

## مدل ریاضی برای برآورد لرزش ناشی از انفجار در معدن

مس سرچشمه کرمان

محمد فاروق حسینی

استادیار گروه مهندسی معدن - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

عبدالرحیم جواهریان

دانشیار گروه فیزیک زمین - مؤسسه ژئوفیزیک - دانشگاه تهران

مهدی پورقاسمی ساغند

مریی دانشکده مهندسی معدن - دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت ۷۹/۴/۶، تاریخ تصویب ۸۱/۴/۱)

### چکیده

لرزش زمین ناشی از انفجار در معادن از جمله مباحثی است که پژوهشگران مختلف در جهت چگونگی و پیش‌بینی آن مطالعات زیادی انجام داده‌اند. مدل‌های ریاضی ارائه شده از طرف این افراد از نتایج مهم این مطالعات است که در این نوشتار، اصول این مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و کاستی‌های آنها مشخص شده‌است. با استفاده از داده‌های واقعی مدل ریاضی تجربی جدیدی پیشنهاد شده است که با تغییراتی نسبت به مدل‌های قبلی از نظر بعضی پارامترهای ورودی همراه است. مبنای این بررسی و مدل ارائه شده تجزیه و تحلیل ۱۴ انفجاری است که در معدن مس سرچشمه انجام و داده‌های حاصل از آنها توسط لرزه‌نگارها ثبت شده است. در مدل پیشنهادی به جای عامل میزان خرج منفجر شده در هر تأخیر از میزان خرجی که لرزش حاصل از آن در محدوده زمانی معین به محل ثبت می‌رسد استفاده شده و محدوده زمانی مناسب برای این معدن نیز برابر ۱۰ میلی ثانیه به دست آمده است. نتایج حاصل از کاربرد مدل پیشنهادی و سایر مدل‌های

موجود با مقادیر واقعی ثبت شده مقایسه شده است. این مقایسه به خوبی نشان می دهد که کارآیی مدل جدید به مراتب بهتر از مدل های پیشین است.

**واژه های کلیدی:** لرزش زمین، شبیه سازی لرزش، معدن مس سرچشمه، مدل ریاضی لرزش زمین، تاخیر در انفجار

### مقدمه

هریک از این محققین مدل های خود را برای معدن، منطقه یا حالت خاصی ارائه داده اند که به عنوان مثال کنیا [۸] برای معادن روباز مس پرفیری، هولمبرگ [۸] برای توده های سنگی سخت، اچترلانی، نی و نیبرگ [۸] برای معادن روباز مس و پالروی [۱۰] برای معادن روباز و زیرزمینی، از این دسته محققین می باشند. عده ای دیگر نیز تحقیقات خود را بر روی کمینه سازی مقدار لرزش متمرکز کرده اند که از این میان می توان از جوردویچ [۶] نام برد.

عموماً بهترین راه برای بررسی وضعیت لرزش زمین ناشی از انفجار، ثبت لرزش های ناشی از انفجارهای یک معدن بوسیله لرزه نگارهاست. براساس داده های لرزه ای ثبت شده می توان وضعیت لرزش را بررسی کرد و همچنین یک مدل ریاضی برای معدن

لرزش زمین یکی از پیامدهای نامطلوب انفجار در معادن روباز است که علاوه بر اینکه مقدار زیادی از انرژی انفجار (حدود ۴۰ درصد) را به خود اختصاص می دهد، باعث ایجاد مزاحمت برای افراد و تخریب سازه ها و دیواره های معدن می شود [۱]. این اثرات باعث شده اند تا تحقیقات زیادی به روی پدیده لرزش انجام شود. هاگن و کندی [۸] و ماتیو [۸] بر روی اثر نوع ماده منفجره، بلیر و جیانگ [۵] بر روی اثر طول خرج و سینگ و فوگت [۱۲] بر روی اثر جهت شروع انفجار بر پدیده لرزش تحقیق کرده اند. پژوهشگران دیگری درصدد پیش بینی شدت لرزش زمین برآمده و سعی کرده اند تا با ارائه مدل های ریاضی مختلف براساس عوامل مؤثر بر لرزش، میزان آنرا پیش بینی کنند.

کانسنگ این معدن به صورت مس و مولیبدن پرفیری است که بصورت پراکنده و رگچه ای یافت می شود. بطور کلی کانسار مس سرچشمه به سه منطقه اکسید، سوپروژن و هیپوژن تقسیم می شود [۴].

میزان ذخیره معدن ۱/۲ میلیارد تن می باشد و به روش پله ای و روباز استخراج می شود. چالزنی در این معدن توسط هشت دستگاه حفاری با قطر ۲۰۰، ۲۲۹ و ۲۵۰ میلی متر انجام می شود. آرایش چالها اکثراً به صورت لوزی است و شبکه هایی که به کار می رود با توجه به جنس سنگ متفاوت است. شبکه ۶/۵ متر در ۸/۵ متر برای سنگهای سخت ( اکثراً باطله ) ، شبکه ۷ متر در ۹ متر برای سنگهای متوسط و شبکه ۷/۵ متر در ۹/۵ متر برای سنگهای نرم استفاده می شود. ارتفاع پله ها حدود ۱۲/۵ متر اضافه حفاری ۲/۵ متر می باشد که در مجموع عمق چالها حدود ۱۵ متر است. در هر انفجار بین ۳۰ تا ۸۰ چال منفجر می شود. مواد منفجره مصرفی آنفو، امولان، دینامیت و فتیله انفجاری است و تاخیرهای مصرفی عموماً ۹، ۱۷، ۲۵، ۳۵ و ۶۵ میلی ثانیه می باشد. سیستم آشکارسازی غیر برقی و با استفاده از کرتکس انجام می شود. میزان

مورد نظر بدست آورد. یکی دیگر از راههای بررسی لرزش انفجار، شبیه سازی لرزش است که بر اساس انفجارهای تک چال صورت می گیرد [۱۳]. در این مطالعه سعی شده است تا بعضی از مسائل مربوط به روابط تجربی مورد بررسی قرار گیرد و همچنین بررسی لرزش به وسیله شبیه سازی نیز تحلیل شود. در نهایت نیز با در نظر گرفتن این دو روش یک مدل ریاضی پیشنهاد شود تا نتایج حاصل از آن مناسبتر باشد. تمام بحثها و مطالب این مطالعه بر اساس انفجارهای معدن مس سرچشمه می باشد.

### معدن مورد مطالعه

معدن مس سرچشمه کرمان در ۱۶۰ کیلومتری غرب کرمان، ۵۰ کیلومتری جنوب رفسنجان در عرض جغرافیای ۳۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۶/۱ درجه شرقی قرار دارد. قدیمی ترین سنگ درونگیر این کانسار آندزیت های ائوسن بوده و سنگ مینرالیزه دیگر استوک گرانودیوریتی سرچشمه است. سنگهای باطله، دایکهای گرانودیوریتی شامل هورنبلند پرفیری، فلدسپار پرفیری و بیوتیت پرفیری می باشد.

مؤلفه مماسی عمود بر این امتداد قرار داشت. ثبت نیز بگونه‌ای انجام شده است که اندک زمانهایی در حدود چند ثانیه قبل و بعد از انفجار نیز توسط دستگاه اخذ شود. برای بررسی لرزشها از پارامتر حداکثر سرعت ذرات استفاده شده است که بر حسب میلیمتر بر ثانیه می‌باشد. به منظور بررسی لرزش در یک نقطه باید برآیند حداکثر سرعت ذرات بدست آید که اینکار بر اساس حداکثر سرعت ذرات سه مؤلفه ثبت شده انجام می‌شود. هرچند برای به دست آوردن این پارامتر باید لرزه‌نگاشتهای سه مؤلفه را جمع کرد و حداکثر سرعت ذرات برآیند را به دست آورد ولی روشی که اکثر افراد بکار گرفته‌اند استفاده از فرمول زیر است [۷].

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_V^2 + V_T^2} \quad (1)$$

که در آن،  $V$  برآیند حداکثر سرعت ذرات،  $V_R$  مؤلفه شعاعی حداکثر سرعت ذرات،  $V_V$  مؤلفه قائم حداکثر سرعت ذرات،  $V_T$  مؤلفه مماسی حداکثر سرعت ذرات، بر حسب  $(mm/s)$  می‌باشند [۷].

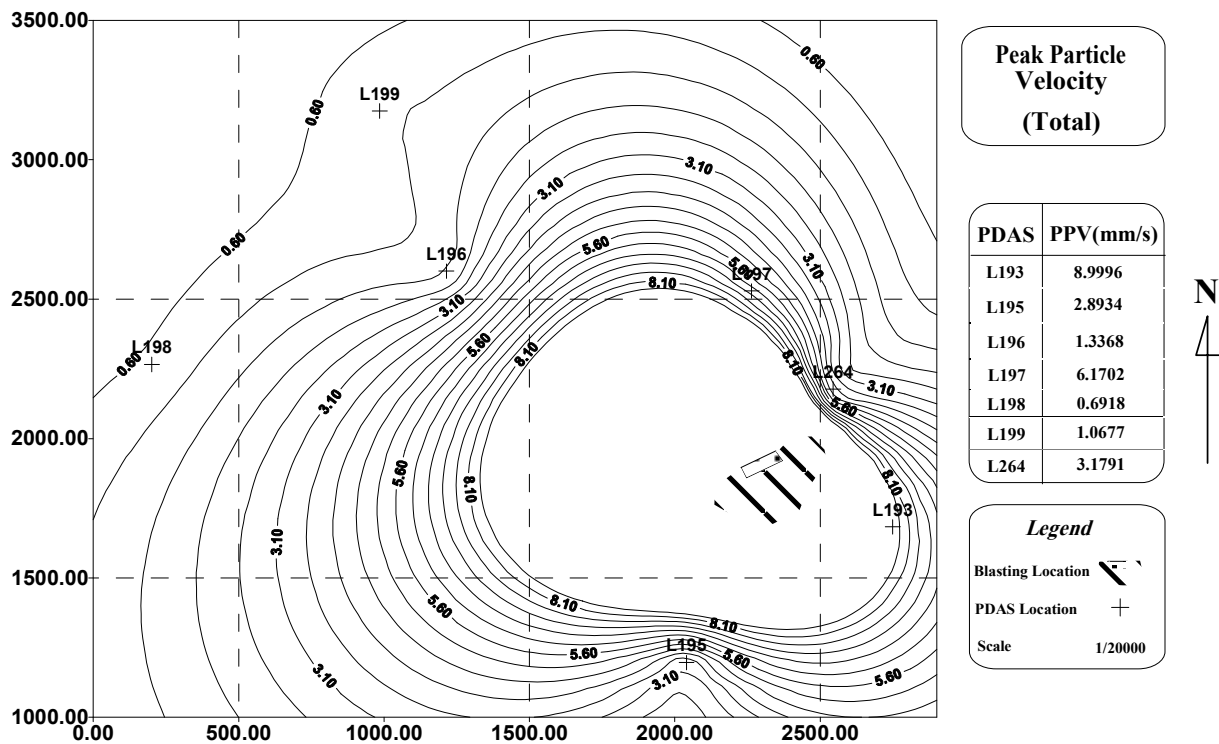
خرج در هر چال حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم می‌باشد [۳]. انفجارهای انجام شده در این معدن که لرزش آنها ثبت شده اکثراً در بلوکهای کانسنگ بوده است ولی اغلب رگه های دایک نیز در آنها وجود داشته است.

### ثبت و پردازش داده‌ها

به منظور بررسی وضعیت لرزش در معدن مس سرچشمه، لرزش ناشی از ۱۴ انفجار در شرایط گوناگون توسط ۶ تا ۸ دستگاه لرزه نگار ثبت شده است که در شکل (۱) موقعیت دستگاههای لرزه‌نگار نسبت به بلوک انفجاری، برای یکی از این انفجارها ارائه شده است. از تعداد ۱۴ انفجار، ۱۱ انفجار به صورت چندردیفی با تعداد چالهای زیاد و ۳ انفجار بقیه بصورت یک انفجار تک چالی و دو انفجار دو چالی بودند. ثبت لرزشها توسط دستگاه لرزه نگار PDAS100 همراه با لرزه‌سنج سه مؤلفه ای L-4C انجام شده است. لرزه‌سنجها در سه جهت قائم، شعاعی و مماسی بگونه‌ای نصب شدند که مؤلفه شعاعی در امتداد موقعیت انفجار به موقعیت لرزه‌سنج و

مربوط به بالا بردن مقادیر محاسبه شده رفع می‌شود. در شکل (۱) نمونه‌ای از پربندهای حداکثر سرعت ذرات مربوط به یکی از انفجارهای ثبت شده در معدن مس سرچشمه همراه با موقعیت لرزه نگارها در اطراف بلوک انفجاری ارائه شده است.

در این روش برآیند بدست آمده دارای مقداری بیشتر از حد واقعی خواهد بود که می‌توان به عنوان ضریب اطمینان در نظر گرفت [۷]. ولی بطور کلی چون در تمام محاسبات، از جمله محاسبات مربوط به داده‌های واقعی و در نتیجه ارائه مدل براساس این محاسبات از این روش استفاده می‌شود خود بخود تا حدودی مشکل



شکل ۱: پربندهای برآیند حداکثر سرعت ذرات همراه با موقعیت دستگاههای لرزه‌نگار در اطراف بلوک انفجاری مربوط به انفجار شماره ۸۱ در معدن مس سرچشمه [۳].

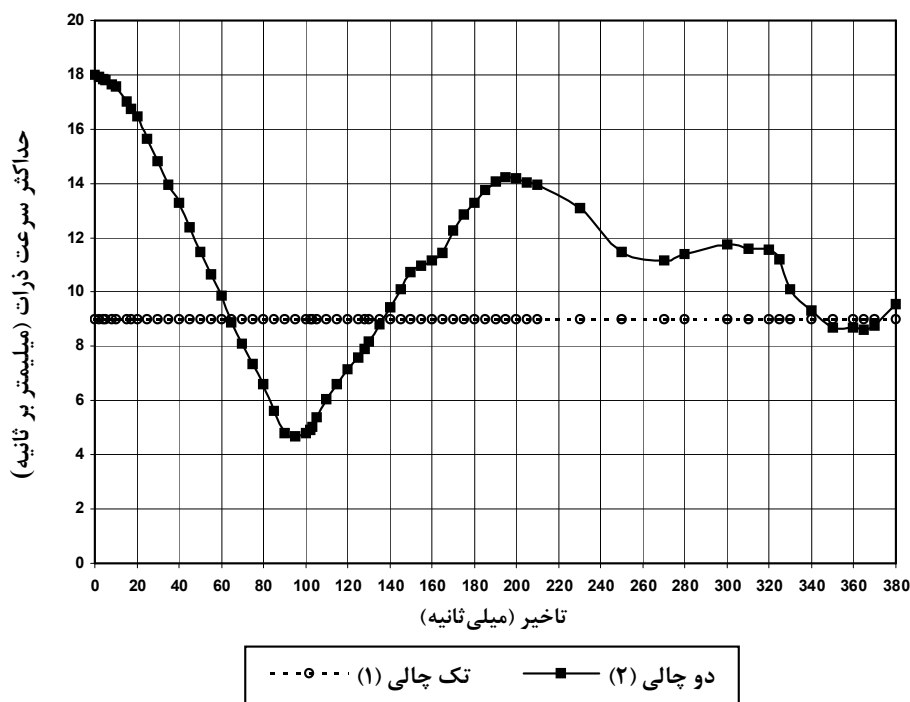
### شبیه سازی لرزش

از انفجارهای ثبت شده در معدن مس سرچشمه یک انفجار بصورت تک چال و دو انفجار بصورت دو چال باتاخیرهای ۲۵ و ۶۵ میلی ثانیه انجام شده است. لرزش ناشی از انفجار تک چال توسط ۷ دستگاه لرزه نگار سه مؤلفه ای ثبت شده است که در مجموع ۲۱ لرزه نگاشت از این انفجار ثبت شده است. در ابتدا بمنظور بررسی صحت شبیه سازی، براساس لرزش انفجار تک چال برای انفجارهای دو چال باتاخیر ۲۵ و ۶۵ میلی ثانیه کار شبیه سازی با استفاده از روش هم آمیخت انجام شد و نتایج با لرزه نگاشتهای ثبت شده از انفجار دو چال مقایسه و صحت شبیه سازی تأیید شد. پس از آن شبیه سازی برای انفجارهای دوچالی و نیز تک ردیفی با تعداد ۵، ۱۰

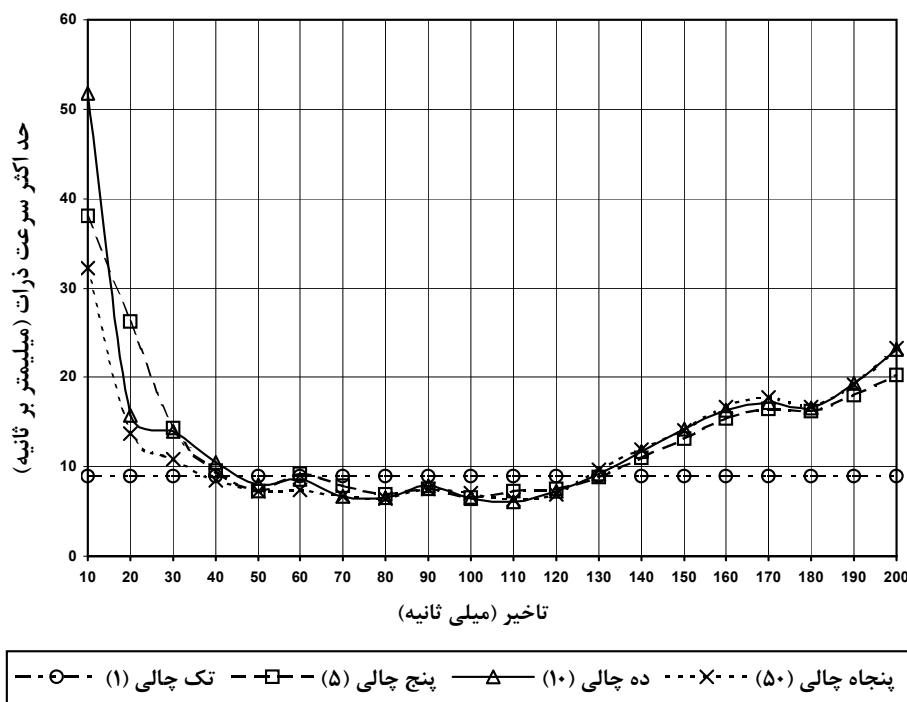
و ۵۰ چال با تأخیرهای مختلف و متعاقب آن برای انفجارهای چند ردیفی با سه الگوی متفاوت انجام شد که یک نمونه از نمودارهای مربوط به شبیه سازی دو چالی در شکل (۲) و یک نمونه مربوط به شبیه سازی لرزش ناشی از انفجار تک ردیفی در شکل (۳) ارائه شده است. همچنین تأثیر پارامترهایی از قبیل جهت شروع انفجار و راستای محل دریافت لرزش نسبت به محل انفجار نیز به صورت پارامترهای تاخیری کمی شده و بر نتایج شبیه سازی لرزش انفجارها اعمال شده است [۳].

### مدلهای ریاضی پیش بینی لرزش

پایه و اساس اکثر روابطی که تاکنون برای پیش



شکل ۲: نتایج مربوط به برآیند حداکثر سرعت ذرات لرزه‌نگاشت‌های حاصل از شبیه‌سازی انفجار دو چال بر اساس لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده توسط لرزه‌نگار شماره ۱۹۳ در انفجار تک چال بلوک انفجاری شماره ۸۱ در معدن مس سرچشمه کرمان [۳].



شکل ۳: مقایسه نتایج مربوط به برآیند حداکثر سرعت ذرات حاصل از شبیه‌سازی لرزش حاصل از انفجار تک‌ردیفی ۵،۱۰ و ۵۰ چال براساس سه مؤلفه لرزه‌نگاشت ثبت شده توسط لرزه‌نگار شماره ۱۹۳ در انفجار تک‌چال بلوک انفجاری شماره ۸۱ در معدن مس سرچشمه کرمان [۳].

از محل انفجار (m) و  $b, a, k$  ضرایب می باشند [۸].

بطور کلی روش یافتن مدلها یا به عبارتی ضرایب مربوط به روابط پیش‌بینی لرزش در اکثر اوقات یکسان بوده و بصورت تحلیل نتایج انفجارهای مختلف در یک منطقه انجام می‌شود. با انجام انفجارهای مختلف در یک منطقه و ثبت لرزشهای

بینی لرزش ارائه شده‌اند رابطه عمومی زیر می‌باشد.

$$PPV = K \times (Q)^a \times (DS)^b \quad (2)$$

که در آن:  $PPV$  حداکثر سرعت ذرات ( $mm/s$ ) ،  $Q$  حداکثر خرج منفجر شده در یک تاخیر ( $kg$ ) ،  $DS$  فاصله محل ثبت تا



لرزش در راستاهای مختلف و تاثیر این مقادیر در هنگام ایجاد روابط، اعمال شده است ولی در روابط ایجاد شده تغییری بمنظور تاثیر دادن این دو پارامتر برای بدست آوردن لرزش در نقاط جدید وارد نشده است. اثر تغییر راستای محل ثبت لرزش نسبت به محل انفجار بر لرزش برای یک نقطه با فاصله ثابت تا محل انفجار در مورد یکی از انفجارهای معدن مس سرچشمه شبیه سازی شده است

که نتیجه آن در شکل (۴) ارائه شده است.

شکل (۴) نشان می دهد با تغییر راستا، مقدار لرزش نیز تغییرات قابل توجهی دارد. یکی از نقاط ضعف روابط تجربی موجود، غفلت در مورد اثر همین عامل می باشد. از جمله مسائل دیگری که در مورد مدل‌های ریاضی مطرح است، اثر مستقیم تأخیر بر لرزش است که اینکار در مدل‌های ریاضی به صورت غیرمستقیم منظور شده است. بدین صورت که اثر تأخیر به صورت میزان خرج منفجر شده در هر تأخیر اعمال شده است حال اینکه با توجه به شکل (۲) و (۳) ملاحظه می شود با ثابت بودن فاصله و حداکثر خرج منفجر شده در هر تأخیر با تغییر تأخیر بین چالها میزان لرزش تغییر

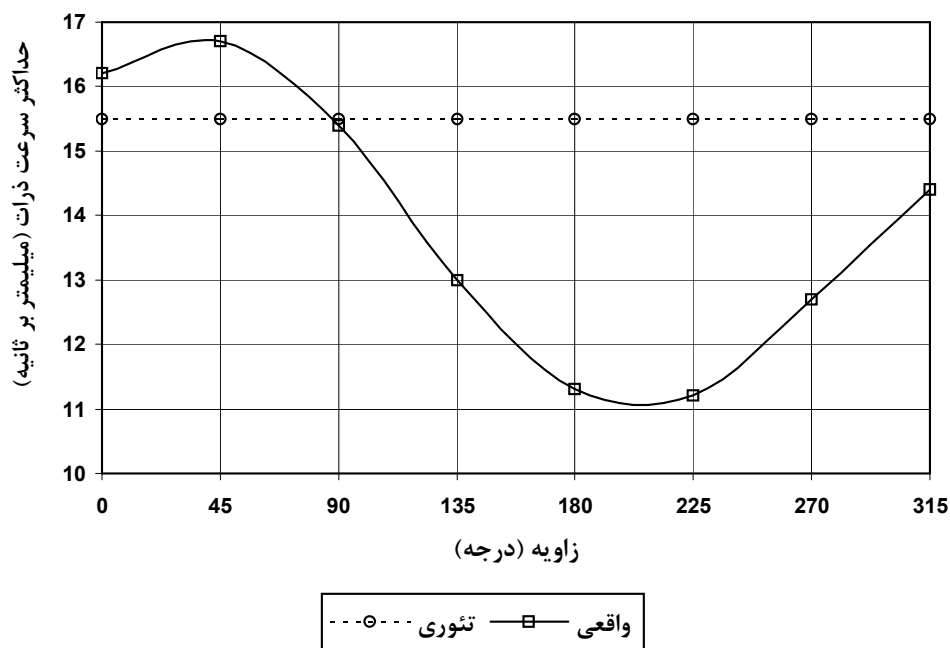
حاصل از آنها، داده‌های لازم برای بدست آوردن ضرایب حاصل می شوند. این نکته حائز اهمیت است که انفجارهای مختلف دارای پارامترهای آتشکاری متفاوتی می باشند. تاثیر این پارامترها در انفجارهای متفاوت بصورت اختلاف در میزان لرزشهای ثبت شده از هر انفجار ظاهر می گردد. همانطور که در رابطه (۲) نیز ملاحظه می شود پارامترهای تعیین کننده در این مدلها فاصله محل ثبت از محل انفجار و حداکثر خرج منفجر شده در هر تأخیر می باشد. غیر از این دو پارامتر در بعضی مدل‌های ارائه شده برخی پارامترهای دیگر نیز تاثیر داده شده اند ولی اکثر روابط بر پایه همین دو پارامتر ارائه شده است. یکی از مسائلی که در مورد آنها مطرح است همین تاثیر ندادن پارامترهای دیگر در مدل است. بعضی از این پارامترها قابل صرف نظر کردن می باشند ولی بعضی از آنها تاثیر زیادی بر میزان لرزش دریافت شده در یک نقطه دارند. از جمله این عوامل که تاثیر بسزایی بر لرزش دارند، راستای محل دریافت لرزش نسبت به محل انفجار و جهت شروع انفجار است. اثر این دو عامل در روابط و مدل‌های ریاضی تنها بصورت ثبت

شد این سؤال پیش می‌آید که آیا راهی برای رفع این مسائل و رسیدن به رابطه‌ای که تأثیر عوامل مختلف در آن لحاظ شده باشد وجود دارد یا نه؟ با توجه به نتایج کار شبیه سازی و مقایسه‌های انجام شده ملاحظه شد که استفاده از شبیه سازی برای پیش بینی لرزش در مورد انفجارهای تک ردیفی و انفجارهای با تعداد چال کم نتایج مناسبتری دارد. در این روش عامل تأخیر تأثیر خود را بر لرزش به صورت مؤثرتری اعمال می‌کند. از طرفی با توجه به شکل (۳)، کمتر شدن مقدار لرزش مربوط به انفجار چندین چال نسبت به لرزش حاصل از انفجار تک چال به وسیله شبیه‌سازی قابل توجیه است. در مورد انفجارهای چندردیفی این مسئله دارای اهمیت بیشتری است.

می‌کند که این تغییرات نیز به وسیله روابط تجربی قابل توجیه نمی‌باشد. بدین علت باید راهی یافت که بتوان در آن تأثیر تأخیر را به خوبی اعمال کرد. از طرفی وارد کردن یک عامل تحت عنوان تأخیر به صورت مستقیم در مدل‌های ریاضی کار مشکلی است زیرا تغییرات لرزش با توجه به تغییرات تأخیر دارای نوسانهای زیاد است و نمی‌توان آنرا به صورت یک مدل ریاضی ارائه داد. بنابراین باید حداقل راهی یافت که بتوان پارامتر تأخیر را در هنگام استفاده از رابطه برای پیش بینی لرزش بر نتایج حاصله تأثیر داد.

### پیشنهاد یک مدل ریاضی

با توجه به مطالبی که در مورد روابط پیش بینی لرزش و مسائل مربوط به آنها مطرح



شکل ۴: نتایج حاصل از تأثیر زاویه قرارگیری محل ثبت لرزه نسبت به محل انفجار بر روی برآیند حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار (فاصله محل ثبت از محل انفجار برابر ۶۴۰ متر و زاویه قرارگیری محل ثبت نسبت به راستای سطح آزاد بلوک انفجاری و در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت در نظر گرفته شده است) [۳].

داشت این است که باید رابطه بگونه ای باشد که در هنگام استفاده از آن بتوان عوامل مهم را تأثیر داد. بدین ترتیب براساس لرزه‌نگاشتهای ثبت شده از انفجار تک چال رابطه (۳) برای معدن مس سرچشمه به دست آمده است.

$$PPV = 1675.5 \times (Q)^{0.8434} \times (DS)^{-1.6822}$$

(۳)

بر این اساس یکی از راههایی که می‌توان پیشنهاد کرد این است که به جای استفاده از نتایج انفجارهای با تعداد چالهای زیاد، تأخیرهای مختلف و عوامل مؤثر گوناگون از نتایج لرزه‌ای انفجار تک چال استفاده کرد و رابطه‌ای بر این اساس بدست آورد. البته این رابطه نیز مانند آنچه در رابطه (۲) ارائه شد شامل دو پارامتر فاصله و خرج می‌باشد. نکته‌ای را که در اینجا باید مد نظر

هنگام استفاده از رابطه تاثیر داده می‌شوند. در استفاده از این رابطه، بدست آوردن تعداد چالی که لرزش آنها در یک زمان یا محدوده زمانی خاص به محل ثبت می‌رسند مهم است. اینکار بدین صورت انجام می‌شود که اثر تمام پارامترها به صورت تأخیر بر هر چال اعمال می‌شود. نکته ای که در این مورد قابل توجه می‌باشد این است که با در نظر گرفتن عوامل مختلف و تبدیل اثر آنها به صورت اثر تأخیر بین امواج دریافت شده در محل ثبت، تعداد چالهایی که امواج لرزه‌ای آنها به صورت همزمان به محل ثبت می‌رسند کم است. بدین منظور باید یک محدوده زمانی خاص در نظر گرفت که در اینجا این محدوده به عنوان محدوده زمان هم انفجاری مطرح شده است. با توجه به این مطالب رابطه (۳) به صورت زیر نمایان می‌شود.

$$PPV = 1675.5 \times (Q_{II})^{0.8434} \times (DS)^{-1.6822} \quad (4)$$

که در آن:  $PPV$  حداکثر سرعت ذرات  $(mm/s)$ ،  $Q_{II}$  حداکثر خرجی که لرزه آن در یک محدوده زمانی معین به محل ثبت

که در آن:  $PPV$  حداکثر سرعت ذرات  $(mm/s)$ ،  $Q$  حداکثر خرج منفجر شده در یک تأخیر  $(kg)$ ،  $DS$  فاصله از محل انفجار  $(m)$  می‌باشد این رابطه دارای ضریب همبستگی  $0.95$ ، واریانس  $0.7713$  و انحراف معیار  $0.878$  می‌باشد.

بحث اصلی در مورد استفاده از این رابطه است. مسلم

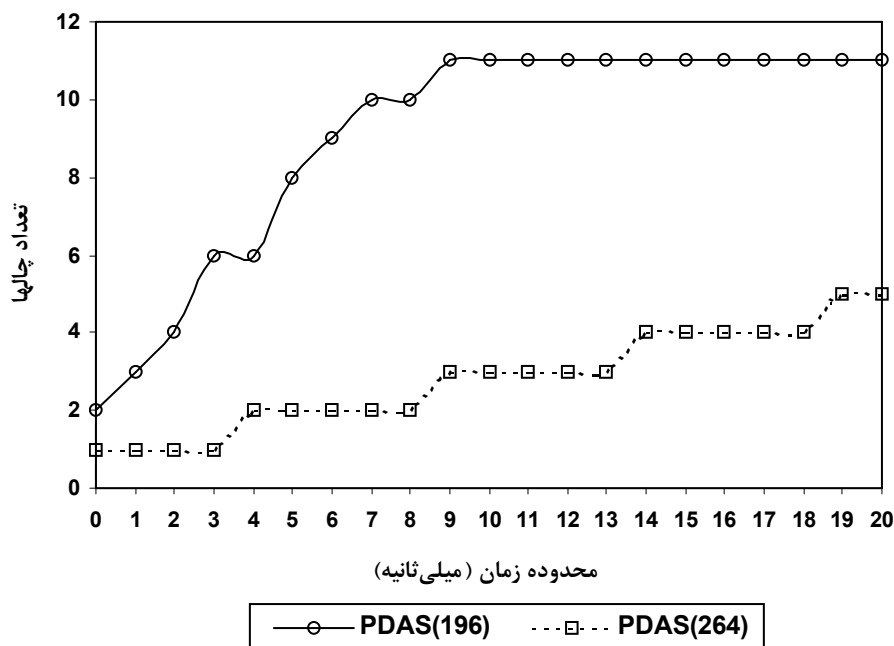
است که در این مورد نیز نمی‌توان عوامل را به صورت مستقیم تاثیر داد ولی می‌توان به صورت غیر مستقیم بعضی از این عوامل را ملحوظ داشت. بدین ترتیب که تقریباً تمام اثرات بر روی مقدار خرج منفجر شده در یک زمان اعمال می‌شود. برای انجام این عمل پیشنهاد می‌شود که به جای در نظر گرفتن تعداد چال منفجر شده در یک تأخیر (تعداد چال تعیین کننده میزان خرج است) تعداد چالهایی که لرزش حاصل از آنها در یک زمان یا محدوده زمانی خاص به محل ثبت می‌رسد در نظر گرفته شود. این عمل باعث می‌شود تا تأثیر پارامترهایی چون موقعیت محل ثبت از نظر زاویه، سرعت انفجار، سرعت انتشار امواج، جهت شروع انفجار و غیره مورد ملاحظه قرار گیرند. بنابراین طبق این پیشنهاد عوامل لازم در

بدیهی است که در نظر گرفتن یک محدوده کوتاه برای محاسبه تعداد چالهایی که باهم منفجر می‌شوند تعداد این چالها را خیلی کمتر از تعداد واقعی نشان می‌دهد و اگر محدوده زیاد در نظر گرفته شود میزان خرج بالا می‌رود و لرزش آن نسبت به حالت واقعی زیاد می‌شود. برای اینکه اثر این محدوده زمانی روی تعداد چالهایی که با هم منفجر می‌شوند مشخص شود در شکل (۵) نمودار مربوط به تعداد چال در مقابل محدوده زمانی مختلف ارائه شده است که در آن برای دو نقطه مختلف ثبت بر اساس محدوده‌های زمانی مختلف، تعداد چالهایی که لرزه آنها در آن محدوده به محل ثبت می‌رسند محاسبه و ارائه شده است.

می‌رسد.  $(kg)$  ،  $DS$  فاصله تا محل انفجار  $(m)$  می‌باشد.

### تعیین محدوده زمان هم انفجاری بهینه

مفهومی را که در قسمت قبل مطرح شد می‌توان به این صورت تعریف کرد که محدوده زمان هم انفجاری محدوده زمانی‌ای است که وقتی اختلاف زمان رسیدن لرزه‌های انفجار چند چال به یک نقطه ثبت در این محدوده قرار گرفته باشد انفجار این تعداد چال با هم فرض می‌شود. به عبارت دیگر حداکثر خرج منفجر شده در یک تأخیر با میزان خرج موجود در این تعداد چال که امواج لرزه‌ای آنها با اختلاف کمتر یا برابر این محدوده زمانی به محل ثبت رسیده‌اند جایگزین می‌شود. این نکته



شکل ۵: نمودار تعداد چالهای انفجاری که لرزه حاصل از آنها در محدوده‌های زمانی مختلف بصورت با هم به لرزه‌نگارهای ۱۹۶ و ۲۶۴ در انفجار شماره ۲۰۰ معدن مس سرچشمه رسیده است [۳].

یک حالت ثابت می‌رسد. ضمناً این تغییرات برای دو نقطه در زوایای مختلف نیز یکسان نیست. به طورمثال برای محدوده زمانی ۵ میلی ثانیه تعداد چالی که انفجار آنها در این محدوده به لرزه‌نگار شماره ۱۹۶ رسیده است ۸ چال و این تعداد برای لرزه‌نگار شماره ۲۶۴ برابر ۲ چال می‌باشد. به همین علت لرزش ثبت شده در نقطه ۱۹۶ برابر ۸/۷ میلیمتر بر ثانیه و در نقطه ۲۶۴ برابر ۴/۸۵ میلیمتر بر ثانیه

در این نمودار دو نقطه ثبت در یک انفجار با هم مقایسه شده‌اند که فاصله لرزه‌نگار شماره ۱۹۶ تا محل انفجار حدوداً ۵۰۰ متر بیشتر از فاصله لرزه‌نگار شماره ۲۶۴ تا محل انفجار است و این دو نقطه در زوایای مختلف نسبت به بلوک انفجاری قرار گرفته‌اند. در این شکل ملاحظه می‌شود که با زیاد شدن محدوده زمان تعداد چالهایی که انفجار آنها با هم در نظر گرفته می‌شود افزایش می‌یابد تا جایی که این مقدار به

بنابراین مقدار بهینه این محدوده زمانی برای معدن مس سرچشمه برابر ۱۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شد.

### مقایسه نتایج

با توجه به مطالب ذکر شده و مدل ارائه شده و محدوده زمانی ۱۰ میلی ثانیه مقادیر لرزش برای تمام انفجارهای ثبت شده در معدن مس سرچشمه محاسبه شده است. همچنین برای مقایسه با مدل‌های دیگر از مدل‌های ارائه شده توسط کنیا [۸] برای معادن مس پرفیری، اجترلانی، نی و نیبرگ [۸] برای معادن روباز مس و بخشنده [۲] برای معادن مس سرچشمه استفاده شده است. مدل‌های ریاضی افراد مذکور به صورت زیر می‌باشد.

- کنیا [۸]

$$PPV = 100 \times Q^{0.8} \times (Ds)^{-1.6} \quad (5)$$

- اجترلانی، نی و نیبرگ [۸]

$$PPV = 113 \times Q^{0.8} \times (Ds)^{-1.6} \quad (6)$$

- بخشنده [۲]

می‌باشد این در حالیست که فاصله نقطه ۱۹۶ تا محل انفجار از نقطه ۲۶۴ بیشتر است و اصولاً باید لرزش کمتری در آنجا ثبت شود.

به منظور به دست آوردن این نمودار به این صورت عمل شده است که برای هر نقطه ثبت زمان رسیدن لرزش هر کدام از چال‌های انفجاری با توجه به عامل‌های فاصله محل چال تا محل ثبت، زاویه محل ثبت نسبت به محل چال، سرعت انفجار، سرعت انتشار امواج در سنگ و غیره محاسبه شده است. سپس این زمانها نسبت به زمان رسیدن لرزش چالی که کمترین زمان را دارد مقایسه شده‌اند و به صورت اختلاف زمان رسیدن امواج چالها ارائه شده‌اند.

نکته مهمی که باید روشن شود مقدار بهینه این محدوده زمان است. با توجه به نمودارهای تعیین شده برای انفجارهای مختلف ثبت شده در معدن مس سرچشمه ملاحظه شد که بعد از محدوده زمانی ۱۰ میلی ثانیه تغییرات تعداد چال تقریباً ثابت می‌شود و تغییرات چندانی ندارد. از طرفی با در نظر گرفتن این محدوده زمانی نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی بهترین حالت را نسبت به مقادیر واقعی ثبت شده دارد.

مدل پیشنهادی نسبت به مدل‌های دیگر دارای مقادیر مناسبتری است و از ضرایب بهتری برخوردار است.

یکی از مشکلات استفاده از مدل پیشنهادی، تعیین تعداد چال منفجر شده در محدوده زمانی ۱۰ میلی‌ثانیه است زیرا باید تمام عامل‌های تأثیرگذار بر رسیدن لرزش یک چال به محل دریافت لرزش را به عامل زمان تبدیل کرد و در نهایت تعداد چالی که لرزش آنها در این محدوده به محل ثبت رسیده را تعیین کرد. کاربرد مدل‌های ارائه شده تاکنون، از سهولت بیشتری نسبت به این مدل برخوردارند ولی در عوض دقت نتایج حاصل از مدل پیشنهادی بالاتر است. نکته دیگر اینست که در استفاده از مدل پیشنهادی اثر اکثر عوامل تأثیرگذار بر رسیدن لرزش یک چال به محل دریافت لرزش را می‌توان در مدل تأثیر داد ولی در مدل‌های دیگر اینکار محدودیت دارد.

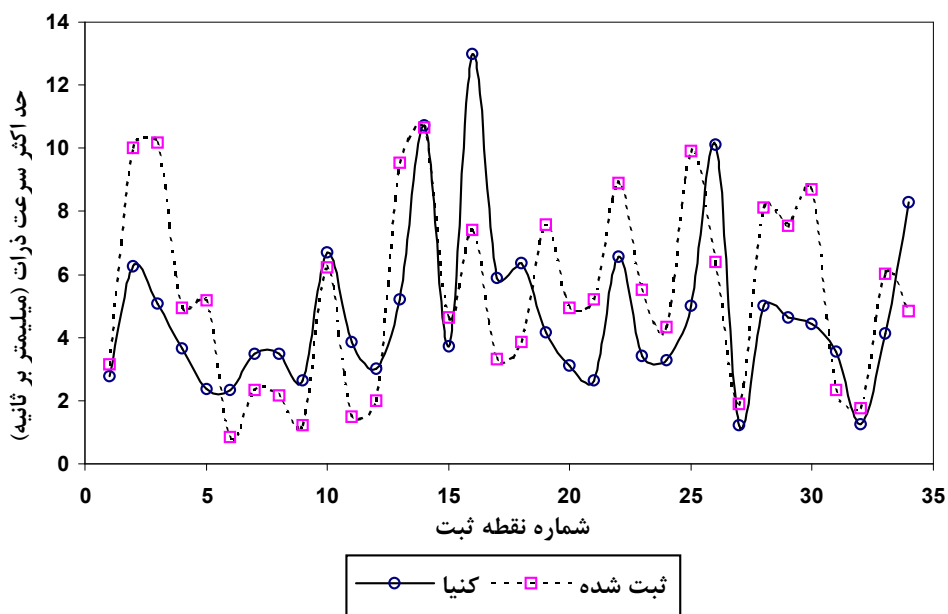
$$PPV = 267.14 \times Q^{0.6321} \times (DS)^{-1.2643} \quad (7)$$

که در آنها:  $Q$  حداکثر خرج منفجر شده در یک زمان تأخیر که در رابطه کنیا بر حسب  $(lb)$  و در دو رابطه دیگر بر حسب  $(kg)$ ،  $DS$  فاصله محل ثبت تا محل انفجار که در رابطه کنیا بر حسب  $(ft)$  و در دو رابطه دیگر بر حسب  $(m)$  و  $PPV$  حداکثر سرعت ذرات که در رابطه کنیا بر حسب  $(in/sec)$  و در دو رابطه دیگر بر حسب  $(mm/sec)$  می باشد.

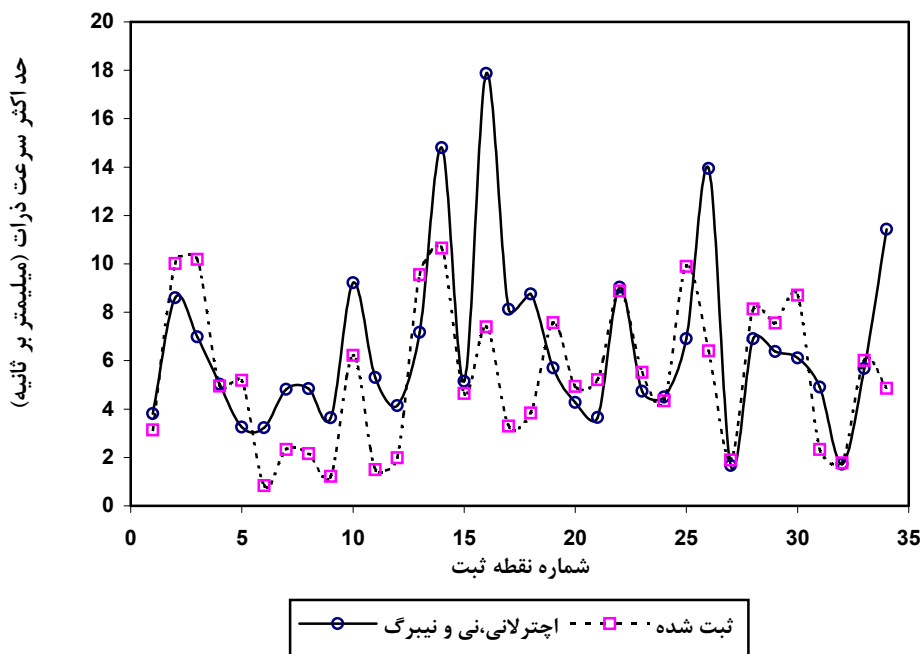
مقایسه بین نتایج مدل‌های مختلف و مدل پیشنهادی با مقادیر واقعی ثبت شده انجام شده است و این مقایسه‌ها در شکل‌های (۶) تا (۹) ارائه شده است. همچنین داده‌های آماری حاصل از بررسی و مقایسه این نتایج با مقادیر واقعی در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های (۶) تا (۹) و جدول (۱) ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از

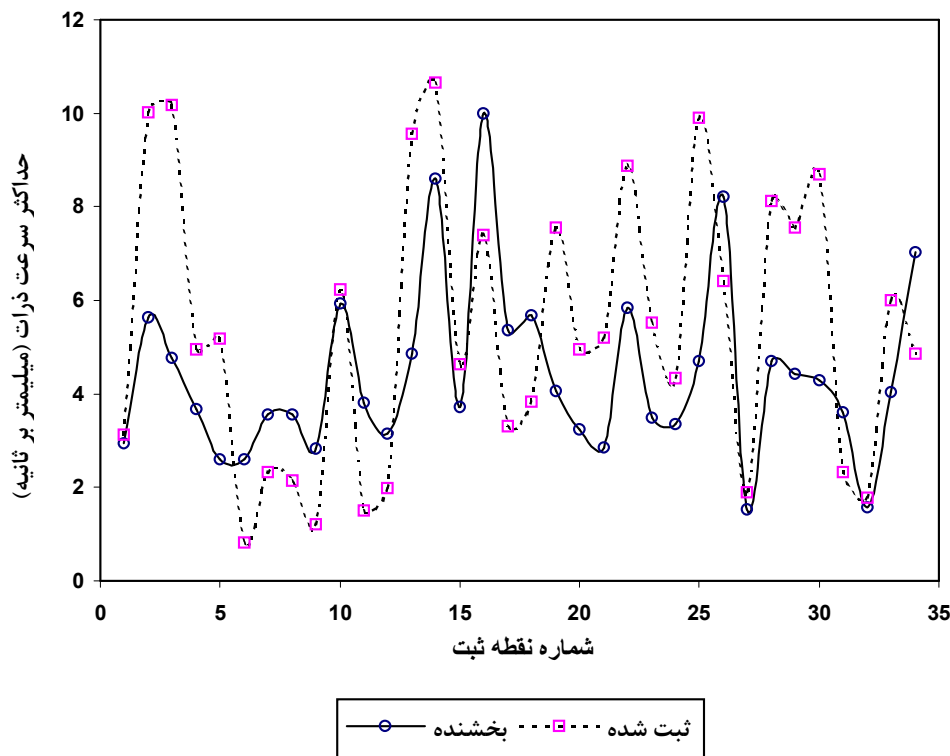




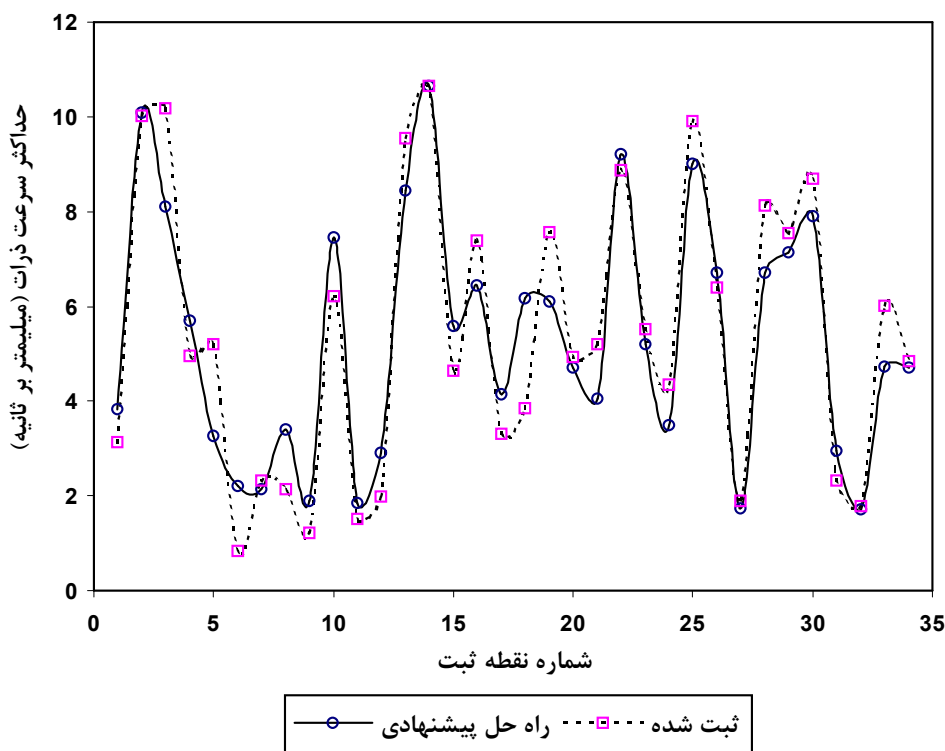
شکل ۶: مقایسه نتایج برآیند حداکثر سرعت ذرات بدست آمده بر اساس مدل ریاضی ارائه شده توسط کینا [۸]، برای انفجارهای ثبت شده در معدن مس سرچشمه با نتایج واقعی ثبت شده در این معدن [۳].



شکل ۷: مقایسه نتایج برآیند حداکثر سرعت ذرات بدست آمده بر اساس مدل ریاضی ارائه شده توسط اجترلانی، نی و نیبرگ [۸]، برای انفجارهای ثبت شده در معدن مس سرچشمه با نتایج واقعی ثبت شده در این معدن [۳].



شکل ۸: مقایسه نتایج برآیند حداکثر سرعت ذرات بدست آمده بر اساس مدل ریاضی ارائه شده توسط بخشنده [۲]، برای انفجارهای ثبت شده در معدن مس سرچشمه با نتایج واقعی ثبت شده در این معدن [۳].



شکل ۹: مقایسه نتایج برآیند حداکثر سرعت ذرات حاصل از راه حل پیشنهادی با نتایج ثبت شده از انفجارهای معدن مس سرچشمه [۳].  
 جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از رابطه‌های پیشین و رابطه پیشنهادی (جدید) با مقادیر ثبت شده در معدن مس سرچشمه [۳].

ضریب همبستگی (R)	انحراف معیار	واریانس	رابطه
۰/۵۶۶۳	۲/۶۶۹۲	۷/۱۲۴۷	کنیا [۸]
۰/۵۷	۳/۱۴۶	۹/۸۹۷	اچترلانی، نی و نیبرگ [۸]
۰/۵۸۸۴	۲/۶۲	۶/۸۴	بخشنده [۲]
۰/۹۰۱۹	۱/۳۲۰۴	۱/۷۴۳۴	پیشنهادی (جدید) [۳]

## خلاصه و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این بحث را میتوان در موارد زیر خلاصه کرد.

(۱) برای پیش بینی لرزش زمین ناشی از انفجارهای تک‌ردیفی و انفجارهای با تعداد چال کم روش شبیه‌سازی لرزش نتایج بهتری نسبت به مدل‌های ریاضی ارائه می‌دهد.

(۲) تأثیر دادن مستقیم تأخیر بر نتایج حاصل از روابط پیش‌بینی لرزش در بسیاری از موارد مشکل است.

(۳) استفاده از نتایج حاصل از انفجارهای تک چال به علت پایین بودن میزان پراکندگی نتایج (داده‌های اولیه) برای بدست آوردن مدل‌های ریاضی مناسب می‌باشد.

(۴) در نظر گرفتن میزان خرج چالهایی که لرزه آنها با هم به محل ثبت می‌رسند نسبت به حالتی که میزان خرج منفجر شده در یک زمان تأخیر در نظر گرفته می‌شود نتایج مناسبتری دارد.

(۵) محدوده زمان ۱۰ میلی ثانیه برای در نظرگرفتن انفجارهایی که لرزه آنها با هم به محل ثبت می‌رسند برای معدن مس سرچشمه یک محدوده مناسب می‌باشد.

در پایان ذکر این نکته الزامی است که این بحث براساس داده‌های معدودی انجام شده است و یکی از نتایج اصلی آن ارائه یک پیشنهاد جدید به علاقه‌مندان است که بر روی موضوع لرزش زمین ناشی از انفجار تحقیق می‌کنند. بدیهی است که تأیید این روش مستلزم پژوهش گسترده‌تری است.

لذا امید است که دیگر پژوهشگران نیز بر روی این روش تحقیق و در صورت تأیید آن بصورت فعلی و یا با اصلاحاتی مورد استفاده واقع شود.

## تشکر و قدردانی

این مقاله در قالب طرح پژوهشی مصوب شماره ۶۵۱/۱/۳۶۵ تحت عنوان “بررسی اثرات انفجارهای معادن روباز بر سازه‌های اطراف با استفاده از روش لرزه‌ای و بهینه‌سازی الگوی آتشکاری” با استفاده از

امکان ثبت انفجارها و در اختیار قراردادن گزارشهای فنی و نمونه‌های سنگ تشکر می‌شود. از آقایان حمید منصوری، احمد سدیدخوی و بابک کردبچه که در ثبت لرزه‌نگاشت‌ها شرکت داشته و از آقای دکتر مجید نبی‌بیدهندی که در تعیین سرعت امواج در نمونه‌های سنگ معدن مس سرچشمه کرمان در آزمایشگاه فیزیک سنگ مؤسسه ژئوفیزیک همکاری صمیمانه نموده‌اند قدردانی می‌نماید.

اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است. بدینوسیله از شورای پژوهشی دانشگاه تهران، مؤسسه ژئوفیزیک و گروه فیزیک زمین‌قردانی می‌نماید. از بخش زلزله‌شناسی مؤسسه ژئوفیزیک به لحاظ در اختیار قراردادن دستگاههای لرزه‌نگاری جهت ثبت انفجارهای معدن مس سرچشمه کرمان تشکر می‌نماید. از مدیریت محترم معدن مس سرچشمه کرمان، آقای مهندس شریفیان، به لحاظ همکاری صمیمانه در

## مراجع

- ۱ - استوار، ر. "آتشکاری در معادن." انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، جلد دوم، (۱۳۷۳).
- ۲ - بخشنده، ح. "پیش‌بینی اثرات ناشی از انفجار در معادن روباز بر روی سازه‌های سطحی مجاور (بررسی موردی معدن مس سرچشمه کرمان)." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۸).
- ۳ - پورقاسمی، م. "شبیه‌سازی لرزش زمین ناشی از انفجار و بررسی اثرات تأخیر بر لرزش در معدن مس سرچشمه کرمان." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۹).
- ۴ - مختاری فرد، ا.، غریب شاهی، م. "مس - فلز خون رنگ پربها در افق تمدن، تکنولوژی و علوم." گزارش فنی معدن مس سرچشمه کرمان، (۱۳۷۴).

- 5 - Blair, D. P. and Jiang, J. J. (1995). "Surface vibration due to a vertical column of explosive." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.*, Vol. 32, No 2, PP. 149-154.
- 6 - Djordjevic, N. (1997). "Minimizing the environmental impact of blast vibration." *Mining Engineering*, Vol. 49, PP. 57-61.
- 7 - Dowding, C. H. (1985). *Blast vibration monitoring and control*, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs.
- 8 - Jimeno, C. L., Jimeno, E. L. and Carvedo, A. J. F. (1995). *Drilling and blasting of rocks*, A.A. Balkema, Rotterdam.
- 9 - Konya, C. J. and Walter, E. J. (1990). *Surface mine design*, Printice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- 10 - Roy, P. P. (1998). "Characteristics of ground vibrations and structural response to surface and underground blasting." *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 16, PP. 151-166.
- 11 - Singh, S. P. and Lamond, R. D. (1993). "Prediction & measurment of blast vibration." *Int. J. of Surface Mining Reclamation and Environment*, Vol. 7, PP. 149-154.
- 12 - Singh, S. P. and Vogt, W. (1998). "Effect of direction of initiation on ground vibration." *Int. J. of Surface Minig Reclamation and Environment*, Vol. 12, PP. 75-78.
- 13 - Wheeler, R. M. (1998.). "How millisecond delay Periods may enhance or reduce blast vibration effects." *Mining Engineering*, Vol. 40, PP. 969-973.

