and Tidman, P., 1995, Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blast hole. Retrieved from Canmet Mrl Experimental Mine: <http://www.nrcan.gc.ca>.
- Moore, A. J., Evans, R. and Richards, A. B., 1993, An elliptical airblast attenuation model. Proceedings of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting – Fragblast-4, Vienna, Austria, 247-252.
- Nicholls, H. R., 1964, A case study of the validity of scaling laws for explosion-generated motion. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines (USBM).
- Roth, J., 1979, A Model for the Determination of Flyrock Range as a Function of Shot Condition. Los Altos: U.S. Bureau of Mines (USBM).
- Sharpe, J. A., 1942, The Propagation of Elastic Waves by Explosives Pressure. Geophysics, 7, 144-154.
- Starfield, A. M. and Pugliese, J. M., 1974, Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 5, 65-77.
- Szuladzinski, G., 1993, Response of rock medium to explosive borehole pressure. Proceedings of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-4, Vienna, Austria, 17-23.
- Vovk, A. A., Mikhalyuk, A. V. and Belinskii, I. V., 1973, Development of Fracture Zones in Rocks During Camouflet Blasting. Mining Science, 9(4), 383-387.
- Yoon, J. and Jeon, S., 2010, Use of a Modified Particle-Based Method in Simulating Blast-Induced Rock Fracture". Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-9, London: Taylor and Francis Group, 371-380.
- of the Charge Diameter and Type of Explosive on the Size of the Overcrushing Zone During an Explosion. Mining Science, 500-506.
- Duvall, W. I., 1953, Strain-wave Shapes in Rock near Explosion. Geophysics, 18, 310-326.
- Duvall, W. I. and Petkof, B., 1959, Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines (USBM).
- Esen, S., Onederra, I. and Bilgin, H. A., 2003, Modeling the size of crushed zone around a blast hole. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 40(4), 485-495.
- Fourney, W. L., 1983, Gas Well Stimulation Studies. In H. P. Rossmanith (Ed.), Rock fracture mechanics. Verlag: Springer.
- Graff, K., 1975, Wave Motion in Elastic Solids. Oxford: Clarendon Press.
- Hagan, T. N., 1983, The Influence of Controllable Blast Parameters on Fragmentation and Mining Costs. Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-1, Lulea, Sweden, 31-51.
- Heynrich, J., 1979, The Dynamics of Explosion and Its Use. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Hino, K., 1956, Fragmentation of Rock through Blasting. Journal of the industrial explosive society, 17(1), 2-11.
- Hustrulid, W., 1999, Blasting Principles for Open Pit Mining (Vol. 1). Balkema, Rotterdam.
- Hustrulid, W. A. and Johnson, J. C., 2008, A Gas Pressure-based Drift Round Blast Design Methodology. In H. Schunnesson, and E. Nordlund (Ed.), 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining Sweden, Lulea: Lulea University of Technology, 657-669.
- Ilyushin, A. A., 1971, The mechanics of a continuous medium (in Russian). Moscow: Izd-vo MGU.
- Itasca Consulting Group, Inc., 2004, Universal Distinct Element Code, Version 4, 01. Minneapolis, Minnesota.
- Iverson, S. R., Hustrulid, W. A., Johnson, J. C., and Akbarzadeh, Y., 2010, The Extent of Blast Damage from a Fully Coupled Explosive Charge. Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-Fragblast-9 London: Taylor and Francis Group, 459-468.
- Iverson, S., Kerkering, C. and Hustrulid, W., 2008, Application of the NIOSH-Modified Holmberg-Persson Approach to Perimeter Blast Design. Proceedings of the 34th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, New Orleans, Louisiana, January, 27-31.