

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن، گرایش استخراج

پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد

تأثیر ارتعاشات حاصل از انفجار پله‌های معدن روباز بر سازه‌های زیرزمینی
(مطالعه موردی: معدن انگوران)

گردآورنده: ارشیا یک‌رنگ

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطائی

شهریور ۱۴۰۰

صورت جلسه دفاع

تقدیم به

بزرگترین و ارزشمندترین آموزگاران زندگی ام

که همواره برایم تکیه گاه امن و مطمئن بودند.

مادر و پدر عزیزم

هزاران بار سپاس

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده‌ی اساتید راهنما گرامی جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی و جناب آقای دکتر محمد عطائی که در تحقق این پژوهش همکاری فراوان داشته‌اند، کمال سپاس و قدردانی را داشته باشم. ضمناً وظیفه‌ی خود دانسته که کمال تشکر و قدردانی از دکتر سجاد محمدی، مهندس حامد رضایی، پویا احمدی، مهندسین دفتر قرارگاه خاتم النبیا، شرکت آهن آجین و همچنین تشکر بسیار ویژه‌ای از مدیریت و پرسنل محترم مجموعه سرب و روی انگوران که در تمام مراحل این پژوهش مرا یاری کردند، را داشته باشم.

تعهد نامه

اینجانب ارشیا یک‌رنگ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تأثیر ارتعاشات حاصل از انفجار پله‌های معدن روباز بر سازه‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: معدن انگوران) تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر محمد عطائی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه از عملیات انفجار برای توسعه فضاهای زیرزمینی و استخراج سنگ در معادن استفاده می‌شود. طراحی نادرست عملیات انفجار در معادن همواره مخاطراتی مانند پرتاب سنگ، لرزش زمین و ... را به همراه داشته است. در معادنی که عملیات معدن‌کاری همزمان در دو بخش روباز و زیرزمینی فعالیت دارند، لرزش‌های شدید زمین حاصل از انفجار باعث افزایش احتمال ناپایداری در فضاهای زیرزمینی مجاور خود می‌شود. هرگونه ناپایداری در فضاهای زیرزمینی می‌تواند صدمات جانی و مالی را به دنبال داشته باشد. از این رو محاسبه حداکثر سرعت ذرات مجاز در یک انفجار می‌تواند کمک شایانی به افزایش ایمنی کارگاه‌های زیرزمینی داشته باشد. به منظور بررسی تاثیر لرزش‌های انفجارهای روباز بر کارگاه‌های زیرزمینی، معدن سرب و روی انگوران به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. در این پژوهش سعی بر آن شده است تا با برداشت‌های لرزه‌نگاری درون رمپ اصلی معدن انگوران در هنگام انفجارهای روباز، رابطه‌ای تجربی برای محاسبه مقدار حداکثر سرعت ذرات و تعیین مقدار مجاز برای این پارامتر ارائه شود و همچنین در صورت نیاز الگوی آتشکاری معدن نیز اصلاح شود. در مجموع ۱۹ برداشت لرزه‌نگاری از رویدادهای آتشی روباز ثبت شده است. در این میان بیشترین میزان حداکثر سرعت ثبت شده ۹/۶۷ میلی‌متر بر ثانیه است. با توجه به مشاهدات انجام شده هیچ گونه ریزشی در فضای زیرزمینی این معدن در هنگام انفجارهای روباز صورت نگرفته است. این نشان دهنده طراحی مناسب الگوی آتشی روباز برای جلوگیری از ریزش فضاهای زیرزمینی مجاور است. در نهایت رابطه‌های تجربی برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات با استفاده از برازش تک متغیره با پارامتر فاصله مقیاس شده، ارائه شده است. این رابطه‌ها بر اساس تاثیر گذاری یک گسل برای ناحیه‌های شرقی و غربی دسته بندی شده است. ضرایب همبستگی رابطه‌ها برای ناحیه‌های شرقی و غربی به ترتیب، ۰/۹۵۴۴ و ۰/۷۳۵۷ است. با مقایسه رابطه‌های بدست آمده با رابطه‌ها ارائه شده پیشین، این نتیجه حاصل می‌شود که رابطه‌های مذکور دارای ضرایب همبستگی بالاتری نسبت به رابطه‌های پیشین بوده است. با بررسی ریزش رخ داده در این معدن و استفاده از رابطه‌های ارائه شده، آستانه‌ای برای ریزش‌های موضعی کوچک ارائه شده است.

کلمات کلیدی: انفجار، لرزش زمین، حداکثر سرعت ذرات، معدن سرب و روی انگوران

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- تعریف مسئله	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱- اهداف پژوهش	۴
۴-۱- ساختار پایان نامه	۴
فصل دوم: مفاهیم پایه	۵
۱-۲- مقدمه	۶
۲-۲- تعریف انفجار	۶
۱-۲-۲- بارهای ناشی از انفجار	۷
۲-۲-۲- امواج لرزه‌ای ناشی از انفجار	۹
۱-۲-۲-۲- امواج حجمی یا درونی	۱۰
۲-۲-۲-۲- امواج سطحی	۱۱
۳-۲-۲- طبقه‌بندی انفجار از نظر وضعیت و موقعیت	۱۳
۱-۳-۲-۲- انفجار در هوای آزاد	۱۳
۲-۳-۲-۲- انفجار در سطح زمین	۱۴
۳-۳-۲-۲- انفجار در داخل زمین	۱۴
۴-۲- فاکتورهای مؤثر در لرزش ناشی از انفجار	۱۵
۱-۴-۲- تأثیر پارامترهای قابل کنترل انفجار بر لرزش زمین	۱۶
۱-۱-۴-۲- حداکثر وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر	۱۶
۲-۱-۴-۲- فاصله از محل انفجار	۱۷
۳-۱-۴-۲- خرج ویژه	۱۸
۴-۱-۴-۲- نوع ماده منفجره‌ی مصرفی	۱۸

۱۹	۲-۴-۱-۵- زمان تاخیر
۱۹	۲-۴-۱-۶- پارامترهای هندسی انفجار
۲۱	۲-۴-۲- تاثیر پارامترهای غیرقابل کنترل انفجار بر لرزش زمین
۲۲	۲-۵- تاثیر لرزش بر روی توده سنگ
۲۳	۲-۶- قوانین انتشار لرزش زمین
۲۳	۲-۶-۱- محاسبه‌ی لرزش زمین از طریق مدل‌های تجربی
۲۴	۲-۶-۲- تئوری پیش‌بینی لرزش زمین
۲۶	۲-۷- مقایسه بارهای انفجار و بار زلزله
۲۶	۲-۸- جمع بندی
۲۹	فصل سوم: پیشینه تحقیق
۳۰	۳-۱- مقدمه
۳۰	۳-۲- بررسی سوابق علمی قبل از سال ۲۰۱۰
۳۷	۳-۳- بررسی سوابق علمی بعد از سال ۲۰۱۰
۴۶	۳-۴- جمع بندی
۴۷	فصل چهارم: معرفی معدن انگوران و برداشت‌های میدانی
۴۸	۴-۱- مقدمه
۴۸	۴-۲- مورد مطالعاتی
۴۹	۴-۲-۱- شرایط زمین‌شناسی
۵۰	۴-۲-۲- شرایط تکتونیکی و ژئومکانیکی منطقه انگوران
۵۳	۴-۲-۳- روش استخراج در معدن انگوران
۵۵	۴-۳- بررسی الگوی انفجار پیاده شده در معدن انگوران
۵۸	۴-۴- برداشت‌های انجام‌شده برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات در مورد مطالعاتی
۵۸	۴-۴-۱- برداشت‌های درزه برداری برای مشخص کردن وضعیت توده سنگ
۶۱	۴-۴-۲- برداشت‌های میدانی PPV با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار

۶۲	۵-۴- محل قرارگیری و آماده سازی برای قرائت دستگاه لرزه‌نگار.....
۶۷	۶-۴- ایجاد پایگاه داده‌ها
۶۹	۷-۴- جمع بندی
۷۱	فصل پنجم: ارائه رابطه‌ها PPV تجربی برای معدن انگوران.....
۷۲	۱-۵- مقدمه
۷۲	۲-۵- انتخاب پارامترهای موثر بر محاسبه PPV
۷۳	۳-۵- ارائه رابطه تجربی برای محاسبه PPV در معدن انگوران
۷۶	۱-۳-۵- مقایسه رابطه حاصل شده با رابطه‌ها پیشین
۷۸	۴-۵- ارائه الگو انفجار با توجه به حداکثر سرعت ذرات در معدن انگوران
۷۹	۵-۵- جمع‌بندی
۸۱	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
۸۲	۱-۶- نتیجه‌گیری
۸۳	۲-۶- پیشنهادها.....
۸۵	پیوست
۱۲۲	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: انفجار در سینه کارهای روباز در معدن انگوران ۶
- شکل ۲-۲: نمودار فشار زمان زمان یک انفجار ۸
- شکل ۳-۲: میرایی میزان فشار انفجار بعد انتشار در محیط ۸
- شکل ۴-۲: انواع موج های لرزه‌ای ۹
- شکل ۵-۲: انواع انفجار از نظر موقعیت ۱۳
- شکل ۶-۲: نمونه انفجار زیرزمینی در یک معدن اتاق و پایه ۱۵
- شکل ۷-۲: اثرات فاصله و شرایط منطقه بر روی لرزش زمین ناشی از انفجار ۱۸
- شکل ۸-۲: نمودار تغییرات فاصله تاخیرها نسبت PPV ۱۹
- شکل ۹-۲: تاثیر بارسنگ بر خردایش و لرزش در یک انفجار ۲۱
- شکل ۱۰-۲: مقایسه میان یک پالس انفجار و لرزه های ناشی از زلزله بم ۲۶
- شکل ۱-۳: اطلاعات و حدود سطح اطمینان ۹۵٪ برای لرزه‌نگاری‌های ثبت شده در فواصل مقیاس دار شده ریشه دوم ۳۲
- شکل ۲-۳: منحنی برازش خطی حداکثر سرعت ذرات و فاصله مقیاس شده برای معدن زیرزمینی ۳۳
- شکل ۳-۳: زون‌های مختلف صدمه بر اساس RMR و PPV ۳۵
- شکل ۴-۳: مجموع داده‌های لرزه‌نگاری ۳۶
- شکل ۵-۳: لرزه‌های ثبت شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری ۴۳
- شکل ۶-۳: نمودار تغییرات فاکتور مقیاس شده سرعت شعاعی و فاکتور مقیاس شده هوپ ۴۴
- شکل ۷-۳: نمودار تغییرات حداکثر سرعت ذرات، انرژی حاصل از انفجار، میزان تنش القایی و مجموع رویدادهای انفجار سنگ ۴۵
- شکل ۸-۳: نمودار تغییرات فشار حاصل انفجار نسبت به فاصله مقیاس شده ۴۶
- شکل ۱-۴: موقعیت معدن انگوران در نقشه ایران ۴۹
- شکل ۲-۴: نقشه تنش‌های اصلی موجود بر روی صفحه ایران ۵۰

شکل ۴-۳: موقعیت تونل نسبت به توپوگرافی و کاواک ۵۳

شکل ۴-۴: نمایی کاواک معدن انگوران ۵۴

شکل ۴-۵: رمپ اصلی معدن انگوران ۵۴

شکل ۴-۶: انفجار در بخش روباز معدن انگوران ۵۶

شکل ۴-۷: ابعاد ریزش ناشی از انفجار بهمن ماه را در سقف رمپ اصلی ۵۷

شکل ۴-۸: موقعیت برداشت درزه برداری ۵۹

شکل ۴-۹: خط برداشت درزه برداری در معدن انگوران ۵۹

شکل ۴-۱۰: موقعیت دسته‌درزه‌ها در صفحه استرئیونت ۶۰

شکل ۴-۱۱: دستگاه ژئوفون مورد استفاده در برداشت‌ها ۶۱

شکل ۴-۱۲: موقعیت لرزه‌نگار نسبت به توپوگرافی منطقه ۶۲

شکل ۴-۱۳: موقعیت لرزه‌نگار نسبت به رمپ و خطوط تراز پاشنه ۶۳

شکل ۴-۱۴: محل نصب دستگاه ژئوفون نسبت در تونل ۶۳

شکل ۴-۱۵: نمایی از شبکه ترسیم شده برای مشاهده ریزش‌های احتمالی ۶۵

شکل ۴-۱۶: نتایج خروجی و نمودار سرعت-زمان حاصل از دستگاه برای رویداد چهار ۶۶

شکل ۴-۱۷: نمودار فرکانس-زمان حاصل از دستگاه برای رویداد چهار ۶۷

شکل ۴-۱۸: موقعیت گسل به تقسیم محدوده به دو قسمت شرقی و غربی ۶۹

شکل ۵-۱: نتیجه برازش داده‌های PPV نسبت به فاصله مقیاس شده برای دو قسمت شرقی و غربی ۷۴

شکل ۵-۲: مقایسه میان حداکثر سرعت ذرات تخمین زده شده توسط رابطه تجربی و مقدار اندازه‌گیری شده آن در بخش شرقی ۷۵

شکل ۵-۳: مقایسه میان حداکثر سرعت ذرات تخمین زده شده توسط رابطه تجربی و مقدار اندازه‌گیری شده آن در بخش غربی ۷۵

شکل ۵-۴: نمودار مقایسه میان رابطه‌های پیشین، رابطه ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در ناحیه شرقی معدن انگوران ۷۷

شکل ۵-۵: نمودار مقایسه میان رابطه‌های پیشین، رابطه ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در ناحیه غربی معدن انگوران..... ۷۷

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲: تقسیم‌بندی انواع انفجار و بارهای ناشی از آن.....	۷
جدول ۲-۲: معیار برآورد آسیب لرزش ناشی از انفجار به پایداری شیروانی سنگی.....	۲۳
جدول ۳-۲: برخی از مدل‌های تجربی ارائه شده برای محاسبه لرزش زمین.....	۲۴
جدول ۱-۳: مطالعات محققین پیشین قبل از سال ۲۰۱۰.....	۳۰
جدول ۲-۳: آستانه لرزش با توجه به RMR سنگ سقف.....	۳۵
جدول ۳-۳: مطالعات محققین پیشین بعد از سال ۲۰۱۰.....	۳۸
جدول ۴-۳: ارزش‌های آستانه برای ایمنی و ثبات ستون‌ها/سقف و دیواره‌های کناری.....	۴۱
جدول ۵-۳: مقایسه میزان PPV اندازه‌گیری شده در سقف و پایه‌های معدن.....	۴۲
جدول ۱-۴: مشخصات دسته گسل‌های منطقه انگوران.....	۵۰
جدول ۲-۴: خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ماده‌سنگ دربرگیرنده معدن انگوران.....	۵۱
جدول ۳-۴: ارزیابی عددی کیفیت توده سنگ با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR در جبهه کارهای مختلف.....	۵۲
جدول ۴-۴: اطلاعات مربوط به انفجارها و مصالح استفاده شده و میزان پیشروی ماهانه مربوط به سال ۱۳۹۹.....	۵۵
جدول ۵-۴: مقایسه مشخصات آتش‌کاری منجر به ریزش و آتش‌کاری اصلاح شده.....	۵۷
جدول ۶-۴: مشخصات دسته درزه‌های حاصل شده.....	۶۰
جدول ۷-۴: داده‌های حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری.....	۶۸
جدول ۱-۵: ضرایب همبستگی میان پارامترها و حداکثر سرعت ذرات حاصل.....	۷۳
جدول ۲-۵: نتیجه برازش‌های متفاوت بر داده‌ها PPV نسبت به فاصله مقیاس شده در دو قسمت شرقی و غربی.....	۷۳
جدول ۳-۵: مقایسه رابطه‌ها پیشین با رابطه‌های ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده.....	۷۶

فصل اول

کلیات

۱-۱- تعریف مسئله

امروزه عملیات انفجار در توده سنگ‌های سخت امری اجتناب‌ناپذیر است. انفجار در بسیاری از پروژه‌های معدنی و عمرانی کاربرد داشته و در صورت عدم دقت در طراحی مناسب آن، احتمال ایجاد خسارات مالی و جانی وجود دارد. استفاده از سیستم آتشباری، مقرون به صرفه‌ترین روش استخراج سنگ برای پروژه‌های معدنی و عمرانی است. استفاده از مقادیر زیاد مواد منفجره در طول خرج گذاری ممکن است، باعث نتایج نامطلوبی مانند لرزش زمین و هوا بیشتر از حد شود. در اثر انفجار، امواج لرزه‌ای درون زمین انتشار می‌یابد، این مسئله سبب حرکت ذرات می‌شود که به آن لرزش زمین گفته می‌شود. لرزش زمین در سه جهت عمودی، شعاعی و عرضی است. لرزش‌های زمین با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار ثبت می‌شوند. استاندارد شدت لرزش زمین را حداکثر سرعت ذره PPV^1 می‌نامند (استوار، ۱۳۸۷).

خردایش مناسب سنگ در نتیجه آتشباری موجب کاهش هزینه‌های معدن می‌شود، برای رسیدن به میزان مناسب خردایش، مقدار ماده منفجره مصرفی افزایش یافته. این امر ممکن است سبب ایجاد صدماتی در سیستم‌های نگهداری، دیواره‌ها و سق سازه‌های زیرزمینی مجاور آن شود. (Singh et al., 2015)

پارامترهای مؤثر بر نتایج عملیات آتشباری مانند لرزش زمین را می‌توان به دو دسته کلی پارامترهای غیرقابل کنترل مانند خصوصیات زمین‌شناسی منطقه و موقعیت سازه‌های موجود و نیز پارامترهای قابل کنترل از جمله پارامترهای طراحی انفجار تقسیم‌بندی کرد. شمار زیادی از رابطه‌ها و تئوری‌ها برای پیش‌بینی و مقابله با آثار مخرب لرزش زمین حاصل از انفجار ارائه شده است. اغلب روش‌های رایج به منظور محاسبه مقدار حداکثر سرعت ذرات بر مبنای فاصله مقیاس‌دار شده^۲ است. فاصله مقیاس‌دار شده بر اساس فاصله از محل انفجار و میزان خرج مصرفی نیز محاسبه می‌شود (استوار، ۱۳۸۷).

از سوی دیگر امروزه با توسعه معدن‌کاری برای دستیابی به ذخایر عمیق و افزایش تولید ماده معدنی، چرخه تولیدی معدن نیازمند همزمانی فعالیت‌های کارگاه‌های روباز و زیرزمینی با یکدیگر است. این همزمانی باعث ایجاد چالش‌های جدیدی شده است. یکی از این چالش‌ها، تأثیر ارتعاشات حاصل از انفجار در سینه کارهای بخش روباز بر فضا‌های زیرزمینی است. با دانستن مقدار حداکثر سرعت ذرات مجاز در یک

1 Peak particle velocity

2 Scaled Distance

انفجار می‌توان از تأثیرات مخربی همانند ایجاد ترک‌ها و درزه‌ها در توده سنگ، اختلال در نظم تولیدی کارگاه‌ها و ناپایداری جلوگیری کرد (استوار، ۱۳۸۷).

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

معدن انگوران جز معدود معادنی در ایران است که در آن چرخه تولید کارگاه زیرزمینی و روباز در حال حاضر به صورت همزمان انجام می‌شود، از این رو بررسی پدیده لرزش زمین حاصل از انفجار برای حفظ پایداری و ایمنی فضاهای زیرزمینی اهمیت بالایی دارد. برای افزایش تولید سینه‌کارهای روباز باید مقدار ماده منفجره در عملیات آتشباری افزایش یابد. این امر موجب ایجاد لرزش‌هایی در فضاهای زیرزمینی مجاور می‌شود. لرزش‌های شدید عواقبی همچون ناپایداری‌های موضعی در فضای زیرزمینی، اختلال در چرخه تولید و کاهش ایمنی را به همراه دارد. محاسبه حداکثر سرعت ذرات مجاز در این معدن کمک شایانی به جلوگیری از اختلال در سیکل کاری مجموعه، افزایش ایمنی و سلامت نیروی انسانی و تجهیزات درون فضای زیرزمینی کند.

در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری در مورد کنترل لرزش زمین در عملیات استخراج معادن زیرزمینی و روباز انجام شده است. پایداری دیواره‌ها در معادن روباز و همچنین پایداری بخش زیرزمینی، نوار نقاله، خطوط لوله و ... تا حد زیادی بستگی به طراحی درست الگو انفجار دارد، زیرا لرزش بیش‌ازحد می‌تواند باعث ایجاد خسارت‌های جزئی و کلی شود (Afeni & Osasan., 2009). به‌طورکلی می‌توان دلیل اهمیت داشتن موضوع لرزش زمین را در موارد زیر خلاصه کرد:

- ۴۵ درصد از انرژی انفجار را به خود اختصاص می‌دهد.
- مدت‌زمان لرزش زمین بسیار طولانی‌تر از سایر عوارض انفجار است.
- حجم و منطقه‌ای را که تحت تأثیر قرار می‌دهد بزرگ‌تر از دیگر پیامدهای انفجار است

۱-۳- اهداف پژوهش

در این پژوهش، تاثیر ارتعاشات حاصل از انفجار پله‌های معدن روباز بر سازه‌های زیرزمینی مجاور بررسی شده است. به منظور این کار برداشت‌های لرزه نگاری در معدن انگوران انجام شده است. اهداف این تحقیق به صورت خلاصه به شرح زیر است:

۱- برداشت حداکثر سرعت ذرات با استفاده از دستگاه لرزه نگار در انفجارهای متعدد

۲- انتخاب پارامترهای موثر بر میزان سرعت ذرات به هنگام انفجار و ارائه رابطه‌ها تجربی

۳- محاسبه حداکثر سرعت مجاز ذرات در هنگام انفجار در معدن انگوران

۴- ارائه یک الگوی مناسب آتشیاری برای معدن روباز انگوران

۱-۴- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل تدوین شده است. در ادامه، به شرح مختصر هر فصل پرداخته شده است.

- فصل اول: در این فصل، پس از پرداختن به تعریف مساله، ضرورت انجام پژوهش و اهداف تحقیق به اختصار شرح داده شده است و در انتها، ساختار پایان‌نامه ارائه شده است.

- فصل دوم: در این فصل، کلیاتی در مورد انفجار، لرزش زمین و نیز امواج لرزه‌ای حاصل از آن ارائه شده و انفجار براساس نوع آن طبقه بندی شده است. در ادامه، به بررسی مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در لرزش زمین، قوانین و تئوری پیش‌بینی آن پرداخته شده است.

- فصل سوم: در این فصل، مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران پیشین مرور شده است. پایان این فصل به بررسی رابطه‌ها ارائه شده در این مطالعات اختصاص داده شده است.

- فصل چهارم: در این فصل، ابتدا معدن انگوران به عنوان مورد مطالعاتی معرفی شده، الگوی آتشیاری آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته و در ادامه، دستگاه و نحوه برداشت‌های میدانی توضیح داده شده است. در پایان با استفاده از روش‌های آماری به تحلیل نتایج حاصل پرداخته و رابطه‌ها تجربی برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات در معدن انگوران ارائه شده است.

- فصل پنجم: در این فصل، به بیان نتایج و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده پرداخته شده

است.

فصل دوم

مفاهیم پایه

۲-۱- مقدمه

در این فصل، کلیاتی در مورد انفجار و پیامدهای حاصل از آن بیان شده است. همچنین به شرح مختصری در مورد طبقه‌بندی انفجار و عوامل موثر بر لرزش زمین حاصل از انفجار نیز بیان شده است. در انتها فصل نیز به قوانین انتشار لرزش زمین و مقایسه موج یک انفجار و زلزله پرداخته شده است.

۲-۲- تعریف انفجار

انفجار واکنشی است که در آن نرخ سوختن مواد با سرعتی به مراتب بیشتر از سرعت صوت انجام می‌شود، که در نتیجه آن نرخ تغییرات دما و فشار بسیار بالا، ایجاد و موج شوک بلافاصله تولید و با سرعت بسیار بالا منتشر می‌شود (بوستان زر و همکاران، ۱۳۸۹). به‌طور کلی، انفجار نتیجه آزادسازی سریع حجم بسیار زیادی از انرژی در یک فضای محدود است. انفجارها را می‌توان به سه گروه فیزیکی، شیمیایی و هسته‌ای گروه‌بندی کرد. در انفجار فیزیکی، انرژی ممکن است در اثر گسیختگی شدید یک سیلندر با گاز فشرده یا حتی ترکیب دو مایع با دمای متفاوت آزاد شود. در انفجار هسته‌ای، انرژی در اثر شکل‌گیری هسته اتم‌های مختلف به واسطه باز توزیع پروتون‌ها و نوترون‌ها در داخل هسته مرکزی آزاد می‌شود. در انفجار شیمیایی، اکسید شدن سریع اجزای سوخت (اتم‌های کربن و هیدروژن) منبع اصلی انرژی است (Dey & sen, 2003). شکل ۱-۲ انفجار در سینه کارهای روباز در معدن انگوران را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: انفجار در سینه کارهای روباز در معدن انگوران

انفجار به صورت آزاد شدن ناگهانی و سریع حجم بسیار زیادی از انرژی است که تولید نور، گرما، صدا و موج ضربه‌ای می‌نماید. این موج شامل هوای بسیار متراکمی است که به صورت شعاعی و کروی با سرعتی در حدود سرعت صوت از منبع انفجار به سمت خارج حرکت می‌کند. در فرآیند انفجار، انرژی تولیدشده در اثر آزاد شدن گازها به فضای اطراف انفجار منتقل شده و موج تنش فشاری به صورت شعاعی انتشار می‌یابد (Kumar et al., 2016). در جدول ۱-۲، انواع انفجار و بارهای ناشی از انفجار ارائه شده است (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

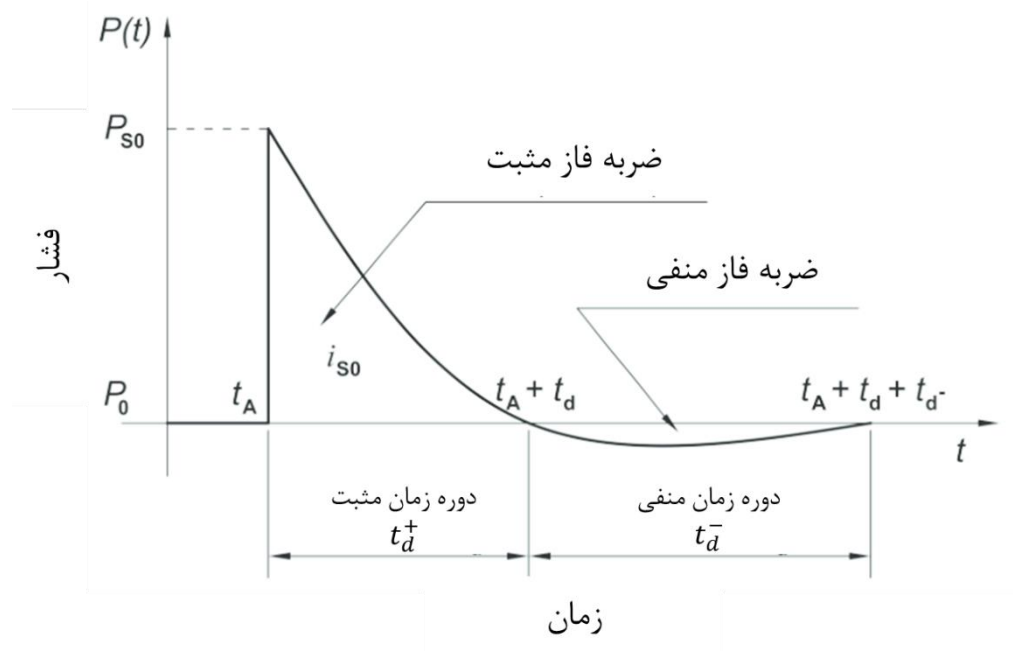
جدول ۱-۲: تقسیم‌بندی انواع انفجار و بارهای ناشی از آن (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸)

موقعیت مرکز انفجار	نوع انفجار	نوع بارهای وارد بر ساختمان
انفجار خارجی	انفجار هوا	امواج مستقیم
		ترکش‌ها
	انفجار در سطح زمین	امواج مستقیم
		امواج بازتابی
		ترکش‌ها
		حرکت امواج در زمین (شوک زمین)
	انفجار در داخل زمین	حرکت امواج در زمین (شوک زمین)
		سرعت ذرات
انفجار داخلی	محبوس	ضربه داخلی
	نیمه محبوس	ضربه داخلی

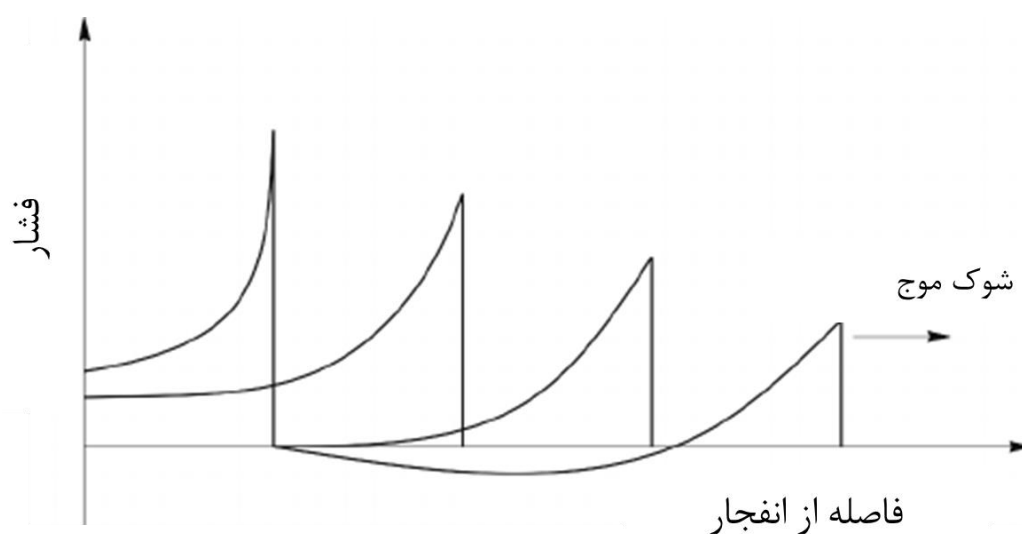
۲-۲-۱- بارهای ناشی از انفجار

وقوع انفجار باعث انتشار امواج تنش در محیط پیرامون نقطه انفجار می‌شود. این امواج تنش به صورت نیروهای فشاری بر روی محیط اطراف اعمال می‌شوند. نیروهای ناشی از انفجار به صورت فشارهای شدید به ناحیه‌ی محدودی که در مقابل انفجار قرار دارد وارد می‌شوند و به ناحیه‌های دورتر فشار کمتری

اعمال می‌کنند. هر بارگذاری ناشی از موج انفجار توسط سه پارامتر شکل موج، حداکثر اضافه فشار و زمان تداوم انفجار تعیین می‌شود (وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۸۷). شکل ۲-۲، نمودار فشار زمان یک انفجار را نشان می‌دهد (Trajkovski et al., 2014). در این شکل همان طور که مشاهده می‌شود، فشار انفجار پس از منتشر شدن در محیط همراه با گذشت زمان میرا می‌شود. شکل ۲-۳، میرایی فشار یک موج انفجار بعد انتشار در محیط را نشان می‌دهد (Draganić & Sigmund., 2012).



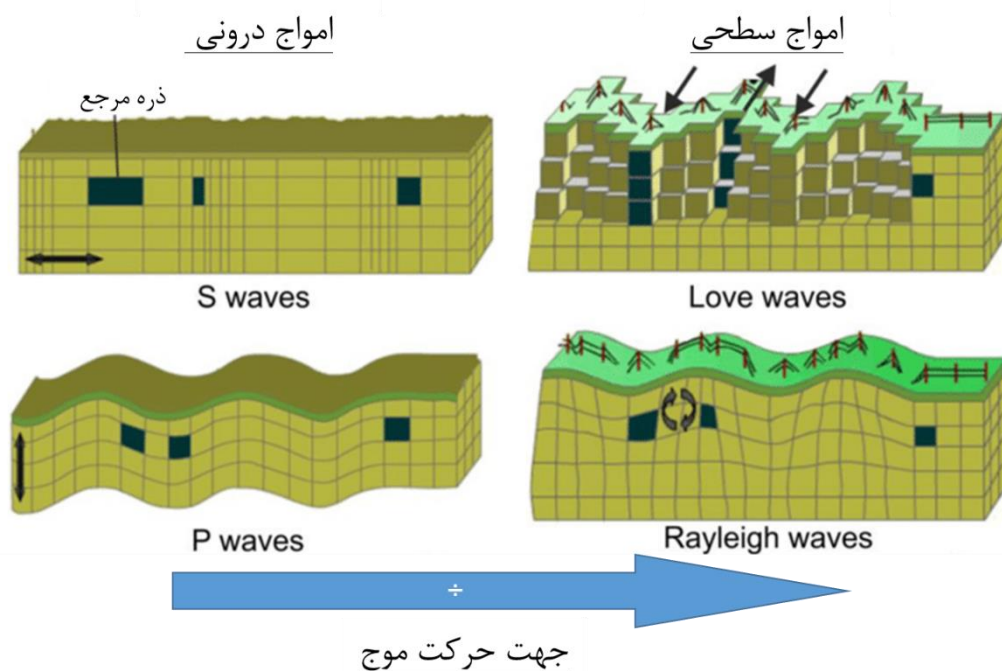
شکل ۲-۲: نمودار فشار زمان زمان یک انفجار (Trajkovski et al., 2014)



شکل ۲-۳: میرایی میزان فشار انفجار بعد انتشار در محیط (Draganić & Sigmund., 2012)

۲-۲-۲- امواج لرزه‌ای ناشی از انفجار

امواج لرزه‌ای، امواج انرژی هستند که در اثر شکست ناگهانی سنگ درون زمین و یا انفجار مواد ناریه به وجود می‌آیند. این انرژی‌ها درون زمین به حرکت درمی‌آیند و توسط لرزه‌نگارها قابل ثبت هستند. حرکت موج را می‌توان در قالب حرکت انرژی در داخل اجسام تعریف کرد. انتقال انرژی به صورت انگیزش ذرات و بازگشت آن‌ها به حالت تعادل صورت می‌گیرد. یک وجه تمایز بین سرعت ذره و سرعت انتشار موج وجود دارد. سرعت ذره به سرعت نوسان ذره حول محور خودش گفته می‌شود. از پارامترهای جابجایی، شتاب و فرکانس ذرات می‌توان مشخصات موج لرزش را تعیین کرد. انواع امواج لرزه‌ای وجود دارند و همه آن‌ها به روش‌های مختلف از محل انفجار منتشر می‌شوند. دو نوع عمده آن‌ها امواج حجمی و امواج سطحی هستند. امواج حجمی قادرند در لایه‌های درونی زمین حرکت کنند، اما امواج سطحی فقط می‌تواند در امتداد سطح همانند امواج سطح آب حرکت کنند. زمین‌لرزه‌ها، انرژی لرزشی را در قالب امواج حجمی و سطحی منتشر می‌کنند (Jimeno et al., 1995). شکل ۲-۴ انواع موج‌های لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: انواع موج‌های لرزه‌ای

۲-۲-۱- امواج حجمی یا درونی

این امواج درون زمین حرکت می‌کنند و قبل از امواج سطحی در زمین‌لرزه یا انفجار منتشر می‌شوند. این امواج دارای فرکانس بیشتری نسبت به امواج سطحی هستند (بوستان زر و همکاران، ۱۳۸۹).

الف) امواج فشاری یا اولیه

اولین نوع امواج حجمی موج P یا موج اولیه (طولی) است. این موج سریع‌ترین نوع موج است و در نتیجه، اولین موجی خواهد بود که به ایستگاه‌های لرزه‌نگاری می‌رسد. موج P می‌تواند درون جامدات و مایعات مانند آب یا لایه‌های سیال داخل زمین انتقال یابد و باعث انقباض و انقباض ذرات تشکیل‌دهنده جسم شود. این موج، سنگ را تحت فشار و کشش قرار می‌دهد و در داخل آن همانند انتقال صوت در هوا منتقل می‌شود. سرعت انتشار امواج فشاری در اغلب سنگ‌ها ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ متر در ثانیه است و هر چه سنگ مقدار هوازگی بیشتری داشته باشد، سرعت امواج کمتر خواهد بود. سرعت انتشار امواج فشاری در خاک‌ها بین ۱۵۰ تا ۱۲۰۰ متر در ثانیه است ((Jimeno et al., 1995)).

در تحلیل الاستیک، مواد را به‌عنوان مواد نامحدود (شبه نامحدود)، الاستیک خطی، پیوسته و ایزوتروپ فرض می‌کنند. موج P در یک توده سنگ درزه‌دار سریع‌تر از یک سنگ سالم و پیوسته میرا می‌شود. یک توده سنگ درزه‌دار مانند یک فیلتر عمل می‌کند و در نتیجه آن، هر دو پارامتر فرکانس و دامنه موج کاهش می‌یابند. سرعت انتشار موج فشاری وابسته به ثابت‌های الاستیک مواد تشکیل‌دهنده زمین است. برای یک توده سنگ با نسبت پواسون ۰/۲۵ می‌توان اظهار داشت که سرعت امواج فشاری ۱/۷۳ برابر سرعت امواج برشی است (Jimeno et al., 1995).

ب) امواج برشی یا ثانویه

دومین نوع امواج حجمی، امواج S یا موج ثانویه است، که دومین موجی است که در زمین‌لرزه‌ها احساس می‌شود. یک موج عرضی، آهسته‌تر از موج طولی می‌شود. این موج فقط می‌تواند در داخل جامدات منتقل شود، درواقع فقط محیط‌هایی می‌توانند این موج را انتشار دهند که قابلیت تحمل نیروهای برشی را داشته باشند. به عبارت دیگر این موج نمی‌تواند از مایعات و گازها عبور کند. از مشخصات موج برشی آن است که در راستای حرکت ذرات، عمود بر امتداد انتشار انرژی لرزه‌ای است. سرعت انتشار امواج برشی نیز وابسته

به ثابت‌های الاستیک تشکیل‌دهنده زمین است. موج S ذرات سنگ را بالا و یا به‌طرفین عمود بر راستای انتشار موج می‌برد. برای موج S، دو مؤلفه تعریف می‌کنند که دربرگیرنده امواج S افقی و امواج S قائم هستند (Jimeno et al., 1995).

این موج همانند موج P اندازه‌گیری می‌شود، به‌طوری‌که امواج کشسان توسط منبع ایجاد شده و توسط چندین ژئوفون که در مسیر قرار گرفته‌اند، ثبت می‌شوند. امواج دریافت شده توسط لرزه‌نگار جمع‌آوری شده و نشان داده می‌شوند (Jimeno et al., 1995).

سرعت انتشار امواج S و P در هر محیط به‌خصوصیات الاستیک آن وابسته بوده و مقدار آن‌ها به ترتیب از رابطه‌ها (۱-۲) تا (۴-۲) تعیین می‌شود.

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_r(f-2\nu)(1+\nu)}} \quad (1-2)$$

$$V_P = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}G}{\rho_r}} \quad (2-2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho_r(1+\nu)}} \quad (3-2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho_r}} \quad (4-2)$$

که در رابطه‌ها فوق V_P و V_S به ترتیب سرعت انتشار امواج طولی (فشاری) و عرضی (برشی) هستند. E مدول الاستیک، ρ_r چگالی سنگ، ν ضریب پواسون، f فرکانس، k مدول بلاک و G مدول برشی است.

۲-۲-۲-۲- امواج سطحی

این امواج فقط از طریق سطح خارجی اجسام انتقال می‌یابند و فرکانس آن‌ها از امواج حجمی کمتر است و به‌راحتی در نتیجه لرزه‌نگار مشاهده می‌شود. اگر چه این امواج بعد از امواج حجمی می‌آیند، اما این امواج سطحی هستند که نقش اساسی در تخریب و آسیب ناشی از زمین‌لرزه، ایفا می‌کنند. اثرات مخرب و قدرت امواج سطحی با افزایش عمق زمین‌لرزه کاهش می‌یابد. مهم‌ترین این امواج، موج‌های ریلی و لائو هستند (بوستان زر و همکاران، ۱۳۸۹).

الف) امواج رایلی

حرکت ذرات در هنگام انتشار این موج به صورت بیضوی شکل بوده و محور بزرگ بیضی نیز قائم است و ذرات در خلاف جهت عقربه‌های ساعت حرکت می‌کنند. این موج در امتداد سطح زمین حرکت می‌کند. دامنه این موج با تغییرات عمق به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. برای یک توده سنگ با نسبت پواسون ۰/۲۵ می‌توان گفت که سرعت موج رایلی ۹۰٪ سرعت موج برشی است (Jimeno et al., 1995).

ب) امواج لَو

این موج ماهیت برشی دارد و با نماد SH نشان داده می‌شود. موج لَو دارای سرعتی بین سرعت موج برشی در سطح و سرعت موج برشی در پایه‌های عمیق است. دامنه این موج نیز با عمق، به‌طور نمایی کاهش می‌یابد (Jimeno et al., 1995).

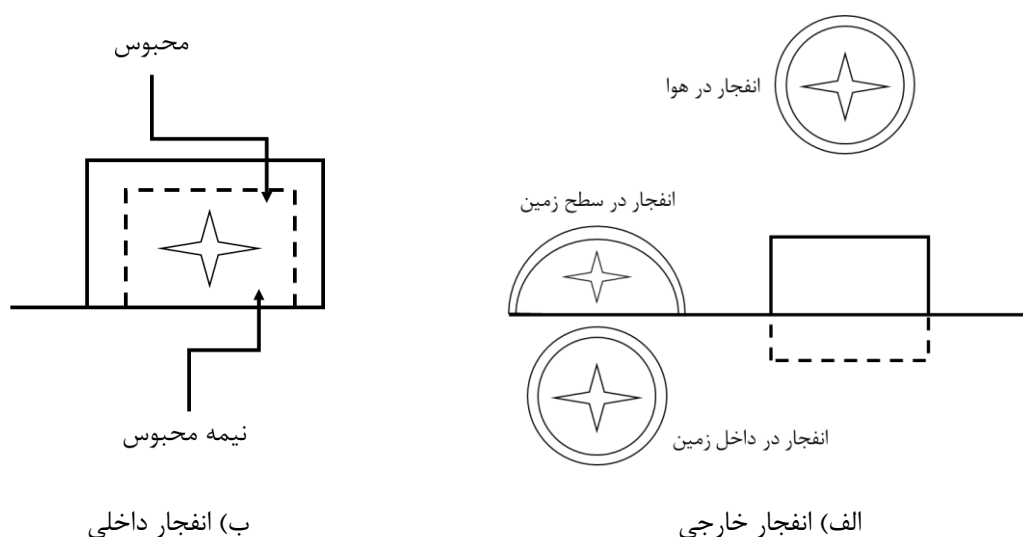
مشاهدات و مطالعات افراد پیشین نشان داده است که امواج رایلی بین ۷۰ تا ۸۰ درصد انرژی کل حاصل از انفجار را حمل می‌کنند. این نوع امواج، عامل اصلی حرکت سطحی ذرات در چندین صد متر از انفجار است و از آن جایی که بسیاری از ساختمان‌ها و سازه‌ها اطراف محل انفجار تا ۵۰۰ متر و یا بیشتر هستند، این نوع موج بیشترین پتانسیل ریسک تخریبی را برای این سازه‌ها دارد (Jimeno et al., 1995). با توجه به اینکه سرعت انتشار امواج مختلف با هم متفاوت است و تعداد تأخیرها در یک عملیات انفجاری می‌تواند زیاد باشد، انواع مختلف امواج فوق تولید شده و تداخل آن‌ها شرایط بسیار پیچیده‌ای را فراهم می‌کند. برای تحلیل این حرکت پیچیده، حسگرهای دستگاه لرزه‌نگاری باید در سه جهت طولی، عرضی و قائم جهت‌یابی شوند (Jimeno et al., 1995).

در عملیات انفجار معادن، به دلیل اینکه منبع تولید لرزه (خرج داخل چال) در فاصله کمی از سطح زمین قرار دارد، امواج سطحی به خصوص در فواصل دور از انفجار به صورت قوی‌تر و غالب از امواج درونی در نتایج لرزه‌نگاری ظاهر می‌شوند. بر این اساس اکثر انرژی حاصل از انفجار در مناطق دورتر از منبع تولید به امواج سطحی اختصاص می‌یابد و در نتیجه بیشتر خسارت‌ها، ناشی از این امواج هستند. امواج لرزه‌ای حاصل از انفجارهای معدنی به دلیل وجود منبع‌های متعدد (چال‌های متعدد) فواصل زمانی انفجار بین چال‌ها، تأثیر عوارض زمین‌شناسی و همچنین تداخل امواج مختلف به شکل پیچیده‌ای در نقاط ثبت لرزش ظاهر می‌شوند (Sawmilana et al., 2009). انفجار عمیق، باعث ایجاد ضربه شده که آثاری شبیه به زلزله از خود به وجود

می‌آورد و باعث ایجاد شتاب، سرعت و تغییر مکان در سازه‌های زیرزمینی می‌شود (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

۲-۲-۳- طبقه‌بندی انفجار از نظر وضعیت و موقعیت

در حالت کلی انفجار به چهار وضعیت انفجار در هوای آزاد، انفجار در سطح زمین، انفجار در داخل زمین و انفجار داخلی تقسیم می‌شود. انفجارها از نظر موقعیت به دودسته انفجار خارجی (خارج از سازه) و انفجار داخلی (داخل سازه) تقسیم می‌شوند. انفجار خارجی شامل انفجار در هوای آزاد، انفجار در سطح زمین و انفجار در داخل زمین است. شکل ۲-۵، انواع انفجار از نظر موقعیت را نشان می‌دهد (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).



شکل ۲-۵: انواع انفجار از نظر موقعیت (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸)

در ادامه به شرح مختصری در رابطه انفجار در هوای آزاد، انفجار در سطح زمین و انفجار در داخل زمین پرداخته شده است.

۲-۳-۱- انفجار در هوای آزاد

در انفجار هوایی، امواج انفجار مستقیم به سازه برخورد کرده و نحوه انتشار امواج در هوا به صورت کروی است. موج شوک در این انفجار قبل از برخورد به سازه به زمین برخورد کرده، تقویت و سپس در محیط منعکس می‌شود. موج منعکس شده از زمین در هنگام انتشار با موج اولیه تداخل کرده و تشکیل موج

جدید می‌دهد. در صورتی که ارتفاع موج جدید بیش از ارتفاع سازه در معرض انفجار باشد، کل سازه تحت فشار یکنواخت انفجار قرار می‌گیرد، در حالیکه ارتفاع موج کمتر از ارتفاع سازه باشد، فشار موج در ارتفاع سازه متغیر است. در بیشتر حالات مبدا انفجار در فاصله‌ای از سازه است که باعث اعمال فشار یکنواخت به سازه می‌شود، در شرایط سازه‌های بلند (برج‌ها و دودکش‌ها) و انفجار نزدیک، نمای ساختمان در معرض فشار بسیار کمی قرار می‌گیرد (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

۲-۲-۳-۲- انفجار در سطح زمین

در صورتی که منبع انفجار در سطح زمین باشد، انتشار امواج ناشی از انفجار به صورت نیم کره است. در این پدیده، انتشار امواج در زمین (مثل زمین لرزه) یعنی شوک زمین نیز رخ خواهد داد که اثر آن قابل توجه نیست. در واقع انفجار سطحی حالتی است که در آن خرج انفجار در سطح زمین و یا خیلی نزدیک به آن و یا در هنگام برخورد با زمین منفجر می‌شود. موج بازتابی در اثر بازتابش و تقویت موج اولیه به وسیله سطح زمین تولید می‌شود. برخلاف انفجار هوایی، در انفجار سطحی موج انفجار در همان نقطه انفجار با موج بازتاب ترکیب شده و موج واحدی را به وجود می‌آورند، که مشابه موج تابشی انفجار هوایی است. در اثر وقوع انفجار، امواج اولیه ناشی از فشار انفجار در محیط منتشر خواهند شد که در اثر برخورد این امواج با سطح آزاد محیط، امواج سطحی به وجود خواهد آمد. موج اولیه انفجار و امواج سطحی با هم ترکیب شده و باعث ایجاد تغییر شکل‌های دینامیکی در محیط خواهد شد. بخش بزرگی از ارتعاش حاصل از انفجار، از طریق خاک به سازه‌ها منتقل می‌شود و اغلب آسیب‌های زیادی به آن‌ها می‌رساند. انفجارهای سطحی، موج انفجاری تا $1/8$ برابر شدیدتر از موج انفجار هوایی تولید می‌کند، پس در نتیجه فشار مبنای انفجار برای انفجار سطحی $1/8$ برابر انفجار هوایی در نظر گرفته می‌شود. در این نوع انفجار شوک زمین اهمیت زیادی دارد (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

۲-۲-۳-۳- انفجار در داخل زمین

انفجار زیرزمینی به هرگونه انفجار در زیر سطح زمین گفته می‌شود که معمولاً یکی از دو حالت انفجار محبوس در سازه‌های زیرزمینی و یا انفجار در خاک و سنگ را شامل می‌شود. در انفجارهای زیرزمینی پس از انفجار مواد منفجره، حفره‌ای ایجاد می‌شود و شوک‌های انفجاری تحمیل شده بر زمین را در محیط

اطراف منتشر می‌کنند. در انفجار در داخل زمین، انرژی انفجار به صورت موج فشاری و برشی در زمین منتقل شده و به علت انتشار امواج در زمین شوک‌های شدید در زمین را ایجاد می‌نماید که می‌تواند اثرات تخریبی شدیدی بر روی سازه‌های زیرزمینی داشته باشند (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).
شکل ۲-۶ انفجار در داخل یک معدن زیرزمینی اتاق و پایه را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶: نمونه انفجار زیرزمینی در یک معدن اتاق و پایه

۲-۴- فاکتورهای مؤثر در لرزش ناشی از انفجار

پارامترهای زیادی بر روی لرزش زمین تأثیرگذارند. این پارامترها را می‌توان به دو دسته قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم کرد. پارامترهای قابل کنترل شامل هندسه انفجار، میزان خرج، فاصله از محل انفجار و ... و پارامترهای غیرقابل کنترل مربوط به شرایط زمین‌شناسی منطقه است. با اعمال تغییرات بر پارامترهای قابل کنترل و با در نظر گرفتن پارامترهای غیرقابل کنترل می‌توان میزان لرزش ناشی از انفجار را کاهش داد (Jimeno et al., 1995).

در نواحی نزدیک به محل انفجار، پارامترهای طراحی و هندسه‌ی طرح بر خواص لرزش زمین تأثیر می‌گذارند. در فواصل دورتر اهمیت این پارامترها کاهش یافته و خواص لرزش به واسطه‌ی خصوصیات محیط انتشار (سنگ‌ها و روباره‌ی خاکی آن‌ها) کنترل می‌شوند. این تغییر در خصوصیات موج باعث افزایش احتمال

خطر و عکس‌العمل سازه‌های محل می‌شود. در ادامه به شرح مختصری از پارامترهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل بر لرزش زمین پرداخته شده است.

۲-۴-۱- تأثیر پارامترهای قابل کنترل انفجار بر لرزش زمین

در این بخش به معرفی مهم‌ترین پارامترهای قابل کنترل تأثیرگذار در لرزش زمین پرداخته شده است.

۲-۴-۱-۱- حداکثر وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر

میزان لرزش‌های حاصل از انفجار در یک نقطه‌ی به‌خصوص، به حداکثر مقدار وزن ماده منفجره‌ی مصرفی و نیز به فاصله‌ی آن تا مرکز بلوک انفجاری وابسته است. در عملیات انفجاری دو یا چند مرحله‌ای، حداکثر وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر و نه کل وزن ماده منفجره مصرف‌شده عامل تعیین‌کننده در شدت لرزش زمین حاصل از انفجار خواهد بود. هر چه زمان‌های تأخیر بین ردیف‌های متوالی انفجار افزایش یابد، امکان تداخل سازنده‌ی بین امواج حاصله از آن‌ها کمتر می‌شود (Jimeno et al., 1995). عموماً در یک عملیات انفجار، برای چندین چال که با چاشنی‌های تأخیری و با زمان تأخیر اسمی یکسان منفجر شوند، حداکثر وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر به علت خطای زمانی انفجار هر چاشنی کمتر از حالت کلی در نظر گرفته می‌شود. به همین علت به‌منظور تعیین مقدار وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر، کسری از تعداد کل مواد منفجرشده با چاشنی‌های یکسان تقریب زده می‌شود (Jimeno et al., 1995).

وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر مهم‌ترین فاکتور تعیین‌کننده در میزان لرزش حاصل از انفجار است. همان‌طور که در رابطه‌ای (۲-۵) نشان داده شده، نتایج مطالعات محققین مختلف نشان می‌دهد که رابطه‌ای بین حداکثر سرعت ذرات به‌عنوان عامل پیش‌بینی خسارت و حداکثر وزن ماده منفجره‌ی مصرفی به فرم نمایی است (Jimeno et al., 1995).

$$V \propto Q^a \quad (2-5)$$

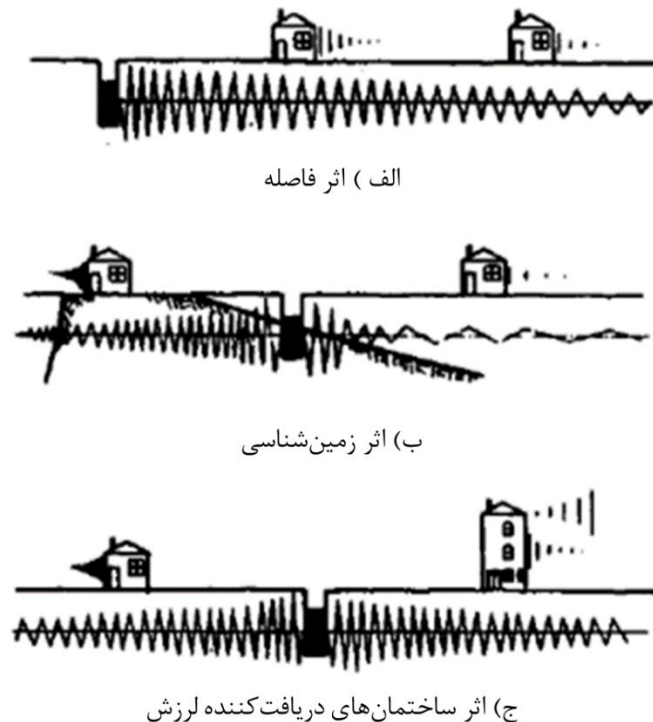
که در آن V ، حداکثر سرعت ذرات و Q وزن ماده منفجره‌ی مصرفی هستند. فاکتور α میرایی منطقه بوده و بر اساس نتایج مطالعات انجام شده در اداره معادن آمریکا مقدار عمومی آن برابر $0/8$ تقریب زده شده است.

۲-۴-۱-۲- فاصله از محل انفجار

همانند حداکثر وزن ماده منفجره‌ی مصرفی در هر تأخیر، فاصله‌ی نقطه‌ی موردنظر از محل انفجار تأثیر فراوانی بر میزان لرزش ایجاد شده در هر نقطه دارد. همان‌طور که در رابطه‌ی (۶-۲) نشان داده شده، تغییرات میزان لرزش حاصل از انفجار با تغییر در فاصله از محل آن به‌صورت یک رابطه‌ی نمایی منفی خواهد بود (Jimeno et al., 1995).

$$V \propto \frac{1}{D^b} \quad (۶-۲)$$

که در آن V حداکثر سرعت ذرات، D فاصله‌ی بلوک انفجاری تا نقطه‌ی اندازه‌گیری و b ضریب ثابتی است که مقدار پیشنهادی اداره معادن آمریکا برای آن برابر $۱/۶$ است. یکی دیگر از آثار افزایش فاصله بر میزان لرزش‌های حاصل از انفجار، میرایی امواج با فرکانس‌های بالاتر است. به‌عبارت‌دیگر زمین مانند یک فیلتر امواج با فرکانس‌های بالاتر را جذب کرده و تنها فرکانس‌های کوچک‌تر قابلیت عبور تا فواصل طولانی را دارند. شکل ۲-۷، اثرات فاصله و شرایط منطقه بر روی لرزش زمین ناشی از انفجار را نشان می‌دهد (Jimeno et al., 1995).



شکل ۲-۷: اثرات فاصله و شرایط منطقه بر روی لرزش زمین ناشی از انفجار (Jimeno et al., 1995)

۲-۴-۱-۳- خرج ویژه

یکی دیگر از پارامترهای مؤثر و گمراه‌کننده در میزان لرزش ناشی از انفجار، خرج ویژه است. اگر در یک منطقه مخاطرات لرزش زمین مورد توجه باشد، ممکن است برای اجتناب از آسیب‌های حاصل از انفجار به‌عنوان یک راه حل اولیه، خرج ویژه کاهش داده شود. البته استفاده از این روش هیچ بهبودی را در نتایج عملیات نشان نمی‌دهد. در برخی از آزمایش‌هایی که در آن میزان خرج ویژه ۲۰ درصد کمتر از مقدار بهینه‌ی آن انتخاب شده بود، میزان لرزش زمین بین ۲ تا ۳ برابر افزایش یافته است. علت این پدیده را می‌توان ناشی از محصورشدگی ماده‌ی منفجره درون سنگ، توزیع نقطه‌ای ماده‌ی منفجره و عدم توانایی (کاهش انرژی) ماده منفجره در جابجایی و تورم توده سنگ مجاور چال است (Kumar et al., 2016).

۲-۴-۱-۴- نوع ماده منفجره‌ی مصرفی

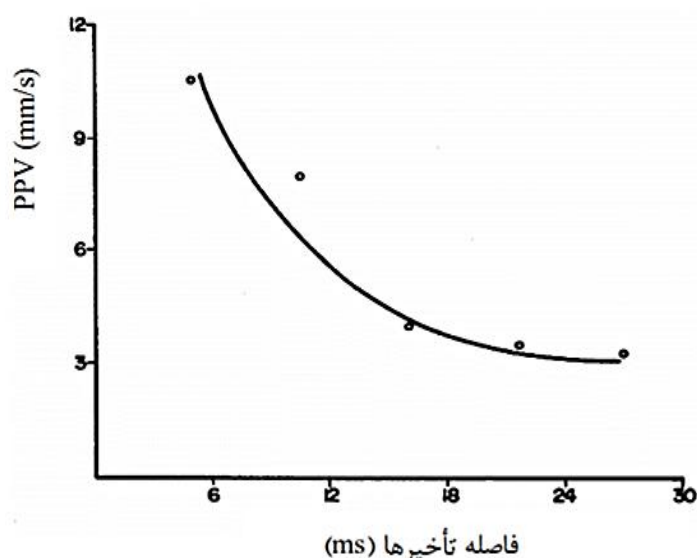
آنفو نمونه‌ای از مواد انفجاری کم انرژی است. برای مقایسه، اگر یک مقدار وزنی مشابه از آنفو را با یک ماده منفجره‌ی اسالوی یا ژل آب آلومینیوم‌دار با هم منفجر شوند، شدت لرزش حاصل از انفجار آنفو بین ۲ تا ۲/۴ برابر کمتر است.

۲-۴-۱-۵- زمان تأخیر

فواصل زمانی تأخیر بین انفجارهای متوالی را می‌توان با استفاده از تأخیر اسمی هر چاشنی یا زمان تأخیر مؤثر آن تعیین کرد. فاصله‌ی تأخیر اسمی، تفاوت بین زمان‌های تأخیر اسمی چاشنی‌ها است، در حالیکه فاصله‌ی تأخیر مؤثر تفاوت زمان رسیدن پالس‌های ایجاد شده از انفجار ردیف‌های متوالی است. تأخیر در یک ردیف چال را می‌توان از رابطه (۷-۲) به دست آورد (Jimeno et al., 1995).

$$t_e = t_n - \frac{S \times \cos \varphi}{V_c} \quad (7-2)$$

که در آن t_e زمان تأخیر مؤثر، t_n زمان تأخیر اسمی، S فاصله بین چال‌ها در یک ردیف، φ زاویه‌ی بین امتداد چال‌های انفجاری با موقعیت حسگر یا دستگاه ثبت‌کننده و V_c سرعت انتشار موج لرزشی است. شکل ۸-۲، نمودار تغییرات فاصله تأخیرها و حداکثر سرعت ذرات را نشان می‌دهد (Jimeno et al., 1995).



شکل ۸-۲: نمودار تغییرات فاصله تأخیرها نسبت PPV (Jimeno et al., 1995)

۲-۴-۱-۶- پارامترهای هندسی انفجار

پارامترهای هندسی نیز تاثیر بسزایی بر میزان لرزش دارند. در ادامه نکاتی در مورد این پارامترهای بیان می‌شود:

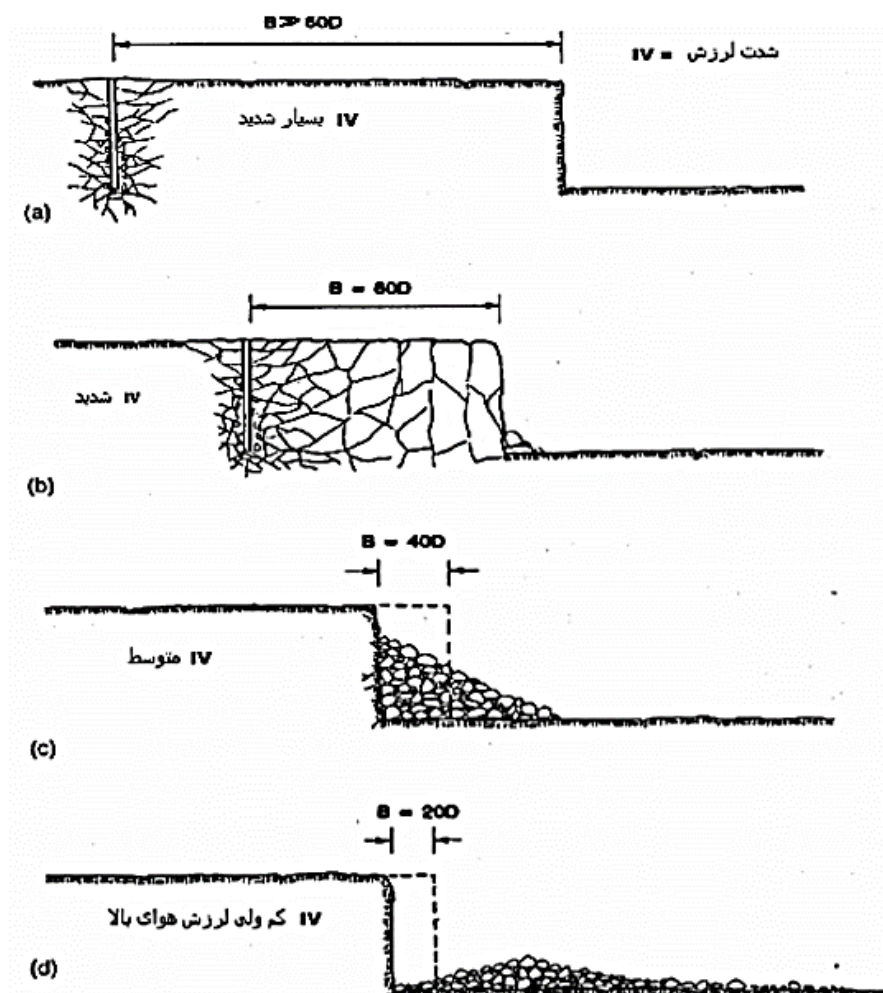
- **قطر حفاری:** افزایش قطر حفاری به‌طورکلی تاثیر منفی در لرزش زمین دارد. چراکه با افزایش قطر حفاری، حجم ماده منفجره‌ی مصرف‌شده در چال افزایش می‌یابد، در صورتی که کاهش قطر حفاری

علاوه بر کاهش حجم ماده منفجره‌ی هر چال، موجب افزایش تعداد چال‌ها و توزیع بهتر انرژی حاصل از انفجار می‌شود

- **ارتفاع پله:** در صورت امکان برای رسیدن به خردشدگی مناسب و حذف مشکلات پاشنه‌ی پله و همچنین کاهش لرزش زمین بایستی نسبت $\frac{H}{B} > 2$ (نسبت ارتفاع پله به بارسنگ) را رعایت کرد.
- **بارسنگ و فاصله‌ی ردیفی چال‌ها:** همان‌طور که در شکل ۲-۹ نشان داده شده، وقتی بارسنگ بیش‌ازحد زیاد باشد، گازهای تولیدی انفجار نمی‌توانند توده سنگ مجاور چال را تخریب کرده و جابجا کنند. بنابراین بخشی از انرژی آن‌ها تبدیل به امواج لرزشی می‌شود. این پدیده در انفجار پیش شکافی کاملاً محسوس است. در این حالت که محصورشدگی کلی وجود دارد، لرزش تولیدشده حدود ۵ برابر آشکاری پله‌ای معمولی است. اگر مقدار بارسنگ بیش‌ازحد کم باشد، گازهای تولید شده از انفجار با سرعت زیاد خارج شده و به‌طرف سطح آزاد حرکت کرده و پدیده‌ی پرتاب سنگ را تشدید می‌کند. میزان لرزش هوا و آلودگی صوتی در این حالت نیز بالا خواهد بود. فاصله‌ی ردیفی چال‌ها تاثیر مشابهی دارد و مقدار آن درواقع به مقدار بارسنگ بستگی دارد.
- **اضافه حفاری چال:** هنگامی که مقدار اضافه حفاری از میزان مورد نیاز بیشتر باشد، بخش اضافی به‌جای خردایش سنگ کف، صرف تولید امواج لرزشی در زمین خواهد شد. علاوه براین اضافه حفاری بیش از حد هزینه‌های عملیات حفاری و انفجار را افزایش می‌دهد و کف پله‌ی جدید نیز نامنظم خواهد شد.
- **گل‌گذاری:** اگر مقدار گل‌گذاری بیش از حد باشد، علاوه بر مشکلات مربوط به خردشدگی، با افزایش محصورشدگی ماده منفجره، مقدار لرزش زمین حاصل از انفجار افزایش خواهد یافت.
- **شیب چال:** چال‌های شیب‌دار موجب افزایش بهره‌وری از انرژی مواد منفجره در خردایش کف پله شده و لرزش زمین را کاهش می‌دهد.
- **خرج گذاری منقطع (دیکوپلینگ)^۱:** بر اساس نتایج آزمایش‌های محققین پیشین، استفاده از ماده‌ی منفجره‌ی جفت نشده با چال انفجار، خردشدگی حاصل از انفجار را بین ۶۵ تا ۷۵ درصد

1 Decoupling

افزایش داده و توزیع قطعات خرد شده سنگ، یکنواخت‌تر خواهد شد. همچنین در این شرایط میزان نیاز به انفجار ثانویه بین ۲ تا ۳ برابر کمتر شده است. شواهد این مطالعات حاکی از کاهش خرج ویژه و لرزش زمین تولیدشده در شرایط جفت نشده است (استوار، ۱۳۸۷).



شکل ۲-۹: تاثیر بارسنگ بر خردایش و لرزش در یک انفجار (استوار، ۱۳۸۷)

۲-۴-۲- تاثیر پارامترهای غیرقابل کنترل انفجار بر لرزش زمین

در عملیات آتشباری در معادن، عوامل محیطی مانند وجود آب، دما و نیروی انسانی تاثیر خاص خود را دارند. وجود آب یا عدم آن و مقدار درصد آن در سنگ بر کلیه خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ تاثیر دارد. به‌طور خالص آب اشباع‌کننده به‌طور محسوس سبب افزایش سرعت انتقال امواج انفجاری می‌شود. زیرا به‌واسطه‌ی پر شدن خلل و فرج و شکستگی‌ها با آب یک محیط خوب برای انتقال امواج الاستیک پدید

می‌آید و موجب کاهش میرایی امواج می‌شود. همچنین آب به علت کاهش اصطکاک داخلی بین اجزا سنگ سبب کاهش مقاومت‌های کششی و فشاری سنگ می‌شود. به علت اینکه مقداری از حرارت مواد منفجره صرف تبخیر آب موجود در خلل و فرج سنگ‌ها می‌شود و اعمال بخشی از انرژی ماده منفجره که می‌توانست صرف شکستن سنگ شود، تلف می‌شود. در نتیجه وجود آب باعث کاهش قدرت ماده منفجره می‌شود و مصرف خرج ویژه را افزایش خواهد داد، که این امر معمولاً باعث افزایش لرزش زمین می‌شود (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

دمای توده سنگ و یا دمای هوای منطقه نیز ممکن است بر نحوه انفجار و به دنبال آن لرزش زمین تاثیر گذارد. برای مثال افزودن ۹ درصد وزنی اوره به آنفو باعث بالا رفتن دمای واکنش تا حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود که خرج ویژه را کاهش می‌دهد، که این امر سبب کاهش در لرزش زمین می‌شود (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

گاهی اوقات بسیاری از حوادث و اتفاقات نامطلوبی که در معادن رخ می‌دهد، ناشی از خطاهای انسانی است، از این رو به‌کارگیری افراد با دانش و مجرب، در کلیه فرآیندهای معدنی می‌تواند موجب بهبود این فرآیندها و رسیدن به هدف موردنظر شود، که همان دستیابی به انفجاری با بهترین خردایش و کمترین لرزش است (مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸).

۲-۵- تاثیر لرزش بر روی توده سنگ

تاثیر لرزش زمین بر روی توده‌های سنگی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. لرزش زمین از طرفی بر یکپارچگی توده سنگی و پارامترهای مقاومت فشاری آن‌ها تاثیر می‌گذارد و از سوی دیگر می‌تواند باعث لغزش، ریزش و انواع شکست‌ها شود. در حالت اول سرعت لرزش بحرانی را می‌توان از رابطه‌ای (۲-۸) از روی سرعت سیر امواج طولی در محیط سنگی، چگالی و مقاومت کششی سنگ‌ها به دست آورد (Himman et al, 2003).

$$v_{crit} = \frac{R_t}{p_r \times v_c} \quad (۲-۸)$$

در رابطه بالا v_{crit} سرعت لرزش بحرانی (mm/s)، R_t مقاومت کششی سنگ (MPa)، چگالی سنگ (Kg/m³) و v_c سرعت عبوردهی موج از سنگ (m/s) است. در جدول ۲-۲، معیار برآورد آسیب لرزش ناشی

از انفجار به پایداری شیروانی سنگی که توسط مطالعات گسترده محققین به دست آمده، ارائه شده است (Himman et al, 2003).

جدول ۲-۲: معیار برآورد آسیب لرزش ناشی از انفجار به پایداری شیروانی سنگی (Himman et al, 2003)

سرعت ذرات (cm/s)	آسیب مورد انتظار
کمتر از ۲۵	برای سنگ‌های اطراف خطری ندارد
۲۵-۶۰	احتمال لغزش در اثر شکست کششی
۶۰-۲۵۰	لغزش کششی و گاهی ایجاد ترک‌های شعاعی
بیش از ۲۵۰	شکست کامل توده سنگ

۲-۶- قوانین انتشار لرزش زمین

یکی از گام‌های اساسی در مطالعه و کنترل لرزش‌های ناشی از انفجار، تعیین قوانین حاکم بر انتشار آن‌ها در محیط‌های زمینی مختلف است. روش‌های مختلفی برای تخمین حرکات زمین ناشی از عملیات انفجار وجود دارد. در ادامه به بررسی برخی از مهم‌ترین رابطه‌ها تجربی موجود و مدل تئوری پیش‌بینی لرزش زمین پرداخته شده است.

۲-۶-۱- محاسبه‌ی لرزش زمین از طریق مدل‌های تجربی

رابطه‌ها تجربی فراوانی پیرامون محاسبه لرزش زمین ناشی از انفجار در معادن و مناطق مختلف ارائه شده است. در جدول ۲-۳ برخی از مدل‌های تجربی ارائه شده برای محاسبه لرزش زمین توسط محققین پیشین ارائه شده است.

جدول ۲-۳: برخی از مدل های تجربی ارائه شده برای محاسبه لرزش زمین

علامت های اختصاری	مدل تجربی ارائه شده	محققین
V = حداکثر دامنه ارتعاش ذرات (mm/s)، K, n, α, b = ثابت های معدن، Q = وزن ماده منفجره بکار رفته شده (Kg)، R = فاصله از محل انفجار تا محل اندازه گیری (m)	$V = k \frac{\sqrt{Q}}{R}$	موریس (۱۹۵۰)
	$V = k(R/Q^{1/2})^{-b}$	دووال و پتکوف (۱۹۵۹)
	$V = 0.828R^{-1.32}$	سیکایند (۱۹۸۰)
	$V = 1.91R^{-1.13}$	کهریمان (۲۰۰۲)
	$V = 1.367R^{-1.59}$	آک و همکاران (۲۰۰۹)
	$V = 0.29R^{-1.296}$	بدال (۲۰۱۰)

۲-۶-۲- تئوری پیش بینی لرزش زمین

برای پیش بینی لرزش زمین مدل های تئوری نیز وجود دارد. ازجمله مهم ترین این مدل ها می توان به مدل تئوری برتا^۱ (۱۹۸۵) اشاره کرد. دراین مدل انرژی لرزش منتقل شده به سنگ در اثر انفجار را می توان از رابطه ها (۹-۲) و (۱۰-۲) محاسبه کرد (Jimeno et al., 1995).

$$E_s = 2\pi^2 A^2 f^2 \times 2\pi D S^2 \times p_r \times VC \times T_v \times 10^{-6} \quad (9-2)$$

$$E_s = n_t \times n_1 \times n_2 \times E_t \times Q \quad (10-2)$$

که در آن A جابجایی (m)، f فرکانس (Hz)، DS فاصله تا نقطه ی انفجار (m)، p_r چگالی سنگ (kg/m^3)، VC سرعت انتشار امواج لرزشی (m/s)، T_v مدت زمان لرزش (s)، E_t انرژی بر واحد جرم (MJ/kg)، Q منفجره ماده وزن (kg)، n_t فاکتور شکنندگی (برای مواد منفجره ی روی سطح زمین ($n_t < 0.4$) و برای مواد منفجره بدون سطح آزاد ($n_t > 0.4$) و n_1 و n_2 به ترتیب ضریب امپدانس و ضریب جفت شدگی هستند. مقدار ضرایب امپدانس و جفت شدگی از رابطه ها (۱۱-۲) و (۱۲-۲) محاسبه می شود (Jimeno et al., 1995).

1 Berta

$$n_1 = 1 - \frac{(Z_e - Z_r)^2}{(Z_e + Z_r)^2} \quad (11-2)$$

$$n_2 = \frac{1}{e^{D/d} - 1.72} \quad (12-2)$$

در رابطه فوق Z_e امپدانس ماده منفجره ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)، Z_r امپدانس سنگ ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$)، D قطر چال (mm)، d قطر ماده منفجره (mm) است. از جایگذاری رابطه‌ها فوق در یکدیگر رابطه (2-13) حاصل می‌شود (Jimeno et al., 1995).

$$A(m) = \sqrt{\frac{n_t \times n_1 \times n_2 \times E_t \times Q \times 10^6}{4 \times \pi^3 \times f^2 \times p_r \times VC \times DS^2 \times T_v}} \quad (13-2)$$

اگر مدت لرزش به اندازه‌ی پنج برابر دوره باشد:

$$T_v = 5T_s = \frac{5}{f} \quad (14-2)$$

و با توجه به اینکه فرکانس زمین از رابطه‌ای (2-15) محاسبه می‌شود.

$$f = (kf \times \log DS)^{-1} \quad (15-2)$$

که در آن kf ثابت مشخصه زمین است و کاهش فرکانس با افزایش فاصله را تعیین می‌کند، دامنه‌ی موج و مقدار سرعت را می‌توان از رابطه‌ای (2-16) و (2-17) محاسبه کرد.

$$A(m) = \sqrt{\frac{n_t \times n_1 \times n_2 \times E_t \times Q \times kf \times \log DS \times 10^6}{20\pi^3 \times p_r \times VC \times DS^2}} \quad (16-2)$$

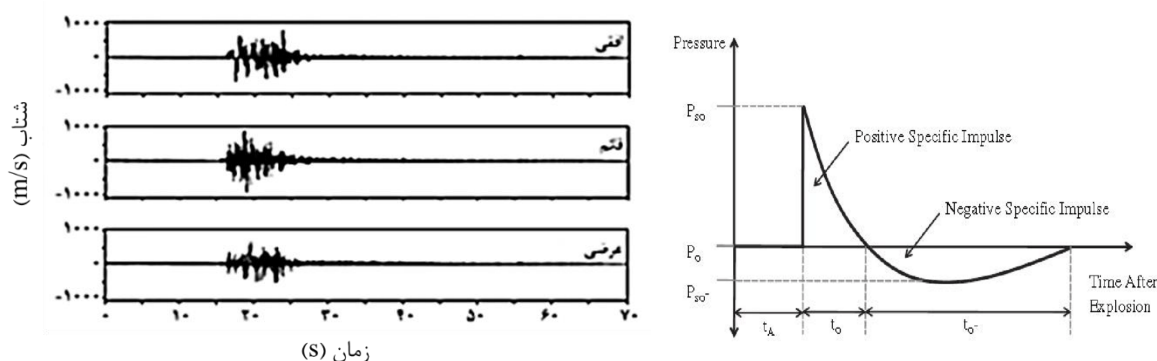
$$V\left(\frac{m}{s}\right) = \frac{\sqrt{Q}}{DS} \sqrt{\frac{n_t \times n_1 \times n_2 \times E_t \times 10^6}{5 \times kf \times \log DS \times \pi \times p_r \times VC}} \quad (17-2)$$

رابطه‌ها اخیر برای حالتی که DS بیشتر از یک متر باشد، برقرار است (Jimeno et al., 1995). امروزه با پیشرفت علوم کامپیوتری، از روش‌هایی چون شبکه عصبی مصنوعی و فازی برای پیش‌بینی میزان لرزش استفاده می‌شود. در این روش‌ها معمول پارامترهایی چون مقدار خرج، ویژگی‌های هندسی انفجار و

غیره به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفته می‌شود، و در مقابل میزان لرزش زمین و هوا، خردایش و غیره خروجی خواهند بود.

۷-۲- مقایسه بارهای انفجار و بار زلزله

بارهای انفجار و ضربه‌ای، بارهای گذرا هستند. این بارهای گذرا فقط برای مدت کوتاهی رخ می‌دهند و زمان رویداد آن‌ها کمتر از یک‌دهم ثانیه است. بارهای لرزه‌ای زلزله تقریباً به‌طور یکنواخت در محیط وارد شده و تمامی عناصر سازه‌ای و محیطی را تحت اثر لرزش قرار می‌دهد. شکل ۲-۱۰ مقایسه یک پالس انفجار و نمودار شتاب زمان زلزله بم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۲-۱۰ مشخص است، زمین‌لرزه ۹۴ ثانیه‌ای بم تقریباً ۹۵۱۱ بار طولانی‌تر از پالس انفجاری است. تأثیرات بارهای انفجار، به‌طور کلی موضعی و محلی بوده که منجر به خسارت‌های شدید و موضعی و یا انهدام می‌شود. از سوی دیگر، سرعت اولیه‌ای که سازه در طول یک انفجار تجربه می‌نماید، رابطه عکس با جرم سازه دارد (مرتضایی، ۱۳۹۲).



الف) یک پالس انفجار

ب) لرزه‌های ناشی از زلزله بم

شکل ۲-۱۰: مقایسه میان یک پالس انفجار و لرزه‌های ناشی از زلزله بم (مرتضایی، ۱۳۹۲)

۸-۲- جمع بندی

در این فصل به تعریف انفجار و به معرفی بارها و امواج لرزه‌ای ناشی از آن پرداخته شده و پارامترهای مؤثر در لرزش زمین ناشی از انفجار به صورت خلاصه معرفی شده است. مهم‌ترین رابطه‌ها تجربی پیش‌بینی لرزش زمین بر اساس پارامتر حداکثر سرعت ذرات PPV است. اکثر رابطه‌ها ارائه شده توسط محققین مختلف ارتباط بین حداکثر سرعت ذرات و فاصله مقیاس شده (نسبت فاصله از نقطه انفجار به وزن

ماده منفجره) است. می‌توان گفت وزن ماده منفجره در هر تأخیر، مهم‌ترین عامل در لرزش زمین محسوب می‌شود و با توجه به رابطه‌ها مختلف با افزایش آن، میزان لرزش زمین نیز افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله از نقطه انفجار، امواج با فرکانس‌های بالاتر میرا می‌شوند، در نتیجه از میزان لرزش زمین کاسته خواهد شد.

فصل سوم

پیشینه تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این فصل برخی از مطالعات محققین پیشین در رابطه با تاثیر موجهای حاصل از آتشفباری در معادن بر روی سازههای مجاور ارائه شده است. این مطالعات به دو دسته قبل از سال ۲۰۱۰ و بعد از سال ۲۰۱۰ تقسیم شده است. از سال ۲۰۱۰، بیشتر پژوهشهای انجام شده در این موضوع با استفاده از روشهای فرا ابتکاری و مدل سازی عددی انجام شده است. در ادامه به بررسی و شرح مختصر این مطالعات پرداخته شده است.

۳-۲- بررسی سوابق علمی قبل از سال ۲۰۱۰

مطالعات بسیاری پیرامون تاثیرات لرزش زمین ناشی از انفجار بر سازههای زیرزمینی اطراف آن، انجام شده است. اولین مطالعه در سال ۱۹۷۷ صورت گرفته است. در این مطالعات با استفاده از روشهای تحلیلی و آماری، رابطهها تجربی برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات ارائه شده است. در جدول ۱-۳، مهم ترین مطالعات صورت گرفته قبل از سال ۲۰۱۰ در مورد تاثیر انفجارهای سطحی بر سازههای زیرزمینی، ارائه شده است.

جدول ۱-۳: مطالعات محققین پیشین قبل از سال ۲۰۱۰

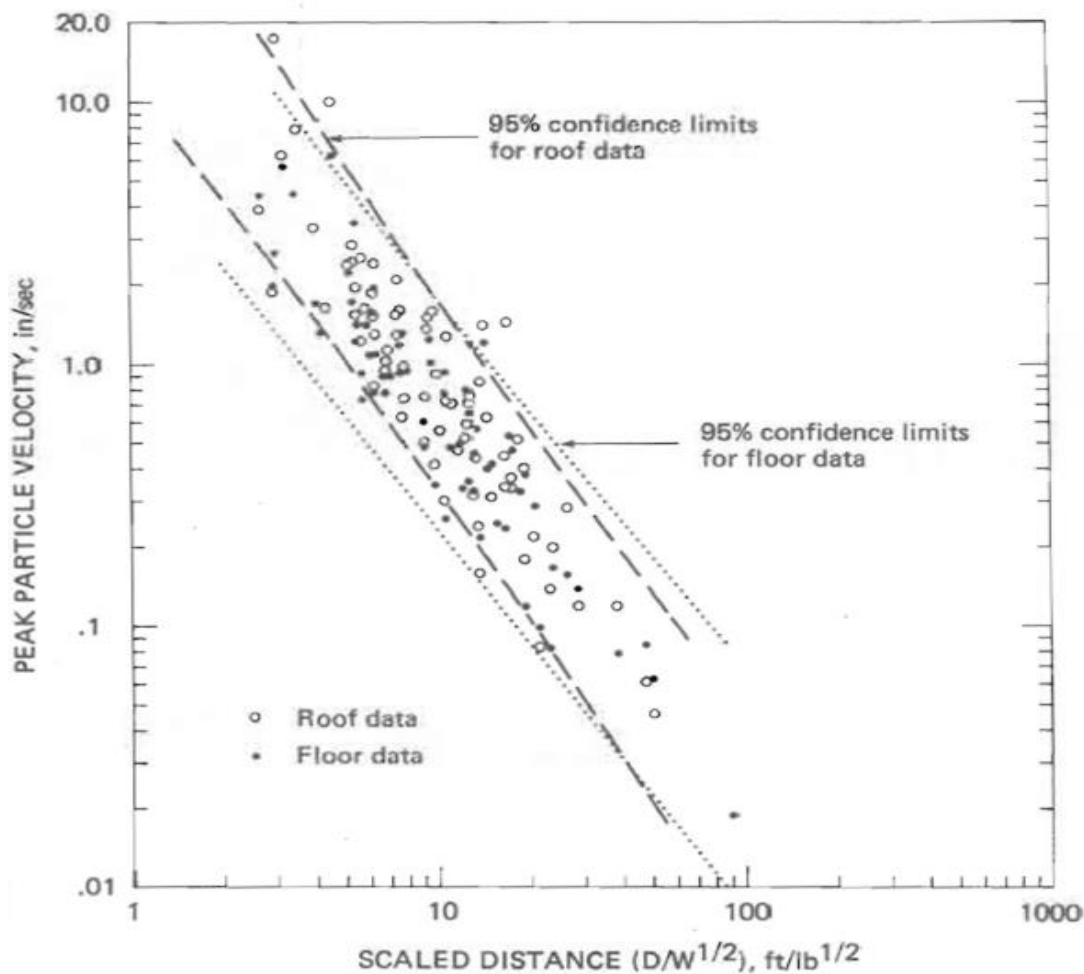
نام پژوهشگران	سال	هدف
روپرت و کلارک	۱۹۷۷	ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه PPV و بررسی صدمات ناشی از انفجار
حیات داوودی و براون	۱۹۷۹	بررسی تاثیر و ایمنی انفجارها بر فضاهای زیرزمینی
جنسن و همکاران	۱۹۷۹	ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه PPV در سقف و کف کارگاه
فنگ و همکاران	۱۹۸۳	بررسی تاثیر لرزش انفجار بر بازکنندههای زیرزمینی معادن زغال
سیسکاپند و همکاران	۱۹۸۳	بررسی صدمات ناشی از لرزش انفجار بر سازههای روباز و زیرزمینی
فوریه و گرین	۱۹۹۳	درجه بندی سطح صدمات لرزش انفجار بر اساس PPV
سینگ	۲۰۰۲	درجه بندی سطح صدمات لرزش انفجار بر اساس PPV و RMR
ویرجینیا	۲۰۰۷	تاثیر لرزشهای زمین بر زیستگاه زیرزمینی خفاشهای در حال انقراض
ساملیانا و همکاران	۲۰۰۹	بررسی تاثیر لرزش انفجار بر پایداری سدهای آبی زیرزمینی

روپرت^۱ و کلارک^۲ (۱۹۷۷)، با اندازه‌گیری و تحلیل آماری داده‌های به‌دست‌آمده از انفجارهای سطحی در یک معدن زغال، تأثیر آن را بر سازه‌های زیرزمینی مجاور بررسی کردند. آن‌ها در مشاهدات خود، صدمات جزئی در قالب ورقه ورقه شدن سنگ‌ها و ریزش جزئی پایه‌ها در حداکثر سرعت ذرات بیش از ۵/۰۸ سانتی‌متر بر ثانیه را ثبت کردند. در این تحقیق رابطه (۱-۳) برای محاسبه سرعت ذرات ارائه شده است (Rupert & Clark, 1977).

$$V = K \left(\frac{R}{Wb} \right)^{-n} \quad (1-3)$$

در این رابطه V سرعت ذرات، R فاصله، W وزن خرج انفجاری، K ثابت و n ضریب فروپاشی است. حیات‌داودی^۳ و براون^۴ (۱۹۷۹)، در راستای سنجش امنیت انفجارهای سطحی بر سازه‌های زیرزمینی معدن مجاور، تحقیقات میدانی و آزمایشگاهی انجام دادند و به نتایجی دست یافتند که شامل ابزار سنجش که به سقف از طریق پیچ نصب شده‌اند، سرعت ذره‌ای بیشتری را نسبت به ابزاری که با چسب رزین به سقف وصل شده‌اند، ثبت کرده‌اند، دامنه سرعت ذرات سطحی در سقف معدن اغلب کمتر از سطح زمین بوده، اما فرکانس‌های سقف معدن زیرزمینی بسیار بیشتر است (Hayatdavoudi & Brown, 1979). جنسن^۵ و همکاران (۱۹۷۹)، به‌منظور بررسی تأثیر انفجارهای سطحی بر یک معدن زغال سنگ که به روش اتاق و پایه استخراج می‌شود، تحقیقات میدانی شروع کرده و به‌منظور اندازه‌گیری میزان لرزش‌های ایجاد شده، در سقف و کف معدن زیرزمینی لرزه‌نگارهایی نصب کردند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اطلاعات ثبت شده از لرزش در سطح و عمق زمین با رابطه‌ها ارائه شده پیشین رابطه خوبی دارد و میزان لرزش ثبت شده در کف معدن از میزان لرزش در سقف معدن عموماً کمتر است. بر اساس شکل ۱-۳، حداکثر سرعت ذرات ثبت شده در این تحقیق ۴۴/۴۵ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است که در این سطح از حداکثر سرعت ذرات صدمه به سازه زیرزمینی مشاهده نشده است (Jensen et al., 1979).

1 Rupert
2 Clark
3 Hayatdavoudi
4 Brown
5 Jensen

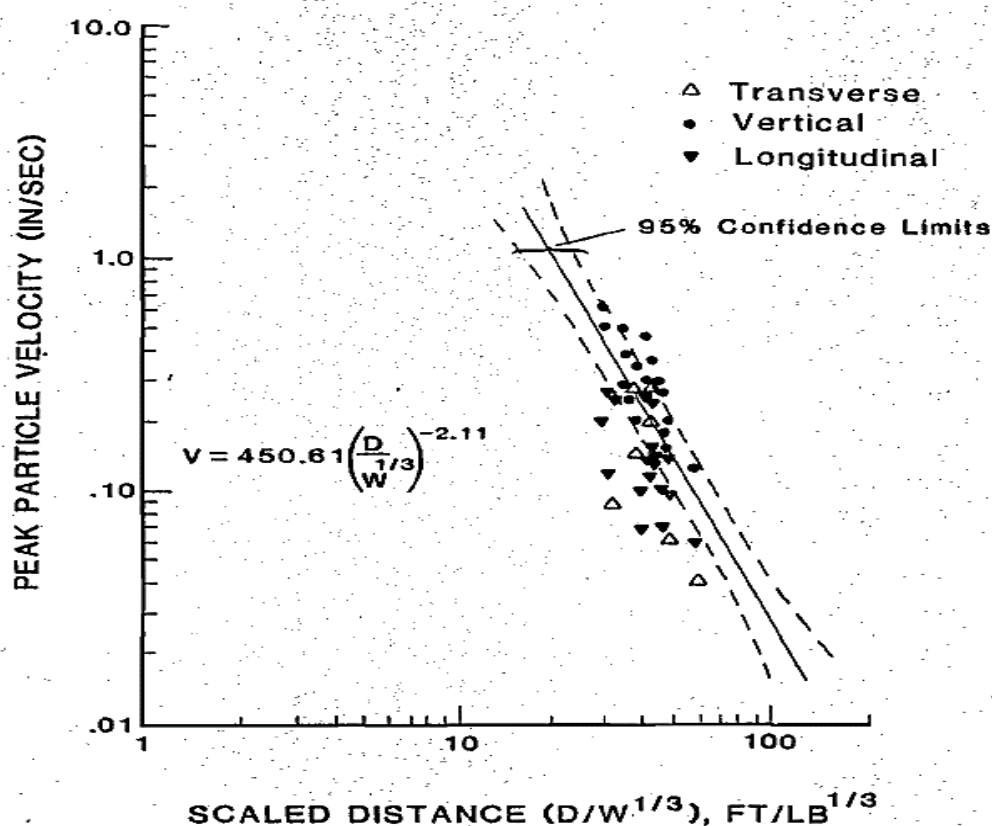


شکل ۳-۱: اطلاعات و حدود سطح اطمینان ۹۵٪ برای لرزه‌نگاری‌های ثبت شده در فواصل مقیاس دار شده ریشه دوم (Jensen et al., 1979)

فنگ^۱ و همکاران (۱۹۸۳)، تحقیقی برای سنجش تأثیر انفجارهای سطحی بر بازکننده‌های معدن زغال زیرزمینی برای ایجاد دستورالعمل‌های ایمنی و اقتصادی برای انفجارهای سطحی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از روش‌های آماری یک رابطه‌ی خطی میان وزن ماده منفجره و فاصله تا محل انفجار ارائه کردند. در این رابطه توان پارامتر وزن ماده منفجره برای سطح زمین ریشه دوم و در فضاهای زیرزمینی ریشه سوم در نظر گرفته شده است. در این مشاهدات، مقدار حداکثر سرعت ذرات در محور عمودی لرزه‌نگار نسبتاً بیشتر از دیگر جهت‌ها بوده است. این حاکی از آن است که در بررسی تأثیرات آتشفباری‌های سطحی بر

¹ Phang

بازکننده‌های زیرزمینی، جهت عمودی لرزش مهم‌ترین عامل است. شکل ۲-۳، منحنی برازش خطی حداکثر سرعت ذرات و فاصله مقیاس شده برای معدن زیرزمینی نشان می‌دهد (Phang et al., 1983).



شکل ۲-۳: منحنی برازش خطی حداکثر سرعت ذرات و فاصله مقیاس شده برای معدن زیرزمینی (Phang et al., 1983)

سیسکایند^۱ و همکاران (۱۹۸۷)، برای بررسی شکایات، از صدمات آتشیاری‌های سطحی بر ساختمان‌ها در بلن‌فرد^۲ مطالعاتی را انجام دادند. در این پژوهش، ۵۰۰ مورد از اطلاعات انفجارهای سطحی ثبت شده در طی ۹ ماه در یک معدن زیرزمینی متروکه که شهر بر روی آن قرار داشت، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد، صدمات ناشی دارای سه دلیل است:

(۱) امواج سطحی با فرکانس ۴ تا ۱۰ هرتز.

(۲) امواج تضعیف شده با دامنه موج بالا نسبت به برداشت‌ها در معادن زغال دیگر.

(۳) امواج سازنده ایجاد شده به وسیله انفجار تاخیری.

1 Siskind
2 Blanford

همچنین فرکانس و دامنه موج‌های سطحی مشاهده شده با یک موج منعکس شده قوی از یک سطح زیرزمینی در عمق ۶۰ متر (در این عمق کارگاه استخراج شده متروکه قرار دارد) یکسان است (Siskind et al., 1983).

فوریه^۱ و گرین^۲ (۱۹۹۳)، در بررسی‌های میدانی خود تأثیر آتشفشانی‌های سطحی بر سازه‌های زیرزمینی معدن زغال را مورد بررسی قرار دادند. در نتیجه بررسی‌ها مشاهده شد که وقتی سرعت حداکثر ذرات به ۱۱۰ میلی‌متر بر ثانیه برسد، فقط صدمات جزئی به معدن وارد می‌شود. در چند انفجار مجزا که در بالای یک معدن زیرزمینی انجام گرفت، سرعت حداکثری ذرات تا ۳۹۰ میلی‌متر بر ثانیه افزایش یافت که موجب صدمات شدید و ریزش‌هایی در فضاها و زیرزمینی شد. همچنین رابطه‌ای تجربی برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات ارائه شد که با تحقیقات انجام شده پیشین همخوانی خوبی دارد (Fourie & Green, 1993).

سینگ^۳ (۲۰۰۲)، تحقیقی برای بررسی تأثیر آتشفشانی‌های سنگین در معدن روباز زغال بر روی پایداری سازه‌های زیرزمینی هفت معدن مجاور انجام داد. برای ارزیابی رفتار لایه زغال، ابزارآلات اندازه‌گیری در سقف و ستون‌ها نصب شده است. از ۲۰۲ آتشفشانی استخراجی ثبت شده، نتایج زیر به دست آمده است:

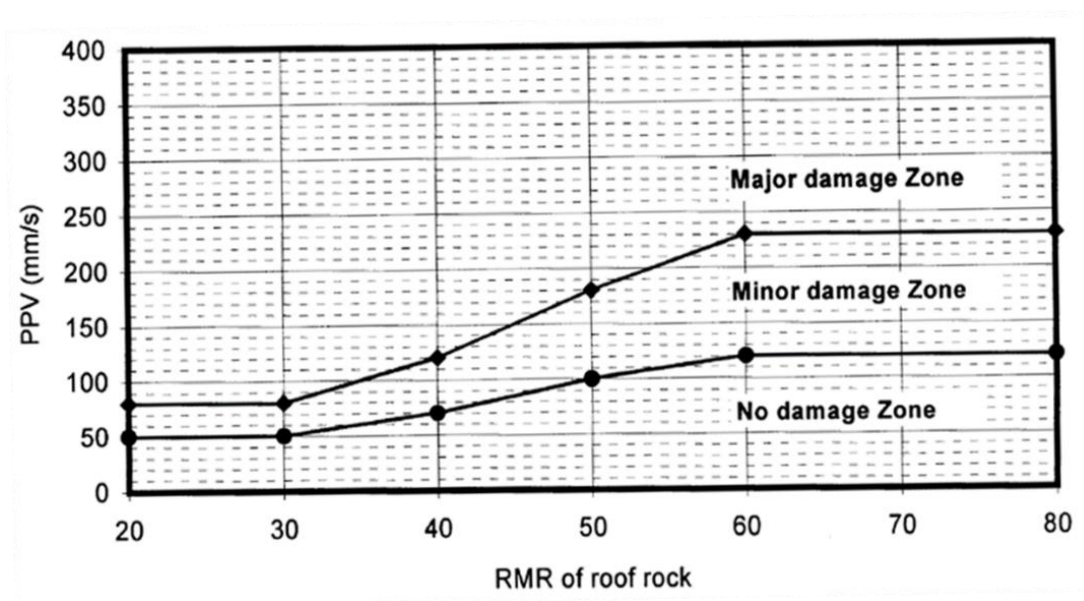
(۱) صدمات جدی با عبور حداکثر سرعت ذرات از ۱۸۱/۹ میلی‌متر بر ثانیه مشاهده شده است.

(۲) صدمات جزئی در قالب ریزش تکه‌های زغال از سقف و ستون با عبور حداکثر سرعت ذرات از ۱۱۳ میلی‌متر بر ثانیه مشاهده شده است. شکل ۳-۳، میزان حداکثر سرعت ذرات در مقایسه با سیستم طبقه بندی توده سنگ را نشان می‌دهد.

(۳) آستانه لرزش برای امنیت سازه‌های زیرزمینی بر اساس طبقه‌بندی سیستم توده سنگ سقف، پیشنهاد شده است. جدول ۲-۳، حداکثر سرعت ذرات مجاز را با توجه به طبقه‌بندی سیستم توده سنگ سقف نشان می‌دهد.

1 Fourie
2 Green
3 Singh

۴) مشاهدات نشان می‌دهد که لرزش سقف در تقاطع‌ها از میزان لرزش در سقف تونل‌های حمل و نقل بیشتر است (Sing, 2002).



شکل ۳-۳: زون‌های مختلف صدمه بر اساس RMR و PPV (Sing, 2002)

جدول ۳-۲: حداکثر سرعت ذرات با توجه به RMR سنگ سقف (Sing, 2002)

RMR سنگ سقف	حداکثر سرعت ذرات مجاز (mm/s)
۳۰-۲۰	۵۰
۴۰-۳۰	۷۰-۵۰
۵۰-۴۰	۱۰۰-۷۰
۶۰-۵۰	۱۲۰-۱۰۰
۸۰-۶۰	۱۲۰

دفتر انفجار سازمان حفاظت محیط زیست ایالت ویرجینیای غربی^۱ (۲۰۰۷)، برای اطمینان از سطح لرزش‌های ناشی از آتشباری‌های سطحی بر سازه‌های زیرزمینی معدنی متروکه که حال، تبدیل به زیستگاه

¹ West Virginia Department of Environmental Protection, Office of Explosives and Blasting

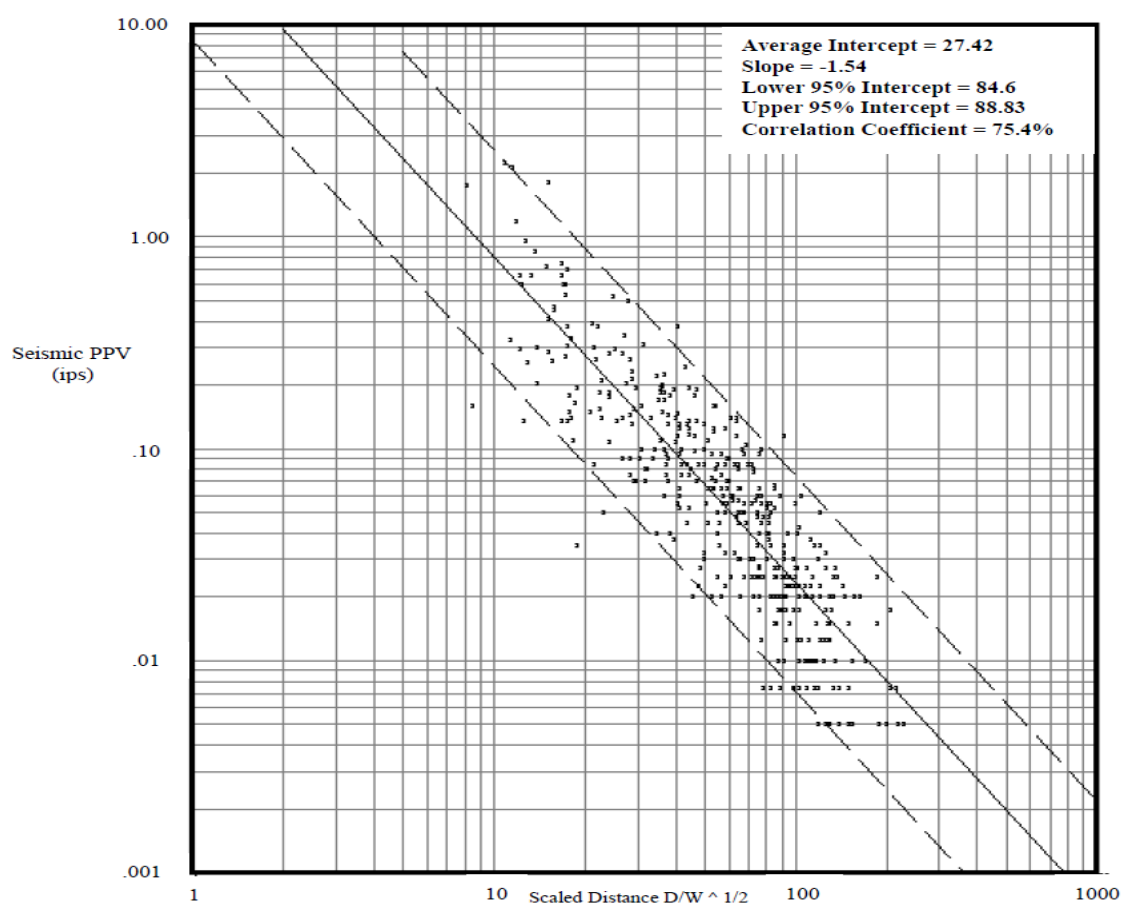
خفاش‌های در حال انقراض شده، تحقیقات میدانی را شروع کردند. در این تحقیق، با بررسی ۱۰۷ داده حاصل از لرزه‌نگاری که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، نتایج زیر را ارائه کردند:

(۱) سرعت حداکثری ذرات در سطح زمین نسبت ۲ تا ۹/۷ برابری سرعت حداکثری در فضاهای زیرزمینی را دارد که ۹۰٪ این بازه بین ۲ تا ۶ قرار دارند.

(۲) با بزارش اطلاعات معدن به همراه اطلاعات کسب شده، رابطه (۲-۳) با سطح اطمینان ۹۵٪ ارائه شده است.

$$V = 86 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.53} \quad (2-3)$$

که در آن V سرعت ذرات (ips)، D فاصله انفجار تا محل اندازه‌گیری (ft) و W حداکثر وزن خرج به ازای تأخیر (پوند) است (Virginia, 2007).



شکل ۳-۴: مجموع داده‌های لرزه‌نگاری (Virginia, 2007)

ساملیانا^۱ و همکاران (۲۰۰۹)، در تحقیقی اثر انفجارهای سطحی با چال‌های بلند، پایداری سدهای آب زیرزمینی در معدن رامگوندان^۲ را مورد بررسی قرار دادند. ۱۰ انفجار آزمایشی در بخش‌های مختلف معدن روباز در این تحقیق انجام گرفت و مقدار لرزش‌ها در ستون‌های نزدیک به سدهای زیرزمینی ثبت شده است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بدین گونه است:

- حداکثر سرعت ذرات ثبت شده در سقف ۵/۹ میلی‌متر بر ثانیه با فرکانس ۲۲ هرتز است، تأثیرات مخربی بعد از این انفجار مشاهده نشده است.
- رابطه تجربی (۳-۳)؛ بر اساس برازش داده‌های حاصل برای پیش‌بینی سطح لرزش در نزدیکی سدهای آب زیرزمینی پیشنهاد شده است (Sawmliana et al., 2009).

$$PPV = 87103 \times \left[\frac{R}{\sqrt{Q_{max}}} \right]^{-2.89} \quad (3-3)$$

که در این رابطه PPV حداکثر سرعت ذرات (mm/s)، R فاصله تا محل انفجار (m) و Q_{max} میزان کل خرج (Kg) است.

۳-۳- بررسی سوابق علمی بعد از سال ۲۰۱۰

در این بخش به بررسی مطالعات انجام شده توسط محققین بعد از سال ۲۰۱۰ پرداخته شده است. همانند مطالعات گذشته، بیشتر مطالعات به صورت میدانی و برخی از آن‌ها با مدل‌سازی عددی و روش‌های فرا ابتکاری انجام شده است. در بیشتر این مطالعات نیز با استفاده از روش‌های تحلیلی و آماری، رابطه‌ها تجربی برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات ارائه شده است. در جدول ۳-۳، به برخی از مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته بعد از سال ۲۰۱۰ در مورد تاثیر انفجارهای سطحی بر سازه‌های زیرزمینی، اشاره شده است.

1 Sawmliana
2 Ramagundam

جدول ۳-۳: مطالعات محققین پیشین بعد از سال ۲۰۱۰

نام پژوهشگران	سال	هدف
دب و جا	۲۰۱۰	ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه PPV با استفاده از شبکه عصبی
ژیا و همکاران	۲۰۱۳	ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه سرعت بحرانی ذرات لاینینگ تونل در انفجار
کوهنوا	۲۰۱۳	بررسی تاثیر لرزه زمین بر سازه‌های بتنی زیرزمینی
لودانوسکی	۲۰۱۴	بررسی تاثیرات انفجارهای معدن روباز در حال توسعه بر فضاهای زیرزمینی مجاور
سینگ و همکاران	۲۰۱۵	درجه‌بندی آستانه PPV مجاز براساس RMR
جا و دب	۲۰۱۵	ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه PPV
دوان و همکاران	۲۰۱۸	بررسی تاثیرات انفجارهای سطحی بر مقاومت توده‌سنگ در برگیرنده سازه زیرزمینی
موسی و همکاران	۲۰۱۸	ارائه شاخص صدمه در تونل‌های زیرزمینی
لو و همکاران	۲۰۱۹	بررسی تاثیر امواج P بر روی سرعت ذرات پیرامون تونل‌های دایره‌ای
لیو و همکاران	۲۰۲۰	بررسی تاثیر ارتعاشات انفجار بر سازه‌های زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی عددی
ژانگ و همکاران	۲۰۲۱	ارائه یک مدل عددی برای بررسی تاثیر تنش‌های القایی ایجاد شده در یک انفجار بر فضاهای زیرزمینی
وانگ و همکاران	۲۰۲۱	بررسی صدمات ناشی از انفجارهای همزمان روباز و زیرزمینی بر فضاهای ذخیره‌سازی زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی عددی

دب^۱ و جا^۲ (۲۰۱۰)، تأثیرات انفجارهای سطحی را بر روی چند نقطه از دو معدن زیرزمینی اتاق و پایه مجاور با معدن سطحی، بررسی کردند. اطلاعات لرزشی مربوط به سقف هر دو معدن زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته و رابطه (۳-۴) از طریق برازش و رابطه (۳-۵) از طریق شبکه عصبی، به‌منظور پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات ارائه شده است، همچنین ملاحظه شد، قدرت پیش‌بینی شبکه عصبی برای سرعت ذرات بهتر از برازش است (Deb & Jha, 2010).

1 Deb
2 Jha

$$PPV = 12.397 \left(\frac{D}{Q^{0.35}} \right)^{-1.573} \quad (4-3)$$

$$PPV = 52.301 \left(\frac{D}{Q^{0.26}} \right)^{-2.008} \quad (5-3)$$

که در این رابطه PPV حداکثر سرعت ذرات (mm/s)، D فاصله تا محل انفجار (m) و Q میزان کل خرج (Kg) است.

ژیا^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیرات انفجارهای استخراجی یک تونل را بر روی توده سنگ دربرگیرنده و سیستم‌های لاینینگ تونل مجاور بررسی کردند. با استفاده از نتایج میدانی و محاسبات، رابطه (۶-۳) برای محدود کردن صدمات وارد شده به تونل، ارائه کردند. (Xia et al., 2013).

$$V_{cri} = 0.1318R_D + 0.0095 \quad (6-3)$$

که در آن R_D محدوده صدمات دور تونل (m) است. در حداکثر سرعت ذرات کمتر از ۰/۳ میلی‌متر بر ثانیه هیچ‌گونه صدمه‌ای به سیستم لاینینگ تونل مجاور وارد نمی‌شود. مقدار حداکثر سرعت ذرات ۰/۲۲ میلی‌متر بر ثانیه به‌عنوان حد آستانه برای ورودی و خروجی تونل مجاور پیشنهاد کردند (Xia et al., 2013). کوهنوا^۲ (۲۰۱۳)، برای شناسایی تأثیر مخرب انفجارهای سطحی در معدن روباز بر سازه‌های بتنی زیرزمینی رابطه (۷-۳) را ارائه کرد. از این رابطه، مقدار حداکثر سرعت ذرات به‌هنگامی که انفجار در نزدیکی سازه باشد، می‌توان محاسبه کرد. همچنین ایشان به این نتیجه دست یافت که با افزایش زمان تأخیر بین چال‌های انفجاری، می‌توان فرکانس لرزش را زیاد کرد و دامنه لرزش را کم کرد. این امر باعث ایجاد تداخل مخرب موج می‌شود. موج مخرب حاصله توسط دو موج مجاور مورد تشدید قرار نمی‌گیرد و از تداخل سازنده جلوگیری می‌شود (kuhnow, 2013).

$$PPV = \frac{Dif \times Ot}{E \times Cp} \quad (7-3)$$

که در آن Cp سرعت انتشار موج P در سنگ (m/sec)، Ot مقاومت کششی شبه استاتیک بتن (MPa)، E مدول یانگ بتن (GPa)، Dif فاکتور افزایش دینامیکی است.

1 Xia
2 Kuhnnow

لوانوسکی^۱ (۲۰۱۴)، در پروژه‌ای به منظور توسعه محدوده فعالیت یک شرکت معدنی، تحقیقاتی در مورد تأثیرات انفجارهای سطحی بر یک معدن زیرزمینی مجاور انجام داده است. او با استفاده از رابطه (۸-۳) که از اطلاعات موجود آتشیاری‌های انجام گرفته، به دست آمده، به نتایج زیر دست یافت:

- برای منطقه زیر محدوده انفجار (۲۵۰ متر اختلاف) لرزش پیش‌بینی شده بین ۲ تا ۲۶ میلی‌متر بر ثانیه است.
- منطقه‌ای به فاصله ۳۰۰ متر از محل انفجار، لرزش بین ۱/۵ تا ۱۹ میلی‌متر بر ثانیه پیش‌بینی شده است.
- تأثیر موج‌های انفجاری بر خانه‌ها، زیرساخت‌ها و معدن زیرزمینی با اتخاذ اقدامات مدیریتی قابل کنترل است (Lewandowski, 2014).

$$V = 842 \left(\frac{D}{\sqrt{m}} \right)^{-1.6} \quad (8-3)$$

در این رابطه V سرعت ذرات (mm/s)، D فاصله از انفجار (m) و m وزن خرج (Kg) است. سینگ^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، در تحقیقی اثرات ۸۶ انفجار در یک معدن روباز سرب و روی واقع در هند را بر سازه‌های زیرزمینی مجاور بررسی کردند. لرزه‌های حاصل از انفجار روباز، به‌صورت همزمان در ستون، سقف و در کف ثبت شدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بیشترین لرزش ثبت شده در سقف و کمترین میزان در کف متقابل آن بوده است، حفره‌های زیرزمینی در کنار گسترش هندسی، نقش مهمی در تضعیف موج‌های سطحی دارند و بر اساس سیستم طبقه بندی توده سنگ سقف، آستانه لرزش برای امنیت سازه‌های زیرزمینی همانند جدول ۳-۴، تعریف شده است (Singh et al., 2015).

1 Lewandowski
2 Singh

جدول ۳-۴: ارزش‌های آستانه برای ایمنی و ثبات ستون‌ها/سقف و دیواره‌های کناری (Singh et al., 2015)

RMR	آستانه لرزش بر حسب PPV برای ایمنی و ثبات سقف (mm/s)	آستانه لرزش بر حسب PPV برای ایمنی و ثبات ستون‌ها/ دیوار کناری (mm/s)
۳۰-۲۰	۵۰	۲۰
۴۰-۳۰	۷۰-۵۰	۳۰-۲۰
۵۰-۴۰	۱۰۰-۷۰	۴۰-۳۰
۶۰-۵۰	۱۲۰-۱۰۰	۵۰-۴۰
۸۰-۶۰	۱۲۰	۵۰

جا و دب (۲۰۱۵)، طی تحقیقات میدانی در یک معدن با بخش‌های زیرزمینی و روباز فعال، آثار موج‌های انفجاری معدن روباز را بر سازه‌های زیرزمینی اتاق و پایه معدن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها رابطه (۹-۳) را به‌عنوان رابطه جدید پیش‌بینی کننده مقدار حداکثر سرعت ذرات ارائه دادند. (Jha and Deb, 2015)

$$PPV = 12397 \left(\frac{D}{Q^{0.35}} \right)^{-1.573} \quad (9-3)$$

در این رابطه PPV حداکثر سرعت ذرات (mm/s)، D فاصله از انفجار (m) و Q وزن خرج (Kg) است.

همچنین آن‌ها رابطه (۱۰-۳) را برای محاسبه فاکتور بدون بعد صدمه انفجاری در معدن زیرزمینی ارائه کردند. این رابطه برای برنامه‌ریزی انفجارها با ایمنی بالا در معادن روباز را با در نظر گرفتن پایداری سازه‌های زیرزمینی برای معدن مورد مطالعه ارائه کردند. در جدول ۳-۳، مقایسه مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در سقف و پایه‌های معدن، ارائه شده است (Jha and Deb, 2015).

$$BDF = \left[\frac{PVS \times \rho \times C_p}{GSI \times \sigma_{dts}} \right] \left[\frac{h}{W_p} \right] \quad (10-3)$$

که در آن PVS جمع برداری PPV (mm/s)، C_p سرعت موج P در توده سنگ (m/s)، σ_{dts} مقاومت کششی دینامیکی توده سنگ (N/m^2) است.

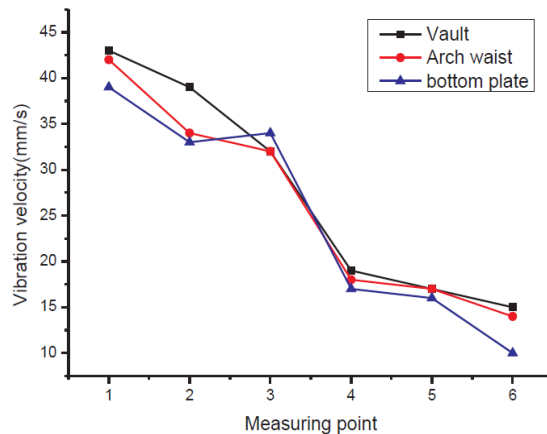
جدول ۳-۵: مقایسه میزان PPV اندازه‌گیری شده در سقف و پایه‌های معدن (Jha and Deb, 2015)

PPV (mm/s)		مشخصات
پایه	سقف	
۱۶/۳۳	۲۴/۴۳	میانگین
۳۸/۵	۵۷/۷۵	حداکثر
۲/۹۹	۴/۰۴	حداقل

همان طور که از جدول ۳-۳ مشاهده می‌شود، میزان حداکثر سرعت ذرات در سقف ۱/۵ برابر پایه‌های معدن است (Jha and Deb, 2015).

دوان^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، با انجام مطالعات میدانی و مدل‌سازی‌های عددی تأثیرات انفجارهای سطحی را بر توده سنگ‌های دربرگیرنده راه‌های زیرزمینی را قبل و بعد از انجام آتشباری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که سرعت لرزش در هر ایستگاه اندازه‌گیری کمتر از ۱۵ سانتی‌متر بر ثانیه بوده و حداکثر لرزش در هر ایستگاه اندازه‌گیری با توجه به فاصله محل سنجش تا نقطه انفجار دچار تضعیف می‌شود. شکل ۳-۵، لرزه‌های ثبت شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. لرزه‌های ایجاد شده در سنگ‌های دربرگیرنده مطابق با استانداردهای کنترل ایمنی برای پایداری و ظرفیت باربری توده سنگ دربرگیرنده در راه‌های معدنی است (Duan et al., 2018).

1 Duan



شکل ۳-۵: لرزه‌های ثبت شده در ایستگاه‌های اندازه‌گیری (Duan et al., 2018)

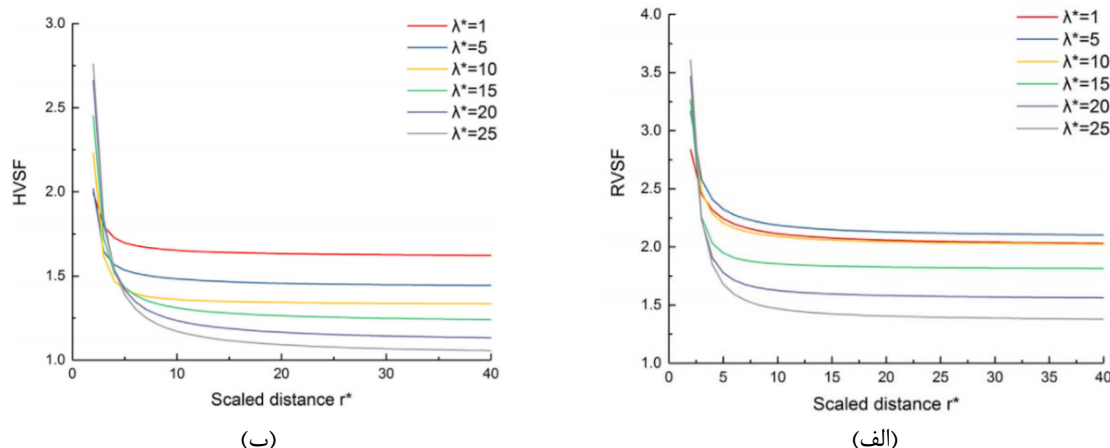
موسی^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، به منظور سنجش قابلیت اطمینان شاخص صدمه در یک تونل زیرزمینی جعبه‌ای شکل، مطالعاتی را انجام داده‌اند. در این مطالعه، از روش‌های عددی به منظور محاسبه حداکثر سرعت ذره ایجاد شده توسط انفجارهای سطحی استفاده شده است. در این مدل با توجه به تغییرات ضخامت لاینینگ تونل میزان صدمه بر سقف و دیواره‌های تونل بررسی شده است. در نهایت، رابطه‌ی (۳-۱۱) برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات ارائه شده است. (Mussa et al., 2018).

$$PPV = 0.877890 - 0.377653 D + 0.00048 T + 0.001727 W + 0.000440 \\ \times D \times T - 0.000156 \times D \times W - 1.66866 \times 10^{-6} \times T \times W \quad (11-3) \\ + 0.019156 D^2 - 6.48 \times 10^{-7} \times T^2 + 1.0058 \times 10^{-7} \times W^2$$

در این رابطه D عمق تونل میان ۴ تا ۸ متر، T ضخامت لاینینگ میان ۲۵۰ تا ۷۵۰ میلی‌متر و W وزن خرج میان ۲۲۷ تا ۴۵۳۶ کیلوگرم است.

لو^۲ و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی تاثیر امواج P بر روی سرعت ذرات سنگ دربرگیرنده یک تونل با مقطع دایره‌ای شکل پرداخته‌اند. در این مطالعه از روش‌های ریاضی برای محاسبه و ارزیابی فاکتور مقیاس شده سرعت شعاعی و فاکتور مقیاس شده سرعت هوپ استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش میزان فاصله مقیاس شده، میزان دو فاکتور ذکر شده، کاهش می‌یابد. شکل ۳-۶، نمودار تغییرات فاکتور مقیاس شده سرعت شعاعی و فاکتور مقیاس شده هوپ را نشان می‌دهد (Lu et al., 2019).

1 Mussa
2 Lu



شکل ۳-۶: نمودار تغییرات الف) فاکتور مقیاس شده سرعت شعاعی و ب) فاکتور مقیاس شده هوپ (Lu et al., 2019)

لیو^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، به منظور ارزیابی تاثیر ارتعاشات ناشی از انفجارهای زیرزمینی بر تونل‌های ترابری، مدل عددی ارائه کردند. این مدل عددی با استفاده از برداشت حداکثر سرعت ذرات ایجاد شده در انفجار مجاور یک تونل ترابری در منطقه ووهان چین، اعتبارسنجی شده است. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل پارامتری در مدل عددی، سه رابطه (۱۲-۳)، (۱۳-۳) و (۱۴-۳) میان حداکثر سرعت ذرات و تنش کششی وارد بر لاینینگ تونل، ارائه شده است (Liu et al., 2020).

$$V_{x\max} = 6.175\sigma_t + 0.8505 \quad (12-3)$$

$$V_{x\max} = 201.89 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.422} \quad (13-3)$$

$$\sigma_t = 32.69 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.422} - 0.8505 \quad (14-3)$$

در این رابطه‌ها $V_{x\max}$ حداکثر سرعت ذرات (mm/s)، σ_t تنش کششی حداکثر (MPa)، Q میزان خرج مصرفی (Kg) و R فاصله تا محل انفجار (m) است.

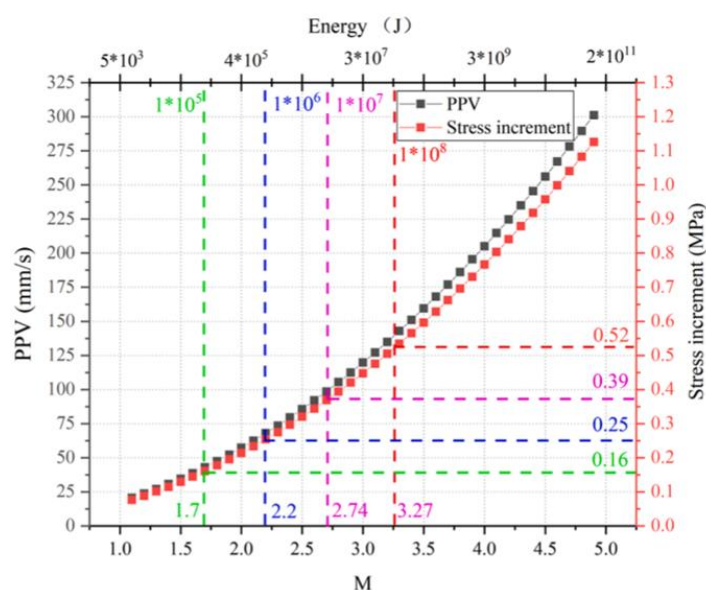
ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۱)، به منظور محاسبه تنش القایی ایجاد شده توسط رویدادهای لرزه‌ای در معادن زغال سنگ مطالعه‌ای را انجام دادند. در این مطالعه با استفاده از برداشت حداکثر سرعت ذرات به نحوه تاثیر تنش و احتمال انفجار سنگ^۳ پرداخته شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که با

1 Liu

2 Zhang

3 Rock burst

عبور از میزان مجاز حداکثر سرعت ذرات در یک رویداد دینامیکی، احتمال افزایش تنش و رویداد انفجار سنگ بیشتر می‌شود. از دیگر نتایج مهم می‌توان به این اشاره کرد که آن‌ها بر این اعتقاد هستند که می‌توان از پارامتر حداکثر سرعت ذرات به عنوان یک شاخص قابل اطمینان برای رفتارسنجی تنش و انفجار، استفاده کرد. شکل ۳-۷، نمودار تغییرات حداکثر سرعت ذرات، انرژی حاصل از انفجار، میزان تنش القایی و مجموع رویدادهای انفجار سنگ را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2021).



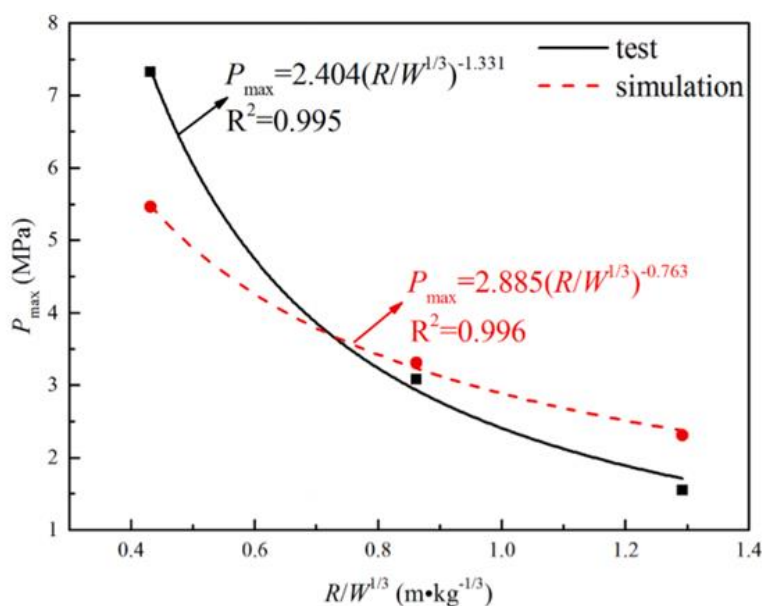
PPV: حداکثر سرعت ذرات، Energy: انرژی حاصل از انفجار، Stress Increment: میزان تنش القایی و

M: مجموع رویدادهای انفجار سنگ

شکل ۳-۷: نمودار تغییرات حداکثر سرعت ذرات، انرژی حاصل از انفجار، میزان تنش القایی و مجموع رویدادهای انفجار سنگ (Zhang et al., 2021)

وانگ و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از مدل عددی، ارزیابی صدمات ناشی از انفجارهای همزمان از موقعیت‌های متفاوت، بر فضاهای زیرزمینی ذخیره‌سازی مواد انجام داده‌اند. این مدل با فرض اینکه نرم افزار LS-DYNA، یک نرم افزار صحت‌سنجی شده برای مدل‌سازی دقیق رفتار انفجار است، اعتبارسنجی شده است. حداکثر سرعت ذرات بدست آمده از رابطه‌ها تجربی و مدل عددی، تطابق خوبی با یکدیگر دارند. شکل

۸-۳، نمودار تغییرات فشار حاصل انفجار نسبت به فاصله مقیاس شده را نشان می‌دهد (Wang et al., 2021).



شکل ۸-۳: نمودار تغییرات فشار حاصل انفجار نسبت به فاصله مقیاس شده (Wang et al., 2021)

۴-۳- جمع بندی

تاکنون مطالعات بسیاری بر روی اثرات ناشی از لرزش انفجار بر روی سازه‌های مجاور انجام شده است. همچنین رابطه‌ها بسیاری برای محاسبه لرزش‌های ناشی از انفجار ارائه شده است. بیشتر این رابطه‌ها بر اساس پارامترهای فاصله از انفجار و میزان خرج مصرفی است. نکته قابل توجه در این رابطه‌ها این است که تمامی رابطه‌ها دارای ضرایب ثابتی هستند. این ضرایب در هر معدن با توجه به خواص سنگ و ساختارهای زمین‌شناسی منطقه متفاوت است و باید با استفاده از مطالعات میدانی، برداشت‌های لرزه نگاری و تحلیل‌های آماری محاسبه شود. از این بحث می‌توان نتیجه گرفت که مطالعات میدانی و برداشت‌های لرزه نگاری از ملزومات محاسبه و پیش‌بینی مقدار حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار در معادن روباز و زیرزمینی است.

فصل چهارم

معرفی معدن انگوران و برداشت‌های میدانی

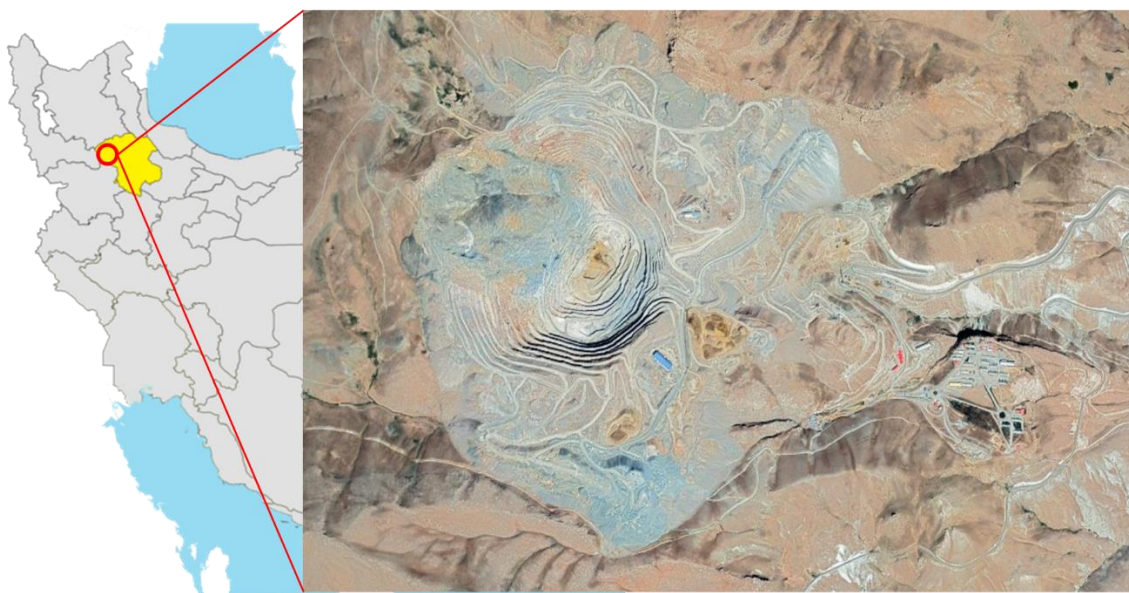
۴-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل‌های گذشته به آن اشاره شد، برای تحلیل اثرات ناشی از لرزش انفجار بر روی سازه‌های مجاور آن، باید مطالعات میدانی و برداشت‌های لرزه‌نگاری انجام شود. در این پژوهش مورد مطالعاتی، معدن سرب و روی انگوران است. در این فصل به‌طور مختصر اطلاعاتی در مورد معدن انگوران ارائه شده است و سپس روش برداشت داده‌های لرزه‌نگاری شرح داده شده است. در نهایت یک پایگاه داده برای برداشت‌های صورت گرفته ارائه شده است.

۴-۲- مورد مطالعاتی

معدن سرب و روی انگوران در محدوده استان زنجان، در ۱۲۵ کیلومتری جنوب غرب زنجان واقع شده است. این معدن بزرگ‌ترین تولیدکننده روی در ایران است و به‌عنوان یک ذخیره بزرگ غیرسولفور روی در مقیاس جهانی به شمار می‌رود. زون سولفور این معدن در مقایسه با زون کربناته، تاکنون استخراج قابل‌توجهی نداشته است (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹).

معدن انگوران در ناحیه‌ای کوهستانی و در ارتفاع متوسط محلی ۲۹۵۰ متری و از نظر مختصات جغرافیایی در طول ۴۷ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی و عرض ۳۶ درجه و ۳۷ دقیقه شمالی قرار گرفته است. نزدیک‌ترین روستا به معدن روستای قلعه‌جوق با جمعیت تقریبی ۲۰۰ نفر و نزدیک‌ترین شهر دندی با جمعیت ۲۰۰۰ نفر است. راه دسترسی به معدن از طریق شهر زنجان به شهر دندی و سپس مجتمع انگوران است. محدوده معدن دارای زمستان‌های سرد و پربارش است، به‌طوری‌که بارش برف سنگین و باد شدید دسترسی از زنجان به دندی را با مشکل مواجه می‌سازد و فعالیت معدنکاری در این فصول، به‌شدت تحت تأثیر آب‌وهوا قرار می‌گیرد. میزان بارش سالیانه معدن به‌طور متوسط ۳۴۰ میلی‌متر گزارش شده است. میانگین رطوبت در فصل سرد ۶۰٪ و در فصل گرم ۴۰٪ است. به‌طور کلی فصول بهار و پاییز در این منطقه، نسبتاً کوتاه بوده و گذر فصل زمستان به تابستان و بالعکس نسبتاً سریع است (تقوی، ۱۳۹۴). شکل ۴-۱، موقعیت معدن انگوران در نقشه ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: موقعیت معدن انگوران در نقشه ایران

۴-۲-۱- شرایط زمین‌شناسی

کانسار انگوران در بخش مرکزی یک تاقدیس و در میان دو بخش دگرگون شده شیستی و آهکی قرار دارد. کمر بالای کانسار از لایه‌های آهک با شیبی حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه با امتداد به‌سوی جنوب شرق و کمر پایین آن نیز از لایه‌های شیست با شیبی حدود ۱۰ تا ۲۵ درجه و امتداد جنوب شرقی تشکیل شده است. شکل هندسی کانسار تقریباً به‌صورت یک عدسی یا گلابی وارونه با شیبی حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه با امتدادی به سمت جنوب شرق است (تقوی، ۱۳۹۴).

کانسار انگوران از سه بخش اکسیدی، سولفوری و مخلوط تشکیل یافته است. بخش اکسیدی در بالاترین قسمت کانسار، بخش سولفوره در پایین‌ترین قسمت و بخش مخلوط (مخلوط اکسید و سولفور) بین آن دو قرار گرفته است. کانسار انگوران از سطح زمین در تراز حدود ۲۹۸۰ متر رخنمون داشته و عمق آن در حدود تراز ۲۷۰۰ متر است. مقدار ذخیره برآورد شده در این معدن ۱۱ میلیون تن است. در این معدن فعالیت استخراج به‌صورت روباز و زیرزمینی همزمان انجام می‌شود. حد روباز زیرزمینی با توجه به فعالیت‌های این معدن تراز ۲۷۷۰ متر در نظر گرفته شده است (تقوی، ۱۳۹۴).

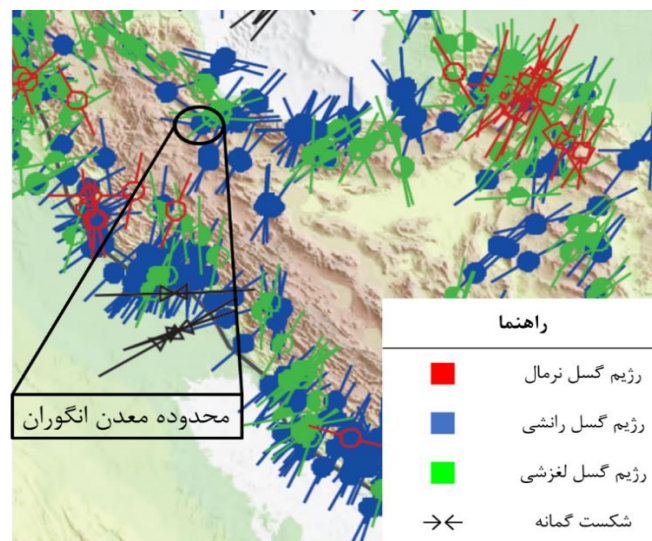
۴-۲-۲- شرایط تکتونیکی و ژئومکانیکی منطقه انگوران

با توجه به برداشت‌های انجام شده و نقشه ۱:۱۰۰۰ زمین‌شناسی تهیه شده به منظور شناسایی گسل‌های منطقه، می‌توان گسل‌ها را به سه گروه گسل‌های شمالی-جنوبی، گسل‌های شمال شرقی-جنوب غربی و دسته گسل‌های شمال غربی- جنوب شرقی تقسیم کرد. در جدول ۴-۱، خصوصیات دسته گسل‌ها ارائه شده است (شرکت آتیه نگاران قاره، ۱۳۹۴).

جدول ۴-۱: مشخصات دسته گسل‌های منطقه انگوران (شرکت آتیه نگاران قاره، ۱۳۹۴)

ردیف	نام دسته	نوع گسل	شیب (درجه)	طول تقریبی
۱	شمالی-جنوبی	نرمال	۹۰	بیش از یک کیلومتر
۲	شمال شرقی - جنوب غربی	نرمال یا امتداد لغز	۷۰ تا ۸۰	۳۰۰ متر تا چندین کیلومتر
۳	شمال غربی - جنوب شرقی	نرمال یا امتداد لغز	۷۰ تا ۸۰	۳۰۰ متر تا یک کیلومتر

شکل ۴-۲، نقشه جهانی تنش بر روی صفحه ایران را نشان می‌دهد (Heidbach et al., 2016). همان‌طور که در این شکل مشخص است، محدوده معدن انگوران بین تنش‌های اصلی موجود در راستای شرقی غربی و شمال شرقی - جنوب غربی واقع شده است. با توجه به اطلاعات بالا می‌توان گفت که منطقه انگوران بشدت تکتونیزه است.



شکل ۴-۲: نقشه تنش‌های اصلی موجود بر روی صفحه ایران (Heidbach et al., 2016)

در معدن انگوران با استفاده از برداشت‌های میدانی و آزمون‌های مکانیک سنگی، خواص ماده سنگ این معدن مشخص شده است. در جدول ۴-۲، خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ماده‌سنگ دربرگیرنده معدن انگوران ارائه شده است (پازوکی، ۱۳۹۰).

جدول ۴-۲: خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ماده‌سنگ دربرگیرنده معدن انگوران (پازوکی، ۱۳۹۰)

نوع سنگ	GSI	RQD(%)	UCS(MPa)	$\gamma(KN/m^3)$	C (KPa)	$\phi(^{\circ})$
آهک	۵۲	۶۰	۷۵	۲۵	۸۹۶	۳۰
شیست	۵۰	۵۱	۵۰	۲۵	۸۹۹	۲۹/۴۴
کلی‌ستون	-	۵۰	-	۲۰	۳	۱۶

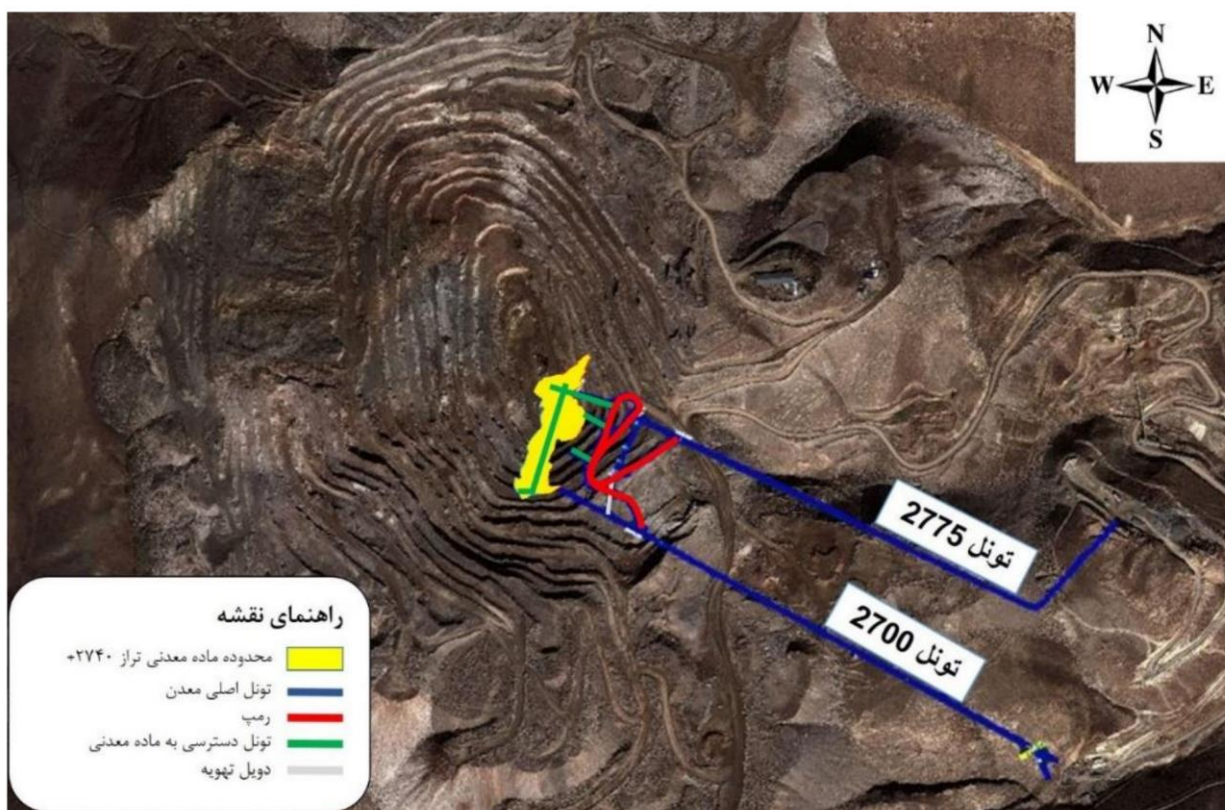
بر اساس نتایج حاصل از داده‌ها و بررسی درزه و شکاف‌های موجود در قسمت سقف و دیواره و همچنین در نظر گرفتن مقدار سیستم طبقه‌بندی توده سنگ RMR، میزان پایداری و نگهداری موردنیاز برای قسمت‌های مختلف حفریات در حال احداث مشخص شده است. نتایج ارائه شده مربوط به ارزیابی عددی کیفیت توده سنگ‌ها با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ به‌صورت میانگین در متراژهای حفرشده و جبهه کارهای مختلف در جدول ۴-۳، آورده شده است (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹).

جدول ۳-۴: ارزیابی عددی کیفیت توده سنگ با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR در جبهه کارهای مختلف (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹)

ردیف	کارگاه	متراژ	تعداد دسته درزه‌ها	سیستم نگهداری	RMR
۱	S2111W	۴۹/۲۰ تا ۶۲/۷۳	۳-۲	دارد	۳۶
۲	S2117	۴۲/۹۰ تا ۶۹/۶۰	۳-۲	دارد	۳۴
۳	S2124E	۲۳/۰۲ تا ۱۵/۹۵	۳	دارد	۲۹
۴	S2126w	۳۶/۰۴ تا ۲۸/۵	۳	دارد	۲۸
۵	S2134W	۰ تا ۱/۵	۳-۲	دارد	۳۵
۶	S2135E	۰ تا ۲۱/۲۳	۳-۲	دارد	۳۲
۷	S2143E	۱۸/۸۷ تا ۴۶/۸۹	۳-۲	دارد	۳۵
۸	S4106W	۰ تا ۸/۸۰	۲	ندارد	۴۰
۹	S4108W	۱/۹ تا ۸/۶۴	۳	دارد	۲۶
۱۰	S4109W	۰ تا ۰/۹۵	۳-۲	دارد	۳۷
۱۱	S4112E	۳۳ تا ۴۴/۱۲	۳-۲	دارد	۳۵
۱۲	S4119E	۵/۸۴ تا ۳۹/۵۶	۳-۲	دارد	۳۶
۱۳	S4162E	۳۶/۴۰ تا ۵۱/۳۰	۳	دارد	۲۹
۱۴	Ramp 2737	۱۰۳/۷۱ تا ۱۱۴/۲۰	۲	ندارد	۴۱
۱۵	G2737-N	۰ تا ۲۵/۳۷	۲	ندارد	۴۱
۱۶	G2737-S	۰ تا ۳	۲	ندارد	۴۰
۱۷	Orepass-Rasise2	۱۵/۵۳ تا ۱۵/۸۵	۲	ندارد	۴۱

۴-۲-۳- روش استخراج در معدن انگوران

همان‌طور که بیان شد، فعالیت استخراجی معدن انگوران به صورت همزمان به دو روش روباز و زیرزمینی انجام می‌شود. روش استخراج روباز در این معدن به صورت کاواک است. روش استخراج زیرزمینی به کاررفته نیز روش استخراج کارگاه و پایه همراه با پرکردن است. در برخی از تونل‌ها و یا حفاریات زیرزمینی که دارای شرایط ناپایدار است از قاب‌های فولادی و یا تورسیمی و تزریق شاتکریت برای تحکیم و پایداری آن بخش استفاده شده است. دسترسی به بخش زیرزمینی معدن توسط دو تونل که در ترازهای ۲۷۰۰ و ۲۷۷۵ متری حفر شده، امکان‌پذیر است. هر یک از این دو تونل، طولی نزدیک به ۱۲۰۰ متر و شیب کمتر از یک درجه دارند. این دو تونل توسط رمپی با شیب ۲۰ درجه به یکدیگر متصل شده‌اند. شکل ۳-۴، موقعیت تونل‌های دسترسی را نسبت به توپوگرافی و کاواک نشان می‌دهد (تقوی، ۱۳۹۴). شکل ۴-۴، نمایی از کاواک معدن انگوران را نشان می‌دهد. شکل ۴-۵، رمپ اصلی در معدن انگوران را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: موقعیت تونل نسبت به توپوگرافی و کاواک (تقوی، ۱۳۹۴)



شکل ۴-۴: نمایی کاواک معدن انگوران



شکل ۴-۵: رمپ اصلی معدن انگوران

۴-۳- بررسی الگوی انفجار پیاده شده در معدن انگوران

در معدن انگوران ماده معدنی به دو صورت روباز و زیرزمینی استخراج می‌شود. در بخش روباز این معدن از انفجار به منظور خردایش و استحصال ماده معدنی استفاده می‌شود. یکی از مسائل مهم که همواره طراحان معدن را به چالش کشیده است، تأثیر انفجارها در ناحیه روباز و زیرزمینی معدن بر پایداری فضاهای زیرزمینی است. طراحی الگوی انفجاری صحیح تأثیر به سزایی در پایداری و کاهش صدمات به فضاهای زیرزمینی دارد. جدول ۴-۴، اطلاعات مربوط به انفجارها از فروردین تا دی ماه سال ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹). شکل ۴-۶، انفجار در بخش روباز معدن انگوران را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴: اطلاعات مربوط به انفجارها و مصالح استفاده شده و میزان پیشروی ماهانه مربوط به سال ۱۳۹۹ (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹)

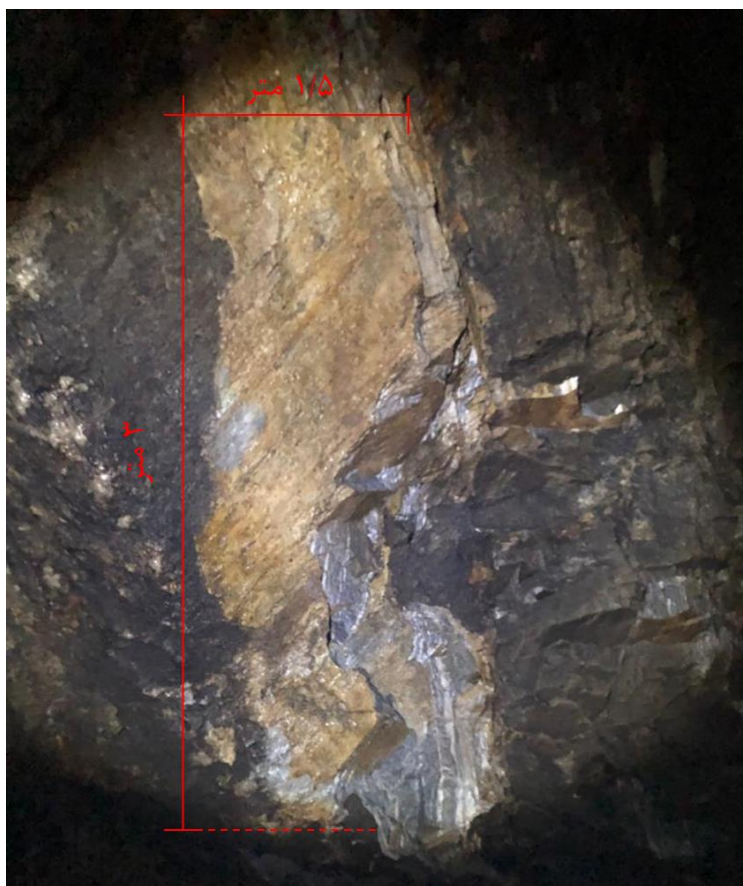
ماه	سیکل انفجار (عدد)	قطر چال (میلی متر)	تعداد چال (عدد)	امولایت (کیلوگرم)	چاشنی (عدد)	چاشنی ساده (عدد)	فیبله بارونی (متر)	کور تکس (متر)	خرج ویژه (کیلوگرم بر متر مکعب)	متر از پیشروی
فروردین ۹۹	۲۷۶	۴۲	۱۰۶۵۱	۶۱۵۵	۱۰۶۵۱	۳۸۷	۶۶۲	۴۲۵۰	۱/۲۳	۲۲۴/۰۸
اردیبهشت ۹۹	۲۸۴	۴۲	۱۰۶۴۵	۶۲۵۸	۱۰۶۵۷	۳۹۵	۶۷۹	۴۳۲۰	۱/۱۳	۲۱۹/۲۵
خرداد ۹۹	۳۳۶	۴۲	۱۲۹۸۶	۷۶۵۲	۱۲۹۱۲	۴۷۱	۷۶۱	۵۲۵۵	۱/۱۴	۲۲۹/۱۷
تیر ۹۹	۲۹۰	۴۲	۱۱۸۵۸	۶۸۰۷	۱۱۸۴۴	۴۰۶	۶۹۶	۴۶۸۵	۱/۱۹	۲۰۸/۱۱
مرداد ۹۹	۲۷۶	۴۲	۱۰۶۳۲	۶۹۲۶	۱۰۶۳۲	۳۷۶	۶۵۲	۴۲۳۵	۱/۲۸	۲۱۷/۵۳
شهریور ۹۹	۲۰۰	۴۲	۱۲۱۱۲	۷۶۷۸	۱۲۱۱۵	۴۰۵	۷۰۵	۵۷۳۵	۱/۳۳	۱۹۲/۰۳
مهر ۹۹	۲۹۵	۴۲	۱۱۷۰۲	۷۰۷۲	۱۱۷۰۲	۴۰۱	۶۹۶	۴۸۴۵	۱/۲۳	۲۰۳/۳۳
آبان ۹۹	۲۹۷	۴۲	۱۱۲۵۶	۶۴۱۰	۱۱۲۵۶	۴۲۲	۷۰۸	۴۸۷۵	۱/۱۲	۲۲۶/۱۴
آذر ۹۹	۳۱۵	۴۲	۱۱۷۹۸	۶۹۶۰	۱۱۷۹۸	۴۲۵	۷۲۹	۵۵۸۷	۱/۱۵	۲۱۷/۰۹
دی ۹۹	۳۰۵	۴۲	۱۰۸۹۵	۶۱۶۷	۱۰۹۰۰	۴۱۹	۷۲۴	۵۲۳۰	۱/۰۸	۲۲۴/۱۸
مجموع	۲۹۷۲	-	۱۱۴۵۳۵	۶۸۰۸۵	۱۱۴۴۶۷	۴۱۰۷	۷۰۲۴	۴۹۰۱۷	-	۲۱۶۰/۹۱



شکل ۴-۶: انفجار در بخش روباز معدن انگوران

در معدن انگوران در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۱۲ هجری شمسی انفجاری طراحی شد که منجر به ریزش موضعی در رمپ اصلی قسمت زیرزمینی معدن شده است. شکل ۴-۷، ابعاد ریزش ناشی از انفجار مذکور را در سقف رمپ اصلی، نشان می‌دهد. عمق ریزش در سقف تقریباً ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. مقدار وزن سنگ ریزشی با توجه به وزن مخصوص آن، ۳ کیلوگرم است. پس از این انفجار، الگوی آتشباری معدن اصلاح شده و میزان خرج به‌کاررفته در هر راند انفجار کاهش یافته است. این کاهش خرج باعث شده تا تمامی انفجارها در این معدن نتیجه مطلوبی داشته باشند و هیچ‌گونه ریزش و یا ناپایداری در قسمت زیرزمینی معدن مشاهده نشود. در جدول ۴-۵، مقایسه‌ای بین مشخصات یک آتش‌کاری که باعث ناپایداری رمپ اصلی قسمت زیرزمینی شده و یک انفجار تصحیح شده که هیچ‌گونه پیامدی نداشته است، ارائه شده

است. در این دو انفجار مقدار بار سنگ ۴/۲ متر، فاصله جناحی ۵ متر و قطر چال ۱۲۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹).



شکل ۴-۷: ابعاد ریزش ناشی از انفجار بهمن ماه را در سقف رمپ اصلی

جدول ۴-۵: مقایسه مشخصات آتش‌کاری منجر به ریزش و آتش‌کاری اصلاح شده (شرکت معدن زمین، ۱۳۹۹)

شماره	تاریخ	تراز بلوک انفجاری	تعداد چال	اضافه حفاری (m)	گل‌گذاری (m)	میزان خرج کل انفجار (تن)	حداکثر خرج بر تاخیر (Kg)	پیامدهای انفجار
۱	۱۳۹۹/۱۱/۱۲	۲۷۹۰	۵۳	۱/۳	۴/۴	۳/۹۷۵	۷۵	پرتاب سنگ و ریزش در داخل رمپ اصلی
۲	۱۴۰۰/۰۲/۱۸	۲۷۸۵	۲۵۵	۰	۱/۷ تا ۲/۲	۴/۰۰۴	۲۰	آتش‌کاری بدون مشکل -

از آنجا که این معدن در تاریخ‌های مذکور دستگاه ژئوفون در اختیار نداشته است، لذا مقدار حداکثر سرعت ذرات حاصل شده از انفجارها برای این رویدادها قابل اندازه‌گیری نبوده است. با توجه به اهمیت محاسبه میزان حداکثر سرعت ذرات مجاز در این مجموعه معدنی، در ادامه روند محاسبه و برداشت‌های میدانی انجام شده، به منظور تعیین حداکثر سرعت ذرات با استفاده از دستگاه ژئوفون شرح داده شده است.

۴-۴- برداشت‌های انجام‌شده برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات در مورد

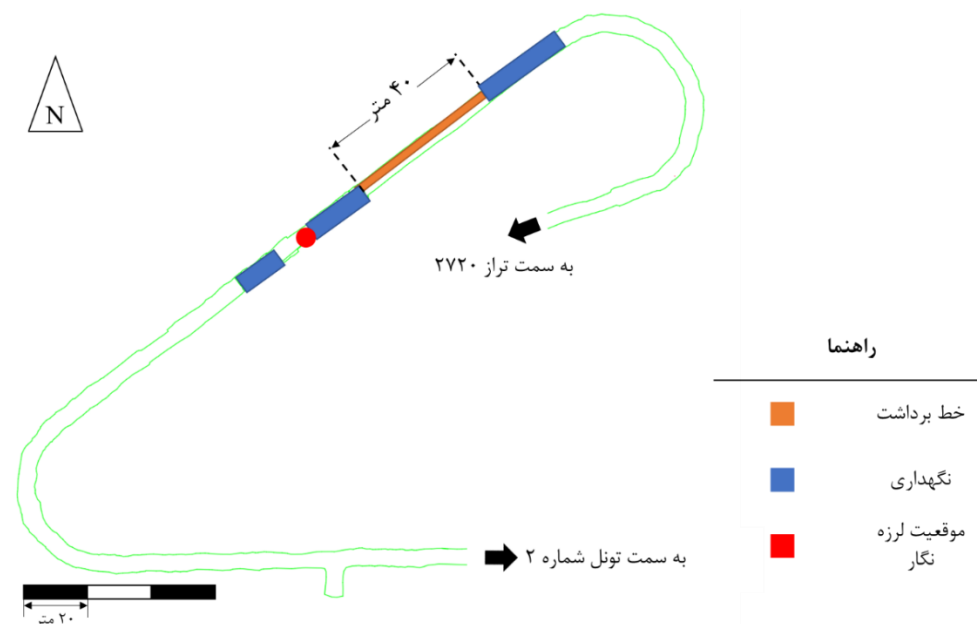
مطالعاتی

به منظور محاسبه حداکثر سرعت ذرات در معدن انگوران برداشت درزه برداری برای مشاهده وضعیت توده سنگ و برداشت‌هایی توسط لرزه‌نگار انجام شده است. در ادامه به شرح شیوه برداشت‌های انجام شده، پرداخته شده است.

۴-۴-۱- برداشت‌های درزه برداری برای مشخص کردن وضعیت توده سنگ

به منظور مشخص کردن وضعیت توده سنگ رمپ اصلی معدن، برداشتی به صورت خطی^۱ به طول ۴۰ متر در میان دو قاب فلزی، انجام شده است. در برداشت درزه‌ها قرائت شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، طول درزه‌ها، بازشدگی و دگرگونی سطح درزه‌ها انجام شده است. برای برداشت شیب و جهت شیب از نرم افزار Clino به جای کمپاس^۲ استفاده شده است. این نرم افزار از طریق ژیرسکوپ تلفن همراه کالیبراسیون شده است. شکل ۴-۸، موقعیت برداشت درزه‌ها را در رمپ اصلی نشان می‌دهد. شکل ۴-۹، خط برداشت درزه برداری در معدن انگوران را نشان می‌دهد.

1 Scanline
2 Compass



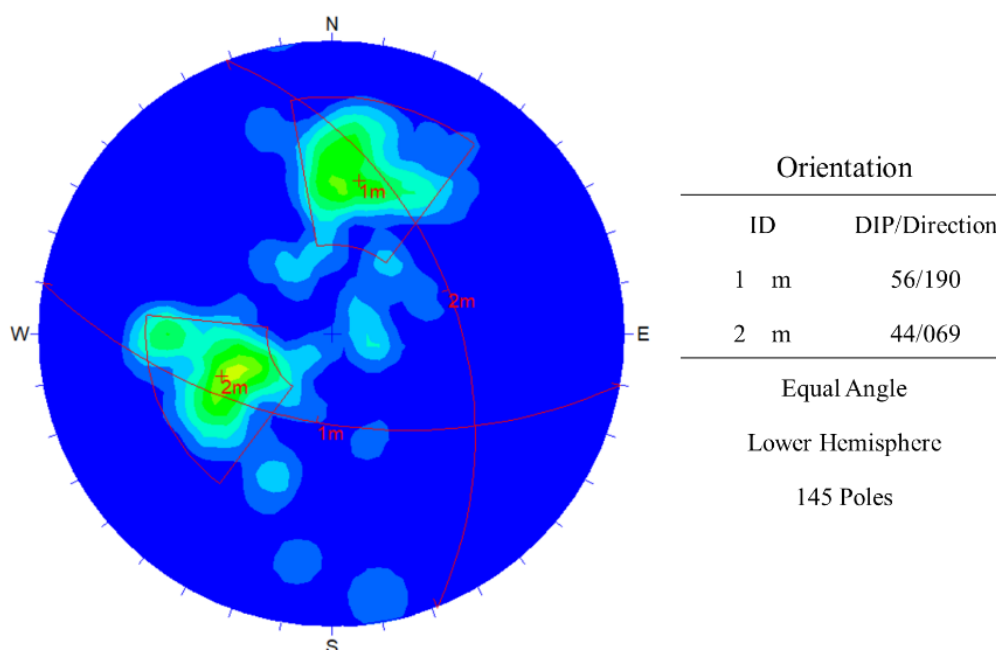
شکل ۴-۸: موقعیت برداشت درزه برداری



شکل ۴-۹: خط برداشت درزه برداری در معدن انگوران

داده‌های حاصل از خطوط برداشت با استفاده از نرم‌افزار DIPS مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در محدوده‌ای که برداشت‌های ناپیوستگی صورت گرفته، دو

دسته درزه وجود دارد. شکل ۴-۱۰، موقعیت دسته درزه‌ها در صفحه استرنیونت^۱ را نشان می‌دهد. در جدول ۴-۶، مشخصات هر یک از دسته درزه‌های حاصل شده ارائه شده است.



شکل ۴-۱۰: موقعیت دسته درزه‌ها در صفحه استرنیونت

جدول ۴-۶: مشخصات دسته درزه‌های حاصل شده

طول (متر)			فاصله‌داری (سانتی متر)			ثابت فیشر	جهت شیب	شیب	شماره دسته درزه
بیشینه	میانگین	کمینه	بیشینه	میانگین	کمینه				
۱۵	۲/۵	۰/۰۴	۴۴	۱۴/۰۵	۲	۳۰	۱۹۰	۵۶	۱
۱۵	۳	۰/۰۲	۶۰	۱۵/۷۹	۴	۲۶/۲۲	۶۹	۴۴	۲

با توجه به برداشت‌های میدانی، میزان شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) برای توده‌سنگ دربرگیرنده معدن انگوران، ۵۵ در نظر گرفته شده است. میزان شاخص کیفی سنگ نیز با استفاده از برداشت‌های انجام شده و رابطه بازبایی مغزه ۶۷ محاسبه شده است. با توجه به اطلاعات موجود در معدن، شاخص کیفیت توده‌سنگ ۴۱ محاسبه شده است. با توجه به داده‌های موجود این نتیجه حاصل می‌شود،

1 Stereonet

توده سنگ دربرگیرنده رمپ اصلی معدن نسبتاً پایدار و فقط نیازمند به نگهداری‌های موضعی همچون پیچ سنگ^۱، تورسیمی^۲ و شاتکریت است.

۴-۴-۲- برداشت‌های میدانی PPV با استفاده از دستگاه لرزه‌نگار

لرزه‌نگار^۳ وسیله‌ای است که امواج لرزه‌ای ناشی از زلزله، انفجار یا پدیده‌های دیگر لرزش زمین را ثبت می‌کند. دستگاه‌های لرزه‌نگار به حسگرهای الکترومغناطیسی مجهز هستند و حرکت مکانیکی زمین را به پالس^۴ الکتریکی تبدیل می‌کنند. این تغییرات الکتریکی توسط مدارهای دیجیتالی یا آنالوگ پردازش و ضبط می‌شوند. به منظور برداشت و ثبت اطلاعات لرزه‌نگاری در مورد مطالعاتی از دستگاه Minimate Plus شرکت Instantel استفاده شده است. این دستگاه قابلیت انجام برداشت در سه محور افقی، قائم و عرضی را دارد. دستگاه شامل یک دستگاه پردازش، ژئوفون برای برداشت لرزه و میکروفون است. با استفاده از میکروفون این دستگاه، می‌توان رویدادهایی همچون انفجار هوا را نیز ثبت کرد. همچنین با استفاده از دستگاه پردازش، می‌توان رویدادها را به‌صورت جداگانه با تاریخ و زمان دقیق آن رویداد ثبت و در صورت نیاز از دستگاه استخراج کرد. این دستگاه قابلیت ثبت رویدادها را به‌صورت تک رویداد و یا به‌صورت مستمر دارد. شکل ۴-۱۱، نمایی از دستگاه را نشان می‌دهد.

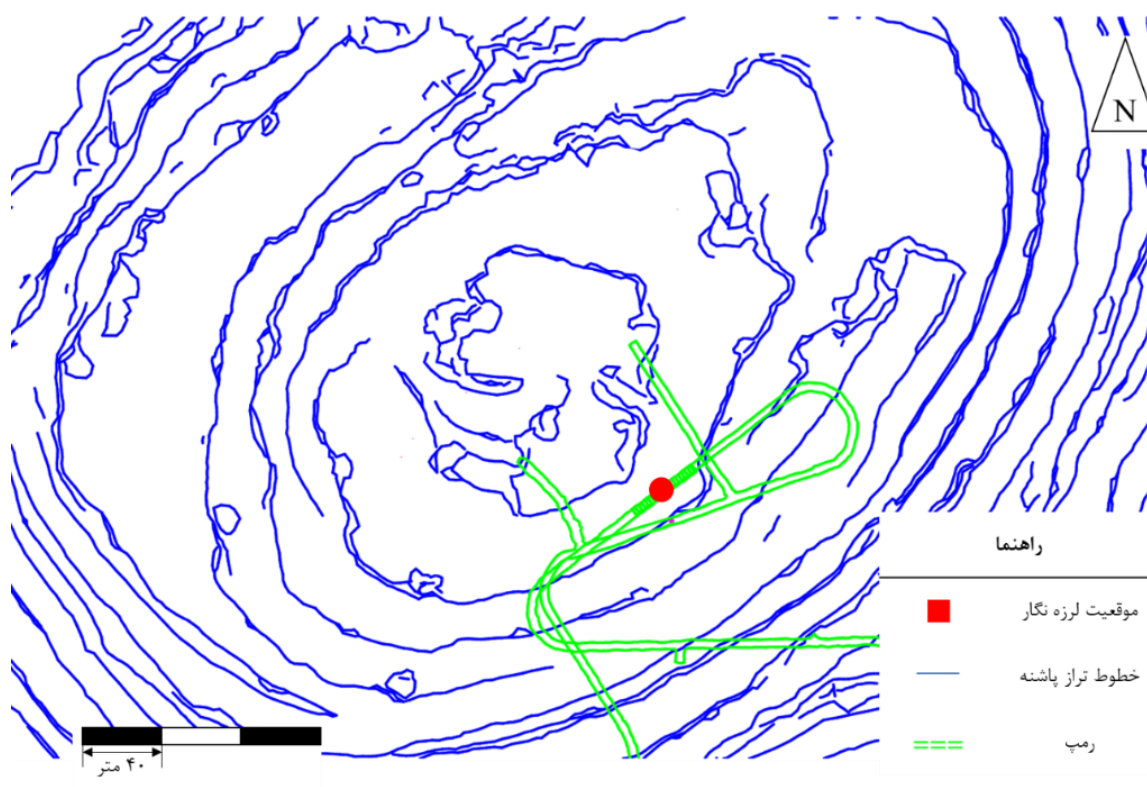


شکل ۴-۱۱: دستگاه ژئوفون مورد استفاده در برداشت‌ها

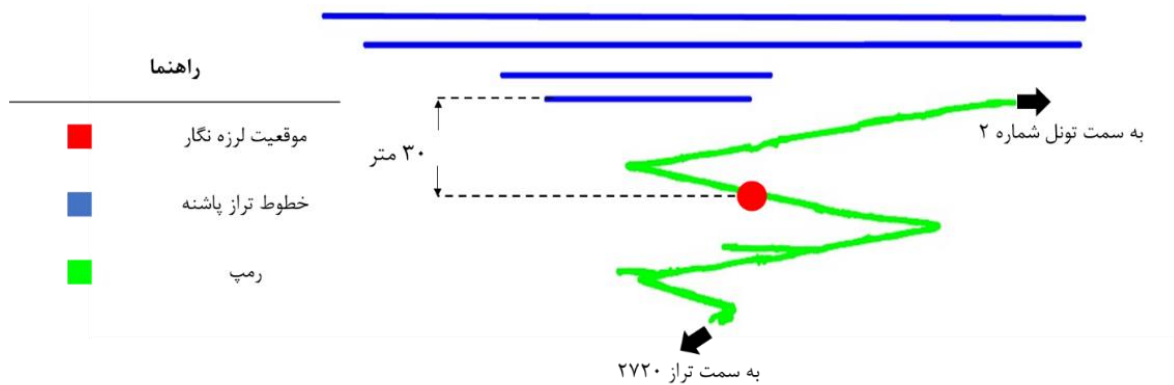
-
- 1 Rock bolt
 - 2 Wire mesh
 - 3 Seismograph
 - 4 Pulse

۴-۵- محل قرارگیری و آماده سازی برای قرائت دستگاه لرزه‌نگار

برای انجام برداشت‌ها (با هماهنگی دفتر فنی پیمان‌کار و کارفرما و بعد از بازدید از تونل‌های زیرزمینی و مشاهده محل ریزش در اثر انفجار بهمن ماه) دستگاه لرزه‌نگار در رمپ اصلی نصب شد تا با توجه به نزدیکی موقعیت رمپ به کف معدن روباز، تأثیرات لرزه‌های حاصل از انفجار روباز، در این محل مشاهده و ثبت شود. محل دقیق نصب دستگاه با توجه به تحقیقات انجام‌شده توسط محققین پیشین که نشان می‌دهد، لرزش در سقف ۲ برابر لرزش در کف و $1/5$ برابر لرزش در دیواره‌ها است (Sing et al., 2015؛ Jha and Deb, 2015)، در سقف رمپ اصلی و پایین‌تر از محل ریزش ذکر شده، نصب شده است. شکل ۴-۱۲، موقعیت لرزه‌نگار نسبت به توپوگرافی معدن را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۳، محل جانمایی و نصب دستگاه در سقف رمپ اصلی را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۴، محل نصب دستگاه ژئوفون نسبت در تونل نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۲: موقعیت لرزه‌نگار نسبت به توپوگرافی منطقه



شکل ۴-۱۳: موقعیت لرزه نگار نسبت به رمپ و خطوط تراز پاشنه



شکل ۴-۱۴: محل نصب دستگاه ژئوفون نسبت در تونل

به دلیل ارتفاع زیاد رمپ، از یک دستگاه LHD برای دسترسی به سقف استفاده شده است. بوسیله دستگاه دریل در سقف حفره‌ای برای قرارگیری قسمت ژئوفون دستگاه ایجاد شده است. میل پیچ ۱۰ میلی‌متری با استفاده از مخلوط گچ و سیمان و آب برای مستحکم سازی و ثابت نگه داشتن دستگاه ژئوفون در حفره‌ی مذکور قرار داده شده است. سپس دستگاه بر میل پیچ سوار و از تماس کامل آن با سطح سقف اطمینان حاصل شده است و با مهره‌ای دستگاه در جای خود ثابت نگه داشته شده است. بر اساس موقعیت

جغرافیایی آتشفباری معدن روباز، جهت دستگاه در هر آتشفباری نیازمند تنظیم بوده و فلش جهت نما دستگاه باید به سمت محل آتشفباری باشد.

به منظور ثبت آتشفبارهایی که در دو مرحله انجام گرفته یا به دلیل قطعی مدار، آتشفباری با تأخیر صورت گرفته از حالت برداشت مستمر دستگاه استفاده شده است. به منظور حذف ارتعاشات ناشی از کارهای معدنی و لرزه‌های ایجاد شده توسط رفت‌وآمد ماشین‌آلات سنگین باید دستگاه به گونه‌ای تنظیم شود تا این اختلالات تأثیری بر خروجی دستگاه نداشته باشد. با توجه به محل قرارگیری دستگاه در سقف و دور بودن محل دستگاه از جبهه کارهای فعال معدن، تنظیمات آستانه دستگاه ۰/۵۱ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شده است. همچنین برای آنکه بتوان نتایج خروجی دستگاه را پس از انفجار قرائت کرد، پیش از انفجار باید فاصله و میزان خرج بر تأخیر آتشفباری برای دستگاه مشخص شود. با دانستن موقعیت پله معدن روباز که در آن آتشفباری انجام شده، فاصله پله از موقعیت لرزه‌نگار مشخص می‌شود. با وارد کردن میزان خرج بر تأخیر، میزان فاصله مقیاس شده توسط دستگاه پردازش محاسبه شده و دستگاه آماده برای ثبت رویدادها است. بعد از تنظیم دستگاه باید محل را به دلیل ملاحظات ایمنی ترک کرد. در مجموع ۱۹ برداشت صورت گرفته که از این تعداد، ۲ برداشت به دلیل عدم اطمینان در درستی میزان فاصله مقیاس شده، نتایج حاصل قابل استناد نیست. شایان ذکر است که ۵ بار برای قرائت آتشفباری در زون توسعه شمالی معدن انگوران اقدام شده است، اما به دلیل فاصله بالای ۶۰۰ متر از محل انفجار، نتیجه از دستگاه حاصل نشده است. به منظور شناسایی ریزش‌های احتمالی در اثر لرزش‌های انفجار روباز در اطراف محل دستگاه با استفاده از اسپری رنگ شبکه‌هایی بر روی سقف رمپ ترسیم شده است. این شبکه‌ها با سه رنگ مختلف بر اساس نزدیکی به دستگاه رسم شده است. رنگ زرد برای موقعیت در مجاورت پشت دستگاه، در فاصله متوسط رنگ آبی و در فاصله زیاد با رنگ قرمز ترسیم شده است. بر اساس مشاهدات و پیمایش‌های انجام شده بعد از هر آتشفباری ریزشی صورت نگرفته است. این امر نشان دهنده این است که الگوی انفجار تصحیح شده، یک الگوی ایمن برای فضاهای زیرزمینی معدن است. شکل ۴-۱۵، نمایی از شبکه ترسیم شده برای مشاهده ریزش‌های احتمالی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: نمایی از شبکه ترسیم شده برای مشاهده ریزش‌های احتمالی

شکل ۴-۱۶، نتایج خروجی و نمودار سرعت-زمان حاصل از دستگاه برای رویداد چهار را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر سرعت ذرات و فرکانس رویداد چهار به صورت جدول و نمودار ارائه شده است. از نمودار فرکانس-سرعت در این شکل می‌توان نتیجه گرفت، که فرکانس موج غالب در این رویداد از جنس طولی است و بازه آن میان ۵ تا ۱۰۰ هرتز است. مقدار حداکثر سرعت ذرات از نمودارهای سرعت-زمان $9/4$ میلیمتر بر ثانیه است. زمان رویداد با توجه به این نمودار تقریباً سه ثانیه است. از دیگر نتایج حاصل از این نمودار می‌توان به میرایی شدید سرعت موج در راستای قائم اشاره کرد. شکل ۴-۱۷، نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه را برای رویداد چهار نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌شود، میزان بیشینه فرکانس $14/1$ هرتز در راستای عرضی است. همچنین میرایی فرکانس در دو راستا عرضی و طولی که دارای دامنه موج بیشتری هستند، بیشتر از راستای قائم است. سایر نتایج خروجی به‌دست آمده، در پیوست ۱ قابل مشاهده است.

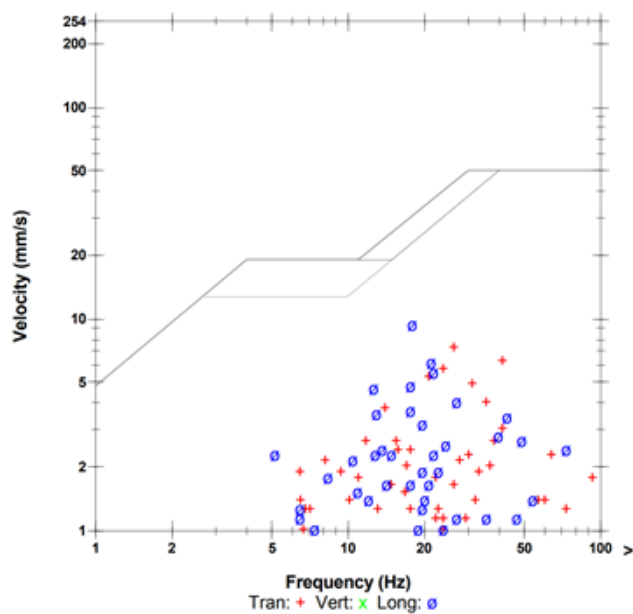
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

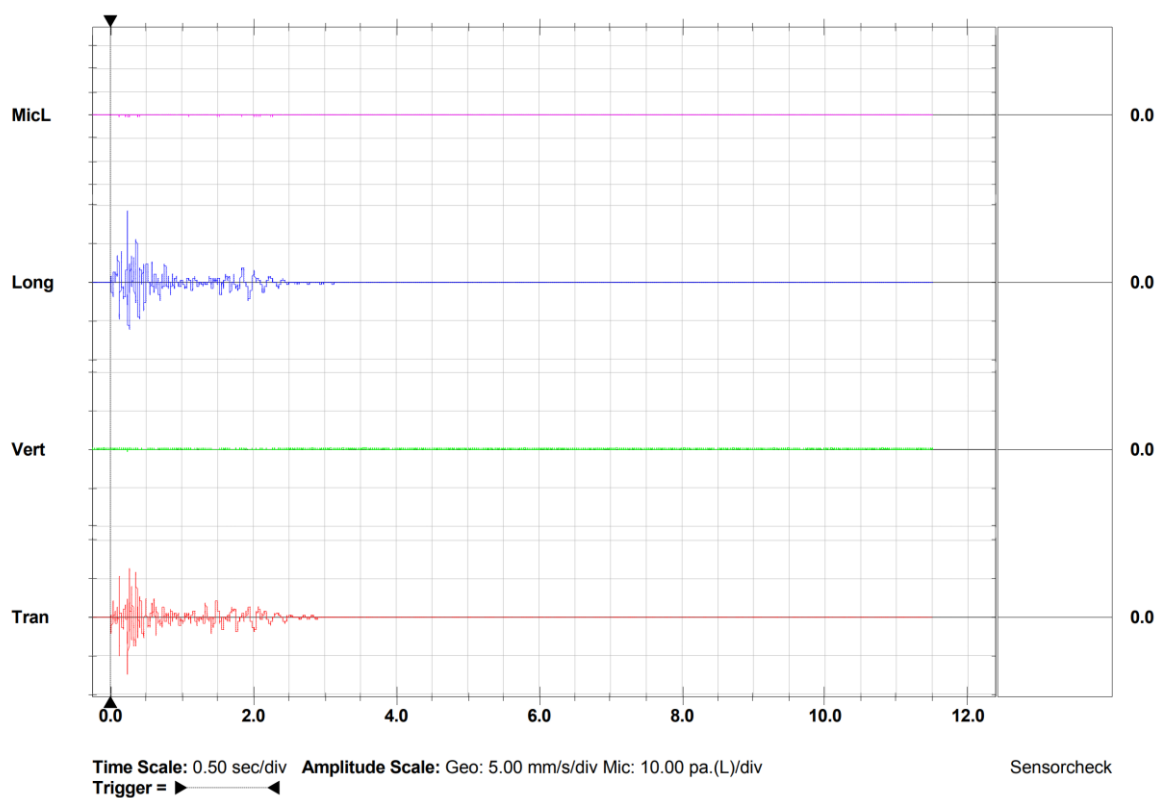
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.112 sec
 ZC Freq >200 Hz
 Channel Test Disabled

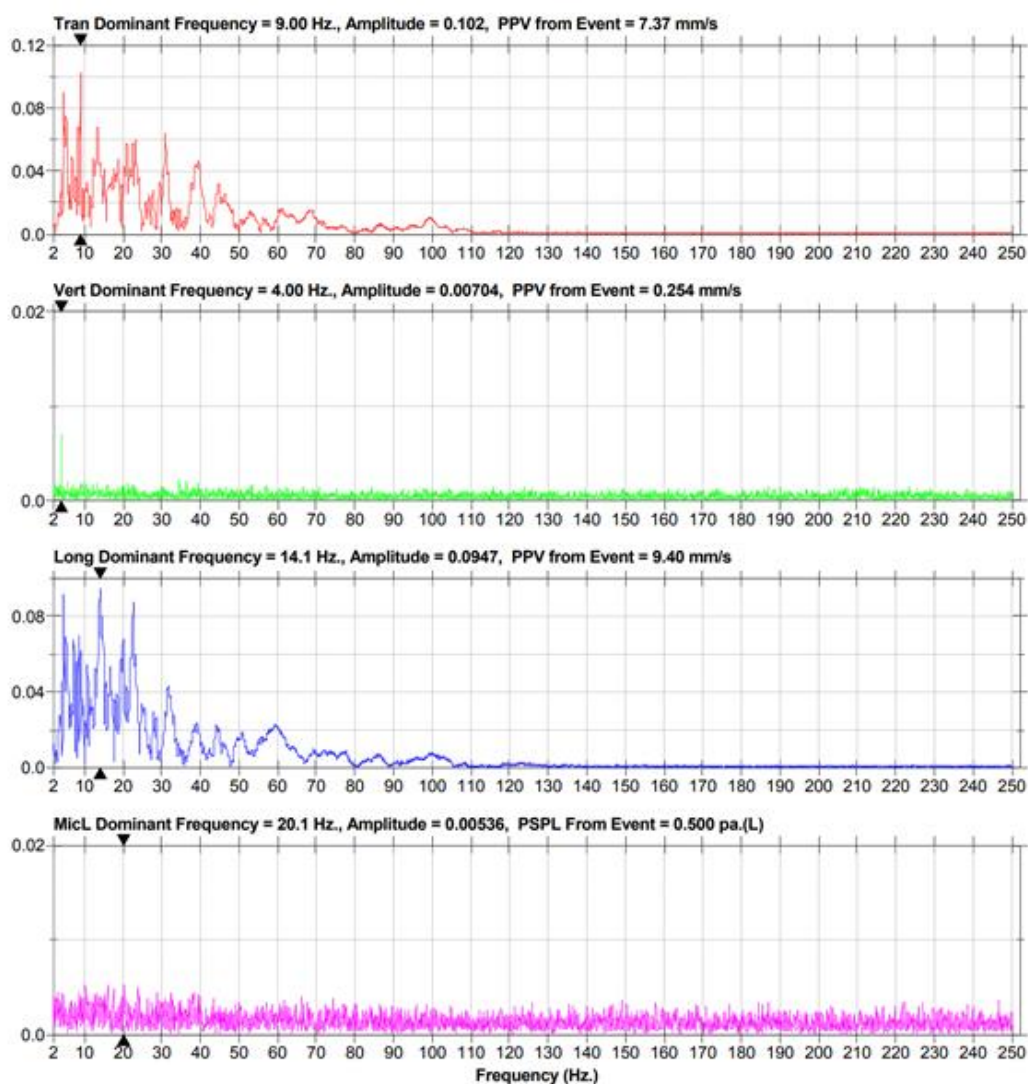
	Tran	Vert	Long	
PPV	7.37	0.254	9.40	mm/s
PPV (Ponderated)	5.93	0.115	6.97	mm/s
ZC Freq	26	>200	18.0	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.250	0.130	0.232	sec
Peak Acceleration	0.186	0.0530	0.239	g
Peak Displacement	0.0441	0.00025	0.0611	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 9.67 mm/s at 0.232 sec



شکل ۴-۱۶: نتایج خروجی و نمودار سرعت-زمان حاصل از دستگاه برای رویداد چهار



شکل ۴-۱۷: نمودار فرکانس-زمان حاصل از دستگاه برای رویداد چهار

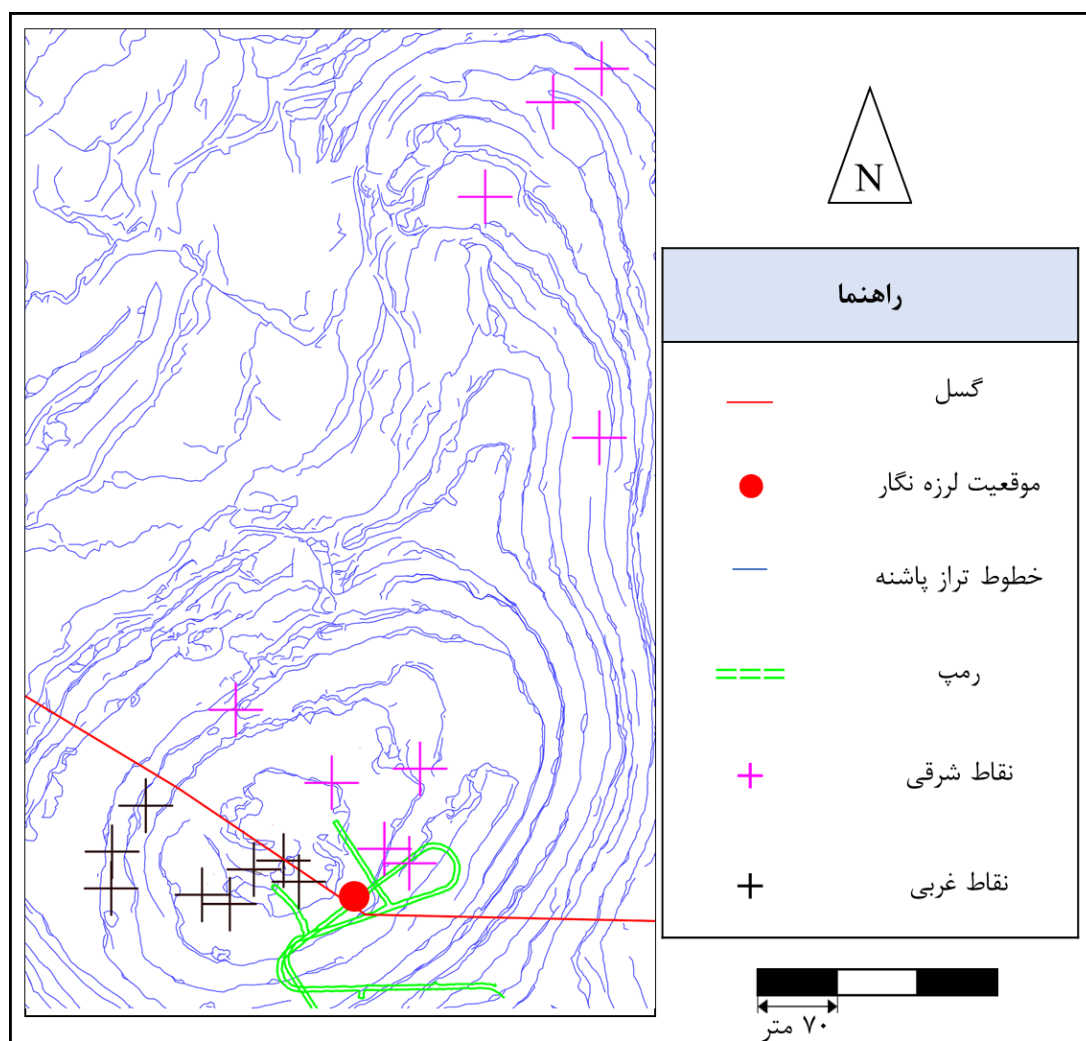
۴-۶- ایجاد پایگاه داده‌ها

با بررسی داده‌های حاصل شده از برداشت‌های لرزه نگاری این نکته حاصل شد که داده‌ها را باید بر اساس موقعیت انفجار به دو دسته داده‌های قسمت شرقی و قسمت غربی تقسیم کرد. دلیل این دسته‌بندی، وجود گسلی در نزدیکی محل برداشت که تاثیر به سزایی بر دامنه سرعت امواج لرزه‌ای منتشر شده در محیط در قسمت غربی این گسل، را دارد. محققین پیشین به اثر گذاری شیب گسل‌ها و خاصیت‌های فیزیکی و مکانیکی مواد پرکننده درون آن، بر کاهش دامنه و انرژی موج اشاره کرده‌اند (Mingyang et al., 2005; Feng et al., 2019). در جدول ۴-۷، داده‌های حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگار ارائه شده است.

جدول ۴-۷: داده‌های حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری

ردیف	فاصله از محل انفجار (m)	مقدار خرج کل (ton)	مقدار خرج بر تاخیر (ton)	فاصله مقیاس شده (m/kg^0.5)	حاکثر سرعت ذرات (mm/s)			فرکانس (Hz)			ناحیه	
					قطری	قائم	عرضی	مجموع برداری	قطری	قائم		عرضی
۱	-	-	-	-	۲/۳	-	۴/۳۲	-	۲۴۵	۲/۳۱	۲/۹۴	ش
۲	۱۴۲	۳۳۷۵	۴۵	۲۸/۶	۱/۹	۰/۲۵۴	۲/۱۶	۲/۷	۵/۱۳	۸	۶/۵۶	غ
۳	۱۹۲/۵	-	۴۵	-	۲/۴۱	-	-	-	۲۷/۸	۲	۱۰/۴	ش
۴	۷۷/۴۵	۲۸۵۰	۷۵	۲	۷/۳۷	۰/۲۵۴	۹/۴	۹/۶۷	۹	۴	۱۴/۱	ش
۵	۱۱۷/۶	۴۴۲۵	۶۰	۱۵/۱۸	۱/۹	۰/۱۲۷	۱/۶۵۱	۲/۰۱	۴/۴۴	۱۰/۶	۶/۴۴	غ
۶	۵۲/۲	۱۰۳۲۵	۲۰	۱۱/۷	۹/۲	۰/۲۵۴	۰/۱۲۷	۹/۰۲	۴۶/۸	۴/۶	۴	ش
۷	۱۲۴/۸	۴۴۲۵	۷۵	۱۴/۴	۱/۴	۰/۱۲۷	۲/۲۹	۲/۳۲	۶/۱۳	۶/۲۵	۳/۸۸	غ
۸	۶۷۶	۱۲۱۵۰	۷۵	۷۸/۰۵	۰/۸۸۹	۰/۱۲۷	۰/۷۶۲	۱/۰۹	۷/۱۹	۲	۶/۸۱	ش
۹	۷۳۲	۹۷۵۰	۹۰	۷۷/۱۵	۱/۵۲	۰/۱۲۷	۱/۰۲	۱/۷۶	۷	۲	۶/۲۵	ش
۱۰	۱۷۱	۴۰۰۰	۴۵	۲۵	۶/۲۲	۰/۱۲۷	۴/۴۴	۷/۱۲	۶/۸۱	۲	۹/۹۴	ش
۱۱	۱۵۸	۴۰۰۰	۴۵	۲۸/۴	۷/۳۷	۰/۱۲۷	۴/۷	۷/۵۲	۶/۸۸	۲/۶	۶/۳۸	ش
۱۲	۲۱۵	۲۷۹۰	۹۰	۲۲/۷	۵/۹۷	۰/۱۲۷	۴/۱۹	۵/۹۸	۴/۳۸	۲	۴/۱۹	ش
۱۳	۷۵	۵۷۱۵	۷۵	۸/۷	۵/۸	۰/۳۸۱	۴/۳۲	۵/۰۸	۷/۵۶	۲/۵	۱۹/۱	غ
۱۴	۲۲۴	۷۶۳۵	۷۵	۹/۸۱	۳/۶۸	۰/۲۵۴	۴/۰۶	۴/۶۶	۶/۷۵	۶/۷۵	۲/۱۹	ش
۱۵	۴۴۷	۱۲۸۲۵	۹۰	۴۷/۱۸	۰/۱۲۷	۱/۵۲	۲/۷۷	۲/۷۷	۶/۲۵	۲	۴/۵۶	ش
۱۶	۶۴	۶۷۹۵	۴۵	۹/۵	۲/۵۴	۰/۲۵۴	۲/۵۴	۳/۱	۷/۱۹	۲/۲۵	۶/۸۸	غ
۱۷	۲۴۴	۴۳۲۰	۱۰۰	۲۲/۴	۱/۵۲	۰/۱۲۷	۱/۴	۱/۷	۶/۶۳	۲	۴/۳۸	غ
۱۸	۲۴۰	۴۰۹۵	۹۰	۲۵/۳	۰/۸۸۹	۰/۱۲۷	۰/۷۶۲	۰/۹۲۵	۸/۵۶	۴	۴/۸۸	غ
۱۹	۲۱۴	۷۵۰۰	۷۵	۲۴/۷	۱/۴	۰/۱۲۷	۱/۰۲	۱/۵۳	۱۰	۲	۶/۹۴	غ
ش: ناحیه شرقی												
غ: ناحیه غربی												

در جدول ۴-۷، داده‌های ردیف یک و سه به دلیل عدم محاسبه دقیق فاصله مقیاس شده و نتایج ناقص حاصل شده از دستگاه لرزه‌نگار قابل استفاده برای ارائه یک رابطه تجربی نیستند. این داده‌ها در برازش‌های قسمت‌های بعدی حذف شده‌اند. همچنین مقدار میانگین فرکانس در رویدادها ۱۱ هرتز بوده است که نشان دهنده فرکانس پایین امواج منتشر شده از انفجارها است. شکل ۴-۱۸، موقعیت گسل به رمپ اصلی معدن را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸: موقعیت گسل به تقسیم محدوده به دو قسمت شرقی و غربی

۴-۷- جمع بندی

در این فصل، معدن انگوران از نظر زمین‌شناسی و نحوه استخراج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. سپس الگوهای آشکاری به کار رفته در معدن، قبل و بعد از تصحیح الگو بررسی شده و این نتیجه

حاصل شد که معدن انگوران در حال حاضر دارای الگوهای ایمن انفجار است. روش برداشت درزه‌برداری و لرزه‌نگاری صورت گرفته، به تفصیل شرح داده شده است. در انتها فصل، داده‌های به دست آمده از لرزه نگاری به صورت یک پایگاه داده ارائه شده است. از این پایگاه داده برای تحلیل‌های آماری در فصل پنجم این پایان نامه استفاده شده است.

فصل پنجم

ارائه رابطه تجربی برای معدن انگوران

۵-۱- مقدمه

در این فصل با استفاده از پایگاه داده‌های ارائه شده در فصل پیشین و روش‌های آماری، رابطه‌ای تجربی برای محاسبه مقدار حداکثر سرعت ذرات در معدن انگوران ارائه شده است. رابطه مذکور به منظور صحت سنجی با رابطه‌ها پیشین مقایسه شده است. با استفاده از این رابطه تجربی ارائه شده، مقدار حداکثر سرعت مجاز ذرات بر اساس یک ریزش در معدن انگوران محاسبه شده است. در پایان، به منظور کنترل لرزش حاصل از انفجار، یک نسبت مجاز فاصله به مقدار مجذور خرج بر تاخیر در این معدن ارائه شده است.

۵-۲- انتخاب پارامترهای موثر بر محاسبه PPV

پس از ایجاد پایگاه داده‌های حاصل از لرزه‌نگاری، آزمون همبستگی میان پارامترهای مهم فاصله از محل انفجار، مقدار خرج در هر تاخیر و فاصله مقیاس شده بر حداکثر سرعت ذرات انجام شده است. دلیل انتخاب پارامتر فاصله مقیاس شده، بر اساس استفاده بسیار محققین پیشین از این پارامتر است. فاصله مقیاس شده توسط پردازشگر اصلی دستگاه لرزه‌نگار از رابطه (۵-۱) محاسبه می‌شود (Instantel, 2013).

$$SD = \frac{R}{\sqrt{Q_d}} \quad (5-1)$$

در این رابطه SD فاصله مقیاس شده $(m/Kg^{0.5})$ ، R فاصله از انفجار (m) و Q_d مقدار خرج بر تاخیر (Kg) است.

پارامترهای دیگر که مربوط به هندسه آتشکاری است، تقریباً در هر انفجار ثابت بوده و در آزمون همبستگی استفاده نشده است. در جدول ۵-۱ ضرایب همبستگی میان پارامترها و حداکثر سرعت ذرات حاصل ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۵-۱ مشاهده می‌شود، فاصله مقیاس شده را به عنوان یک پارامتر با ضریب همبستگی بالا معرفی کرد. همان‌طور گفته شد، این پارامتر از تلفیق شدن دو پارامتر دیگر حاصل می‌شود که این نشانگر کاربردی بودن این پارامتر است و می‌توان از آن برای ارائه یک رابطه تجربی استفاده کرد.

جدول ۵-۱: ضرایب همبستگی میان پارامترها و حداکثر سرعت ذرات حاصل

ضریب همبستگی		پارامتر
غربی	شرقی	
۰/۶۹۹	۰/۹۳۷	فاصله از محل انفجار (m)
۰/۱۷۹	۰/۶۲۴	مقدار خرج برتاخیر (Kg)
۰/۷۶۵	۰/۹۳۱	فاصله مقیاس شده ($m/Kg^{0.5}$)

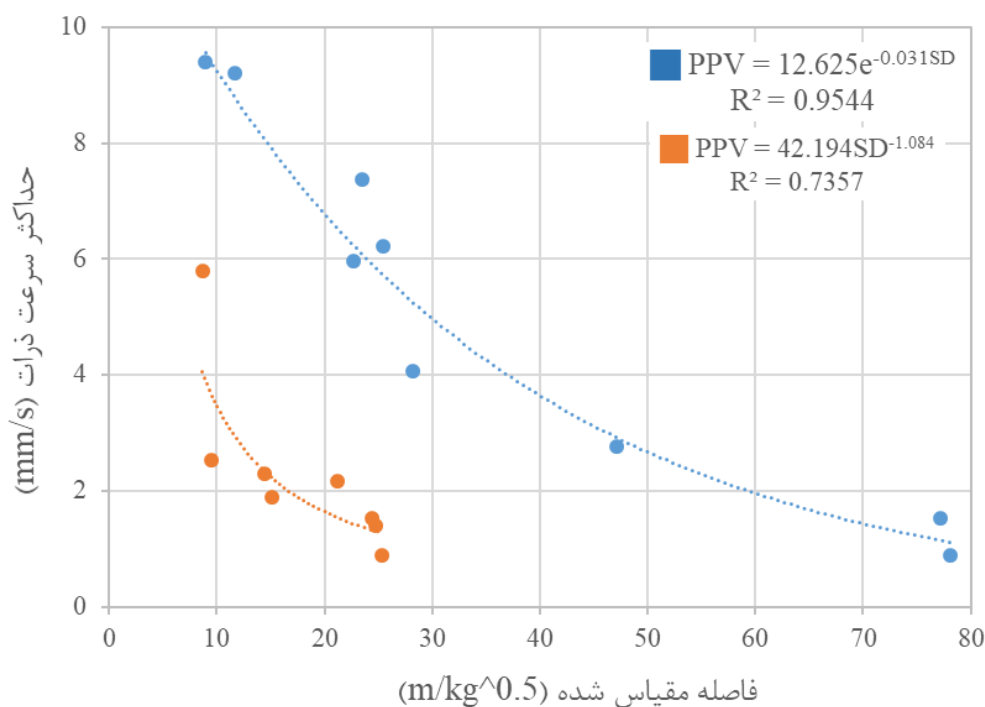
۵-۳- ارائه رابطه تجربی برای محاسبه PPV در معدن انگوران

با استفاده از برازش‌های تک متغیره مختلف، رابطه‌های میان پارامتر فاصله مقیاس شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات برداشت شده ارائه شده است. در جدول ۵-۲، برازش‌های تک متغیره میان حداکثر سرعت ذرات و فاصله مقیاس شده ارائه شده است.

جدول ۵-۲: نتیجه برازش‌های متفاوت بر داده‌ها PPV نسبت به فاصله مقیاس شده در دو قسمت شرقی و غربی

ناحیه انفجار	روش برازش	فرمول	ضریب همبستگی
قسمت شرقی	خطی	$PPV = -0.1126 \times SD + 9.3058$	۰/۸۶۶۱
	لگاریتمی	$PPV = -4.078 \times \ln(SD) + 18.8$	۰/۹۴۴۲
	نمایی با پایه ثابت	$PPV = 130.84 \times SD^{-1.034}$	۰/۸۷۸۳
	نمایی	$PPV = 12.625 \times e^{-0.031 \times SD}$	۰/۹۵۴۴
قسمت غربی	خطی	$PPV = -0.1682 \times SD + 5.3271$	۰/۵۸۵۵
	لگاریتمی	$PPV = -2.813 \times \ln(SD) + 10.219$	۰/۶۴۷۷
	نمایی با پایه ثابت	$PPV = 42.194 \times SD^{-1.084}$	۰/۷۳۵۷
	نمایی	$PPV = 6.6989 \times e^{-0.067 \times SD}$	۰/۷۱۶۸
PPV: حداکثر سرعت ذرات (mm/s) و SD: فاصله مقیاس شده ($m/(kg^{0.5})$)			

همان‌طور که در جدول ۵-۲ مشاهده می‌شود، بهترین برازش برای ناحیه شرقی، تابع نمایی است که دارای ضریب همبستگی ۰/۹۵۴۴ است. همچنین برای ناحیه غربی بهترین برازش، تابع نمایی با پایه ثابت انتخاب شده که دارای ضریب همبستگی ۰/۷۳۵۷ است. در شکل ۵-۱، نمودارهای برازش شده بر هر دسته داده نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، نسبت حداکثر سرعت ذرات در دو ناحیه، رابطه معکوس با فاصله مقیاس شده دارد.

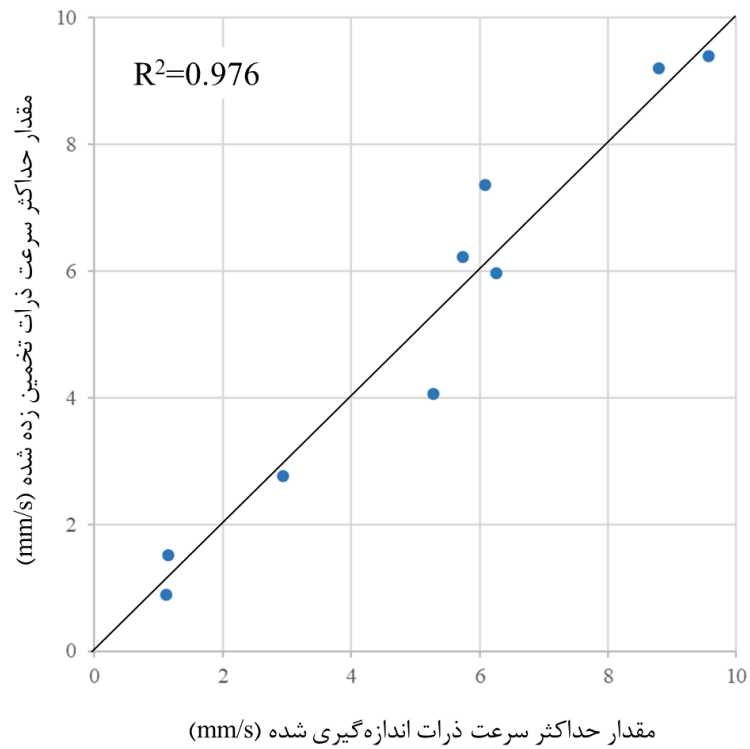


■ قسمت شرقی معدن

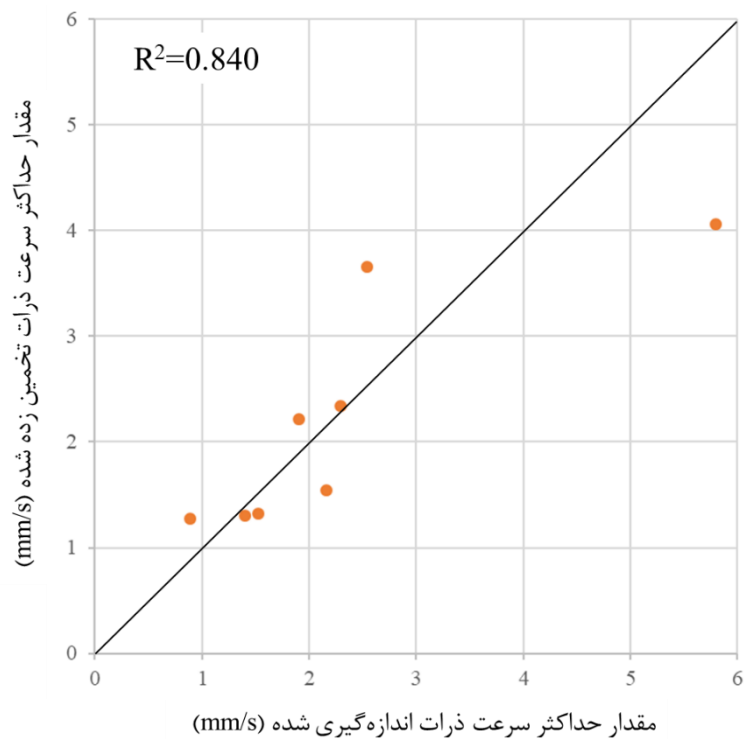
■ قسمت غربی معدن

شکل ۵-۱: نتیجه برازش داده‌های PPV نسبت به فاصله مقیاس شده برای دو قسمت شرقی و غربی

برای ارزیابی رابطه‌ها ارائه شده، مقایسه‌ای میان حداکثر سرعت ذرات تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده به صورت جداگانه برای هر دو ناحیه شرقی و غربی انجام شده است. ضرایب همبستگی بدست آمده از این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که رابطه‌ها ارائه شده، برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات دو بخش شرقی و غربی گسل دارای ضریب اطمینان خوبی هستند. شکل ۵-۲ و ۵-۳ به ترتیب مقایسه میان حداکثر سرعت ذرات تخمین زده شده توسط رابطه تجربی و مقدار اندازه‌گیری شده آن در بخش شرقی و غربی را نشان می‌دهند.



شکل ۵-۲: مقایسه میان حداکثر سرعت ذرات تخمین زده شده توسط رابطه تجربی و مقدار اندازه‌گیری شده آن در بخش شرقی



شکل ۵-۳: مقایسه میان حداکثر سرعت ذرات تخمین زده شده توسط رابطه تجربی و مقدار اندازه‌گیری شده آن در بخش غربی

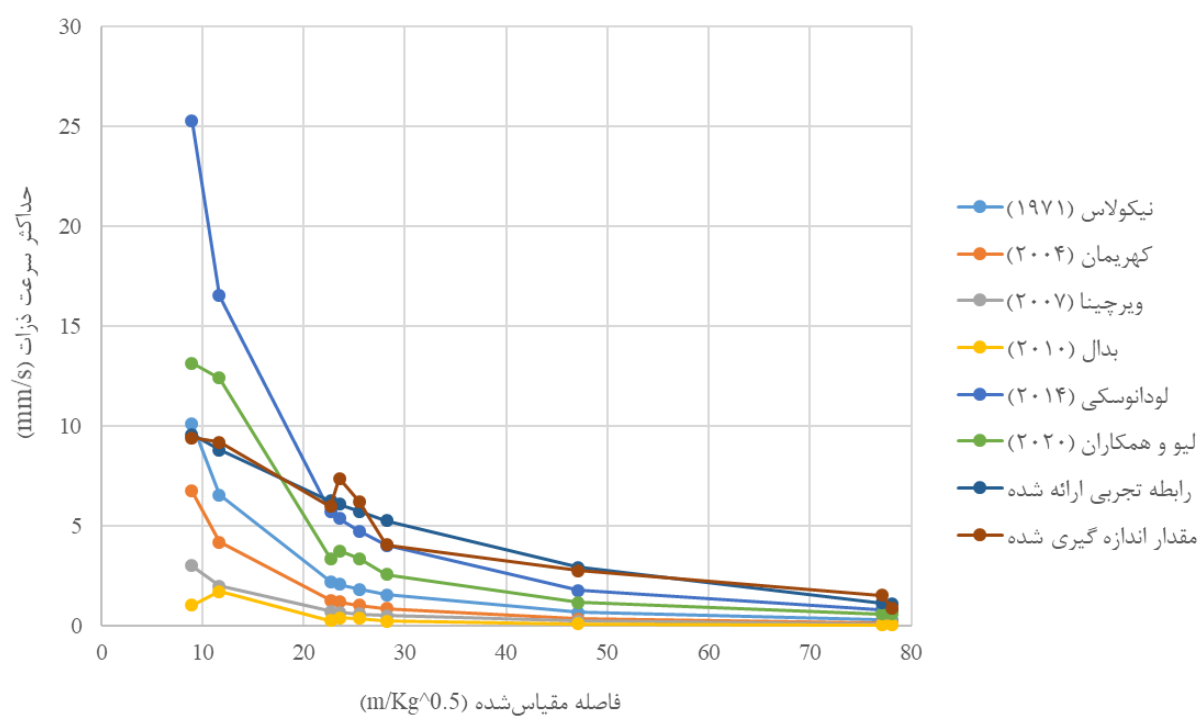
۵-۳-۱- مقایسه رابطه حاصل شده با رابطه‌ها پیشین

به منظور بالا بردن اطمینان از رابطه‌های تجربی حاصل شده، این رابطه‌ها با برخی از رابطه‌های تجربی ارائه شده توسط محققین پیشین مقایسه شده است. در این مقایسه مقدار حداکثر سرعت ذرات با استفاده از پایگاه داده‌های این پژوهش و رابطه‌های پیشین، محاسبه شده است، سپس آزمون همبستگی پیرسون^۱ بین مقادیر محاسبه شده از رابطه‌های پیشین و ارائه شده در این پژوهش و مقادیر اندازه‌گیری شده، گرفته شده است. در جدول ۵-۳، رابطه‌های پیشین و ضرایب همبستگی آن‌ها را با رابطه‌های ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در دو ناحیه شرقی و غربی معدن ارائه شده است. شکل ۵-۴، نمودار مقایسه میان رابطه‌های پیشین، رابطه ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در ناحیه شرقی معدن انگوران را نشان می‌دهد. شکل ۵-۵، نمودار مقایسه میان رابطه‌های پیشین، رابطه ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در ناحیه غربی معدن انگوران را نشان می‌دهد.

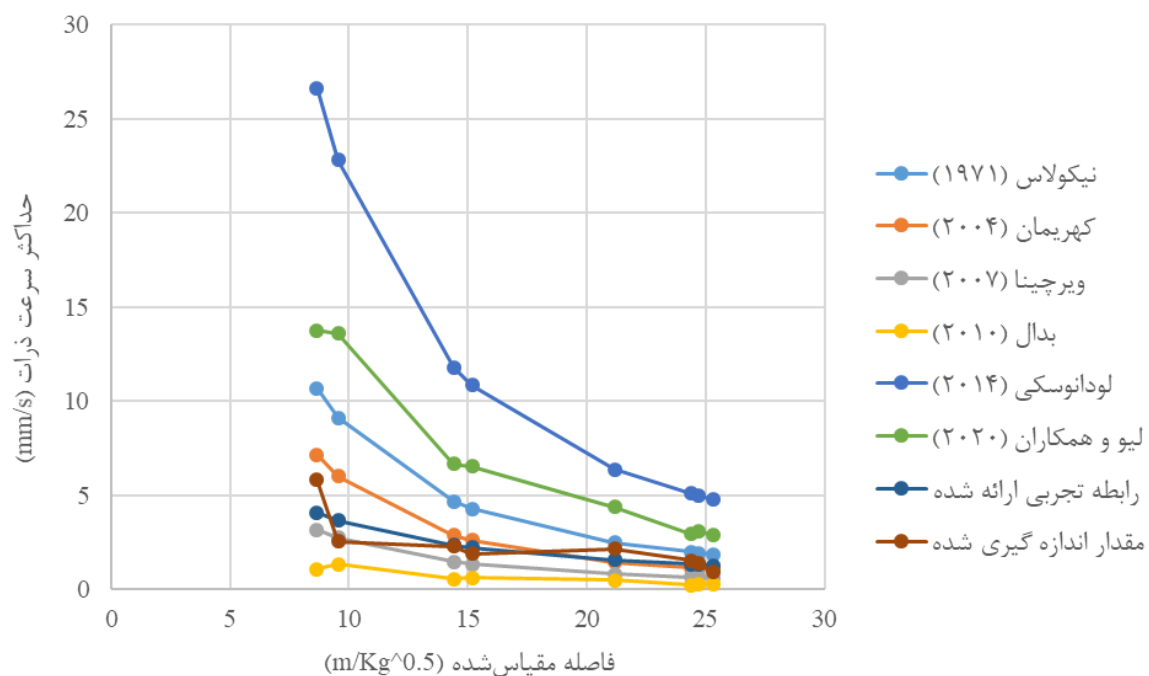
جدول ۵-۳: مقایسه رابطه‌ها پیشین با رابطه‌های ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده

ضریب همبستگی				رابطه تجربی	محققین
ناحیه غربی		ناحیه شرقی			
P	M	P	M		
۰/۹۹۸	۰/۸۵۴	۰/۸۶۲	۰/۸۳۰	$PPV = 0.36SD^{-1.63}$	نیکولاس (۱۹۷۱)
۰/۹۹۶	۰/۸۵۷	۰/۸۴۶	۰/۸۱۳	$PPV = 0.34SD^{-1.79}$	کهریمان (۲۰۰۴)
۰/۹۹۸	۰/۸۵۱	۰/۸۷۳	۰/۸۴۱	$PPV = 86(R/Q^{1/2})^{-1.53}$	ویرجینا (۲۰۰۷)
۰/۹۵۶	۰/۶۹۳	۰/۸۰۹	۰/۸۱۸	$PPV = 0.29R^{-1.296}$	بدال (۲۰۱۰)
۰/۹۹۸	۰/۸۵۳	۰/۸۶۵	۰/۸۳۳	$PPV = 842(R/Q^{1/2})^{-1.6}$	لودانوسکی (۲۰۱۴)
۰/۹۹۴	۰/۸	۰/۸۸۷	۰/۸۷۱	$PPV = 842(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.422}$	لیو و همکاران (۲۰۲۰)
V: حداکثر دامنه ارتعاش ذرات (mm/s)، Q: وزن ماده منفجره در هر تاخیر (Kg)، R: فاصله از محل انفجار تا محل اندازه‌گیری (m)، SD: فاصله مقیاس شده ((m/(kg^0.5))، M: مقادیر اندازه‌گیری شده توسط ژئوفون و P: مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ها ارائه شده در این پژوهش					

1 Pearson



شکل ۴-۵: نمودار مقایسه میان رابطه‌های پیشین، رابطه ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در ناحیه شرقی معدن انگوران



شکل ۵-۵: نمودار مقایسه میان رابطه‌های پیشین، رابطه ارائه شده و مقدار حداکثر سرعت ذرات اندازه‌گیری شده در ناحیه غربی معدن انگوران

با بررسی جدول ۵-۳، می‌توان گفت که نزدیک‌ترین رابطه برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات در ناحیه شرقی معدن انگوران، رابطه ارائه شده توسط لیو و همکاران (۲۰۲۰) و رابطه ارائه شده توسط کهریمان (۲۰۰۴) برای ناحیه غربی است. همچنین با مشاهده و تحلیل جدول ۵-۳، شکل ۵-۴ و شکل ۵-۵، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌های ارائه شده همخوانی خوبی با رابطه‌های پیشین خود دارد. اما با توجه به اختلافات موجود در این رابطه‌ها می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که برای هر معدن باید برداشت‌های لرزه‌نگاری جهت محاسبه حداکثر سرعت ذرات انجام شود تا یک رابطه قابل اطمینان و کارآمد حاصل شود.

۵-۴-ارائه الگو انفجار با توجه به حداکثر سرعت ذرات در معدن انگوران

یکی از روش‌هایی که بتوان الگوی آتشفباری را اصلاح کرد، استفاده از مقدار حداکثر سرعت ذرات مجاز است. در این روش ابتدا با استفاده از رابطه‌ها تجربی به‌دست آمده از مطالعات میدانی و ریزش‌های حاصل از انفجار، حداکثر سرعت ذرات مجاز تعیین می‌شود. سپس پارامترهای انفجار هم‌چون فاصله مقیاس شده حاصل می‌شود که با دانش این پارامتر می‌توان پارامترهای موثر بر لرزش زمین هم‌چون میزان خرج بر تاخیر مجاز و فاصله از محل انفجار مجاز را برای هر انفجار در یک معدن محاسبه کرد.

همان‌طور که گفته شد در معدن انگوران در ناحیه شرقی گسل، انفجاری با مشخصات فاصله تا محدوده ریزش ۳۴ متر و میزان خرج بر تاخیر ۷۵ کیلوگرم صورت گرفت. حال با استفاده از رابطه ارائه شده برای ناحیه شرقی، به‌منظور محاسبه حداکثر سرعت ذرات و اطلاعات این ریزش، مقدار مجاز سرعت ذرات در رمپ اصلی ۱۱/۱۷ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شده است. از این مقدار می‌توان فاصله مقیاس شده مجاز ۳/۹ را برای این معدن توصیه کرد. این مقدار نشان می‌دهد که ترکیب دو پارامتر فاصله از محل انفجار و مقدار خرج بر تاخیر اگر از این حد مجاز عبور کند، خطر ریزش در رمپ اصلی وجود دارد.

با توجه به تصحیح‌های الگوهای انفجار بعد از ریزش مذکور، میزان لرزش‌های زمین در قسمت زیرزمینی کاهش یافته و دامنه لرزش‌ها در بازه ۰/۹۲۵ تا ۹/۶ میلی‌متر بر ثانیه قرار گرفته است. این کاهش دامنه باعث کم شدن تاثیر امواج بر روی پایداری سنگ‌های پر درزه و ترک است. فرکانس میانگین امواج انفجاری در این معدن با توجه به برداشت‌ها ۱۱ هرتز بوده که میزان کمی است و تاثیری چندانی بر کاهش

مقاومت توده سنگ ندارد. کاهش دامنه و فرکانس امواج لرزشی ناشی از انفجار باعث افزایش ایمنی کارگاه‌ها، کاهش ناپایداری موضعی و افزایش ایمنی پرسنل شده است.

۵-۵- جمع‌بندی

با استفاده از برداشت‌های میدانی و تحلیل‌های آماری برای دو ناحیه معرفی شده معدن، رابطه‌هایی با ضریب همبستگی بالا ارائه شده است. با توجه به رابطه‌ها ارائه شده و با توجه به مشخصات انفجاری که منجر به ریزش شده، مقدار حداکثر سرعت مجاز در معدن انگوران به‌دست آمده است. با استفاده از این مقدار می‌توان مقدار دو پارامتر فاصله و مقدار خرج بر تاخیر مجاز در هر عملیات آتشکاری برای این معدن محاسبه کرد و از ایجاد هر گونه صدمات ناشی از پدیده لرزش بیش از حد زمین جلوگیری کرد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش تاثیر ارتعاشات ناشی از انفجارهای یک معدن روباز بر سازه های زیرزمینی مجاور آن بررسی شده است. بدین منظور برداشت های لرزه نگاری در یکی از تونل های اصلی معدن انگوران انجام شده است. در این برداشت ها سعی شده تا در هر انفجار، صدمات ناشی از آن انفجار نیز برداشت شود. پس از تحلیل اطلاعات بدست آمده، نتایج زیر حاصل شده است:

- اصلاح الگوی آتشفباری معدن روباز انگوران با استفاده از کاهش خرج مصرفی در هر انفجار، موجب کاهش لرزش های ناشی و جلوگیری از صدمات احتمالی به سازه های زیرزمینی این معدن شده است.
- با انجام برداشت درزه برداری، دسته درزه های اصلی در رمپ اصلی معدن زیرزمینی مشخص شده است.
- با بررسی نتایج حاصل از برداشت های لرزه نگاری مشخص شد، گسل تاثیرگذاری در معدن وجود دارد که باعث کاهش دامنه موج های انفجاری در ناحیه غربی آن شده است.
- با استفاده از روش های آماری، دو رابطه تجربی برای پیش بینی حداکثر سرعت ذرات در ناحیه های شرقی و غربی گسل، با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۹۵۴۴ و ۰/۷۳۵۷ ارائه شده است.
- با بررسی رابطه های ارائه شده، می توان گفت که حداکثر سرعت ذرات با پارامتر فاصله مقیاس شده رابطه عکس دارد.
- در این پژوهش، با استفاده از رابطه های محققین پیشین و پایگاه داده های جمع آوری شده، حداکثر سرعت ذرات در معدن انگوران تخمین زده شده است. با مقایسه مقادیر تخمین زده شده و اندازه گیری شده، این نتیجه حاصل شده که ضرایب همبستگی حاصل از رابطه های ارائه شده در این پژوهش، بهتر و دقیق تر از رابطه های پیشین است.
- با انجام آزمون همبستگی میان مقادیر تخمین زده شده از رابطه های ارائه شده با رابطه های پیشین، همخوانی خوبی میان آنها مشاهده شده است. اختلافات موجود میان ضرایب

همبستگی این رابطه ها نشان می‌دهد که ارائه یک رابطه برای محاسبه حداکثر سرعت ذرات در یک معدن به خصوص می‌تواند دقت طراحی و ایمنی آتشباری معدن را افزایش دهد.

- با استفاده از اطلاعات ریزش رخ داده در ناحیه شرقی و رابطه ارائه شده در این محدوده، حداکثر سرعت مجاز ذرات ۱۱/۱۷ میلی‌متر بر ثانیه محاسبه شده است. با توجه به حجم ریزش‌ها می‌توان بیان کرد، این عدد آستانه‌ای برای ریزش‌های موضعی بسیار کوچک در رمپ اصلی معدن انگوران است.
- کاهش دامنه امواج انفجاری معدن روباز انگوران پس از اصلاح الگوی آتشباری، باعث افزایش پایداری توده‌سنگ دارای درزه و ترک شده است. فرکانس پایین امواج انفجاری این معدن نیز باعث کاهش تاثیر این امواج بر مقاومت توده‌سنگ است.

۶-۲- پیشنهادها

به منظور بهبود نتایج حاصل از برداشت‌ها در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

- برای بالا بردن دقت، استفاده هم‌زمان سه دستگاه لرزه نگار در سقف، دیواره و کف فضای زیرزمینی برای یک رویداد دینامیکی، می‌توان استفاده کرد.
- همچنین اختصاص تونل‌هایی (دستک‌های) تحقیقاتی در ترازهای مختلف معدن برای بررسی بهتر و جلوگیری از تداخل برداشت‌ها با عملیات معدنکاری نیز می‌تواند کمک شایانی به امر برداشت لرزه نگاری داشته باشد.

پیوست

Notes

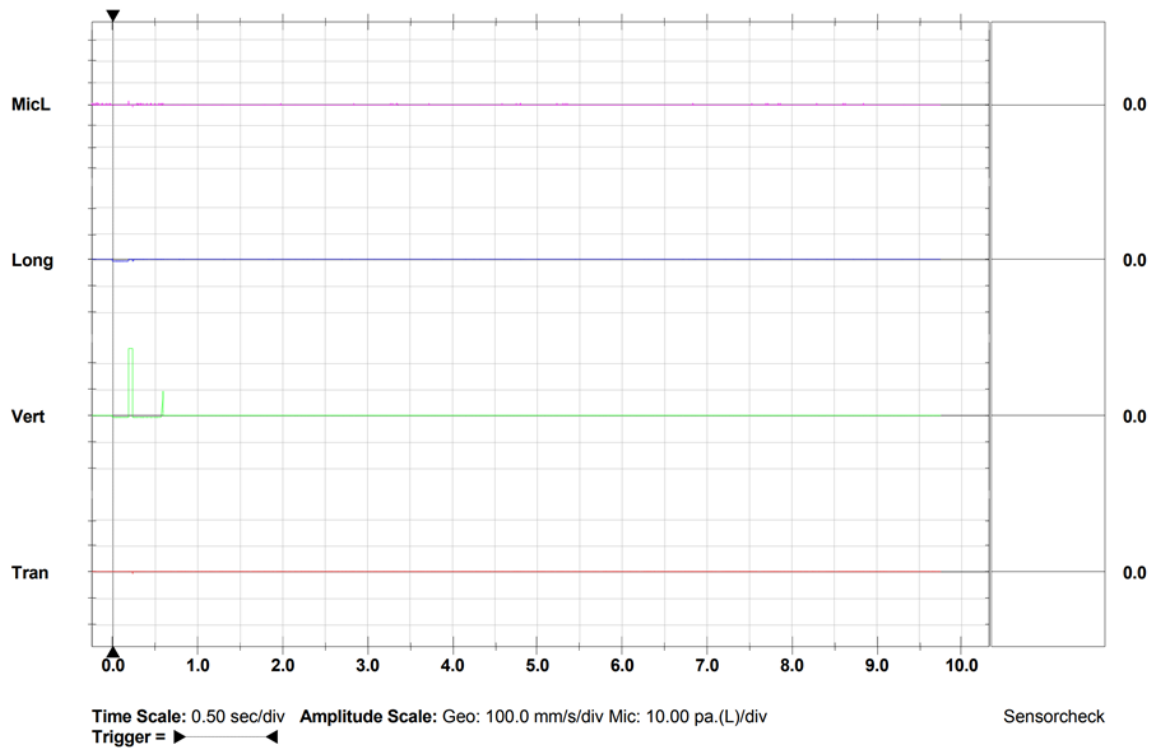
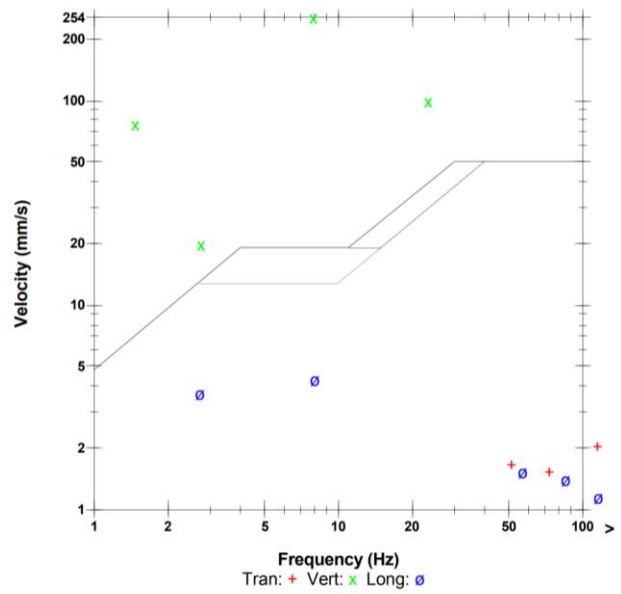
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 1.50 pa.(L) at 0.237 sec
 ZC Freq >100 Hz
 Channel Test Disabled

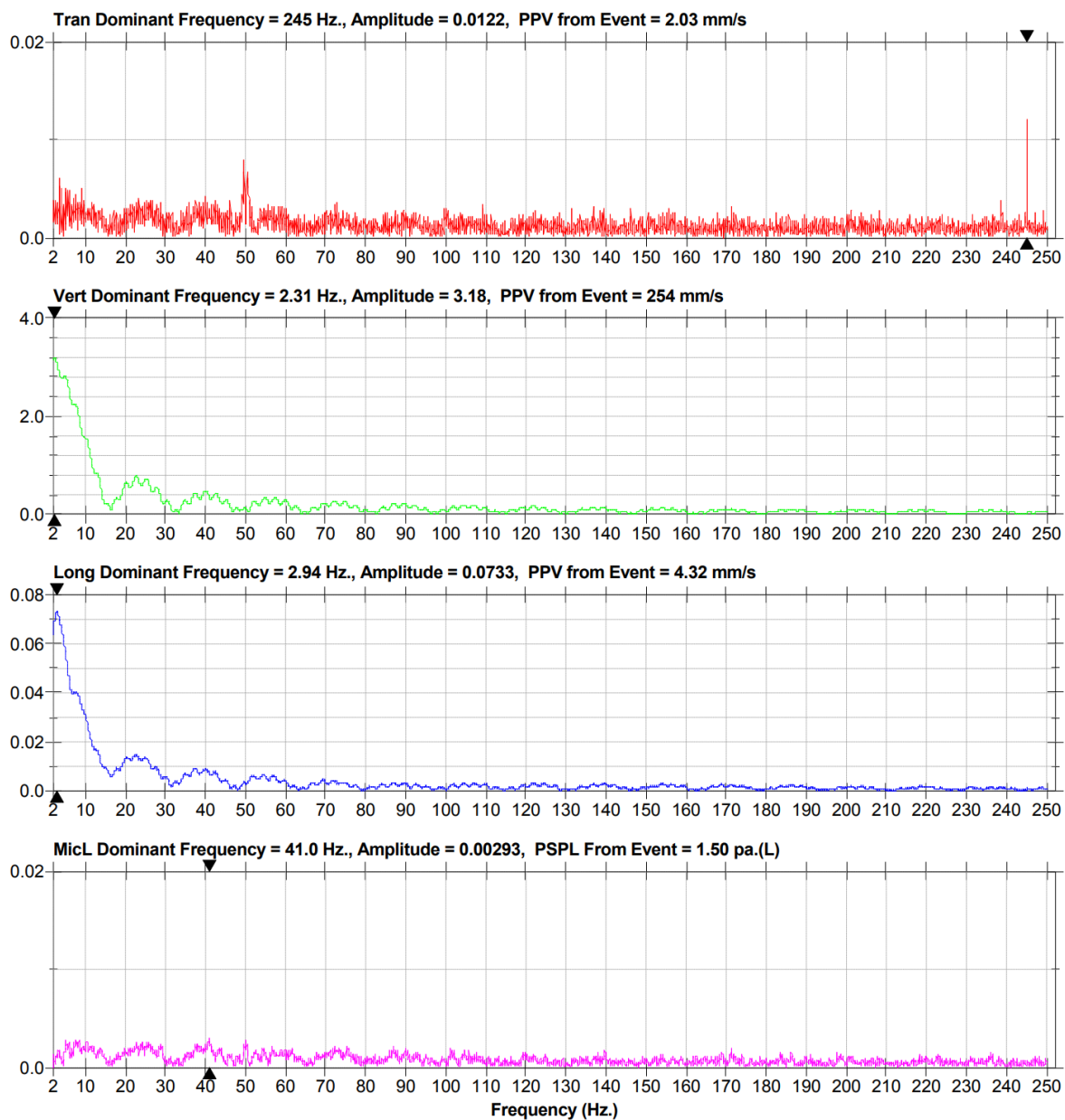
	Tran	Vert	Long	
PPV	2.03	***	4.32	mm/s
PPV (Ponderated)	0.867	475	7.05	mm/s
ZC Freq	>100	7.9	8.0	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.237	0.176	0.176	sec
Peak Acceleration	0.212	26.2	0.517	g
Peak Displacement	0.00322	7.82	0.203	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum *** mm/s at 0.176 sec

USBM R18507 And OSMRE



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد یک



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد یک

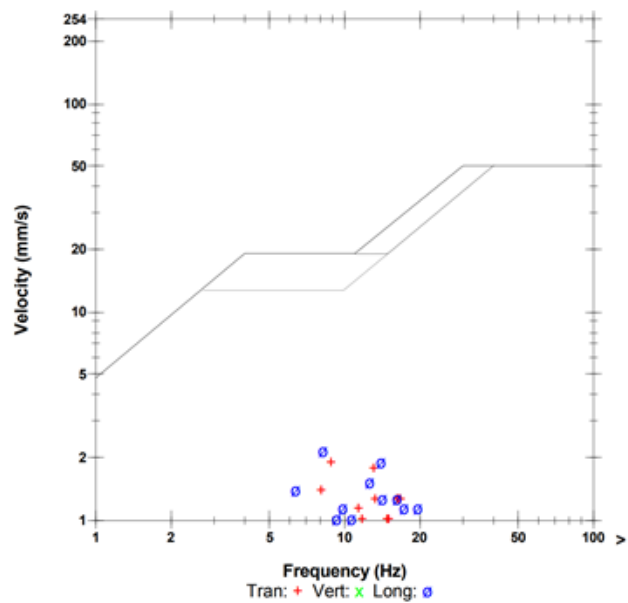
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

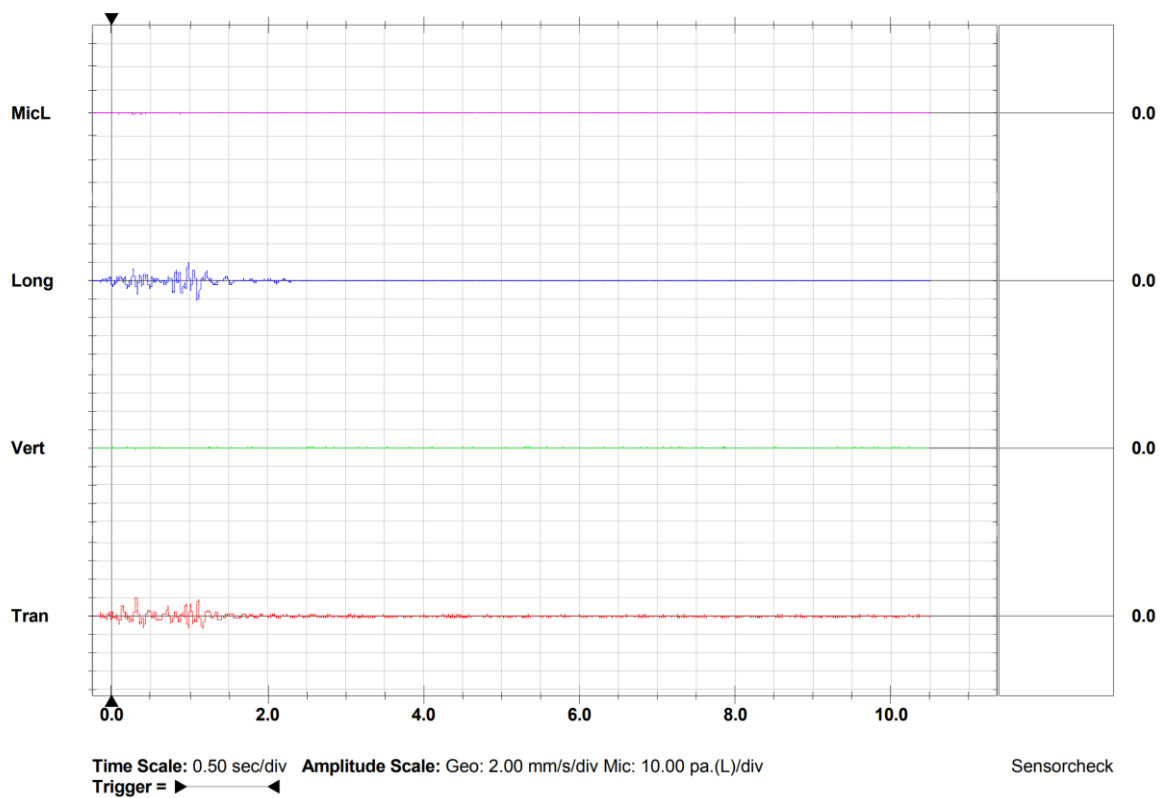
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.107 sec
 ZC Freq >200 Hz
 Channel Test Disabled

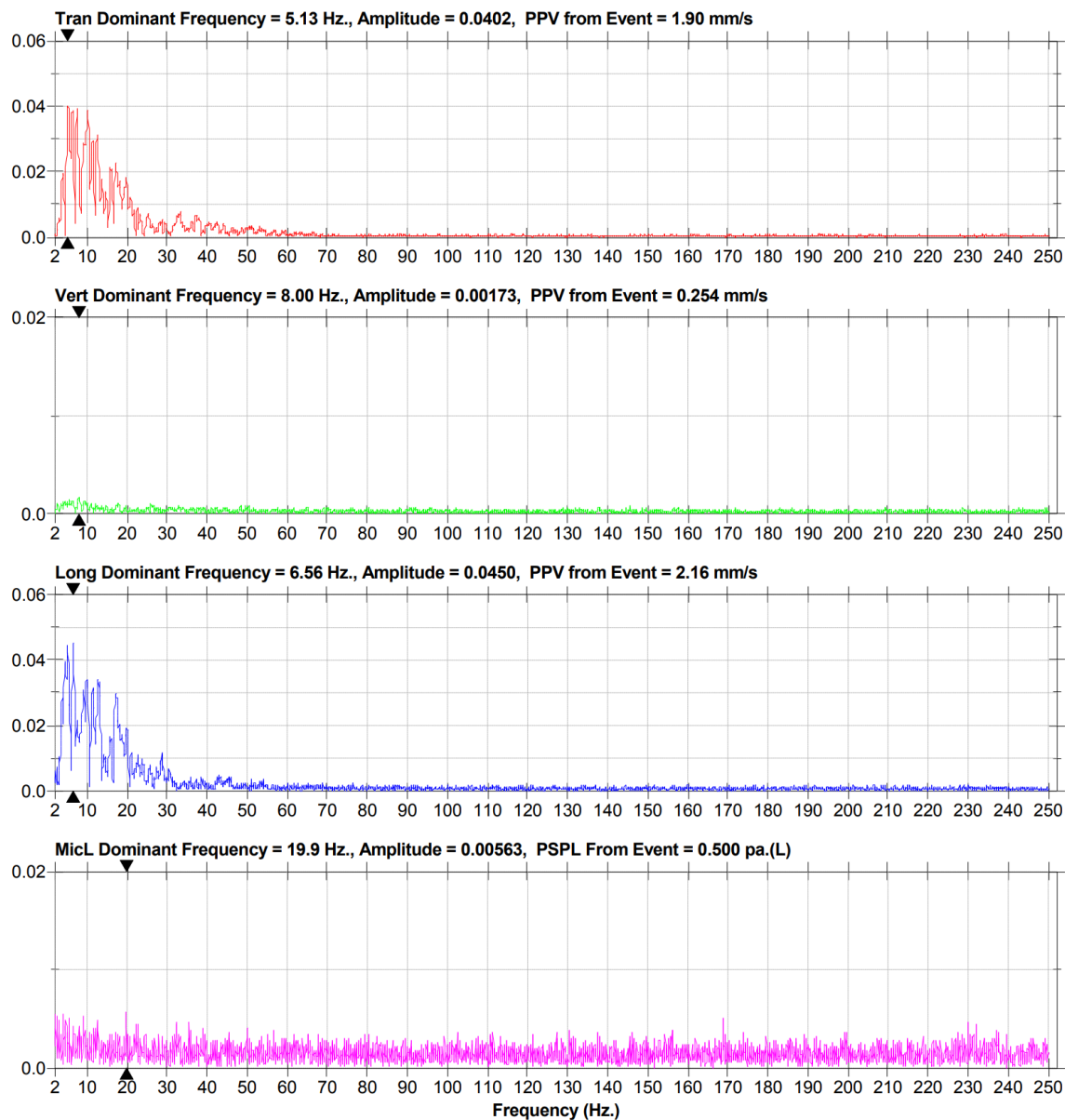
	Tran	Vert	Long	
PPV	1.90	0.254	2.16	mm/s
PPV (Ponderated)	1.88	0.148	2.48	mm/s
ZC Freq	8.8	>200	8.2	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.313	0.298	1.102	sec
Peak Acceleration	0.0530	0.0530	0.0530	g
Peak Displacement	0.0275	0.00006	0.0402	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 2.70 mm/s at 1.106 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد دو



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد دو

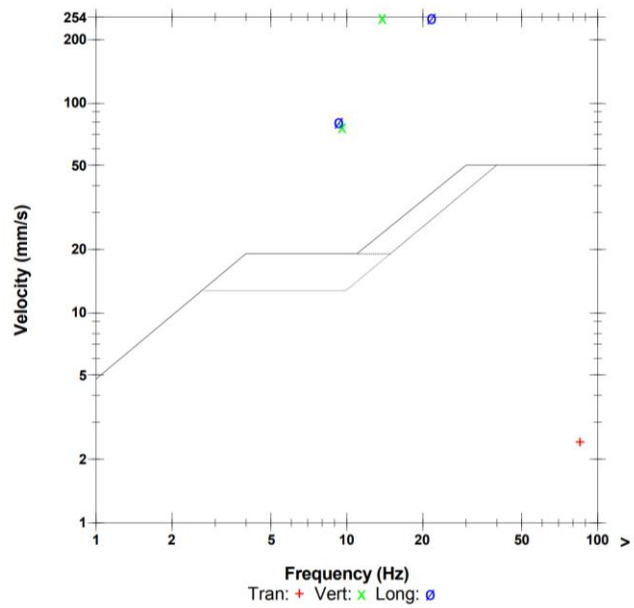
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

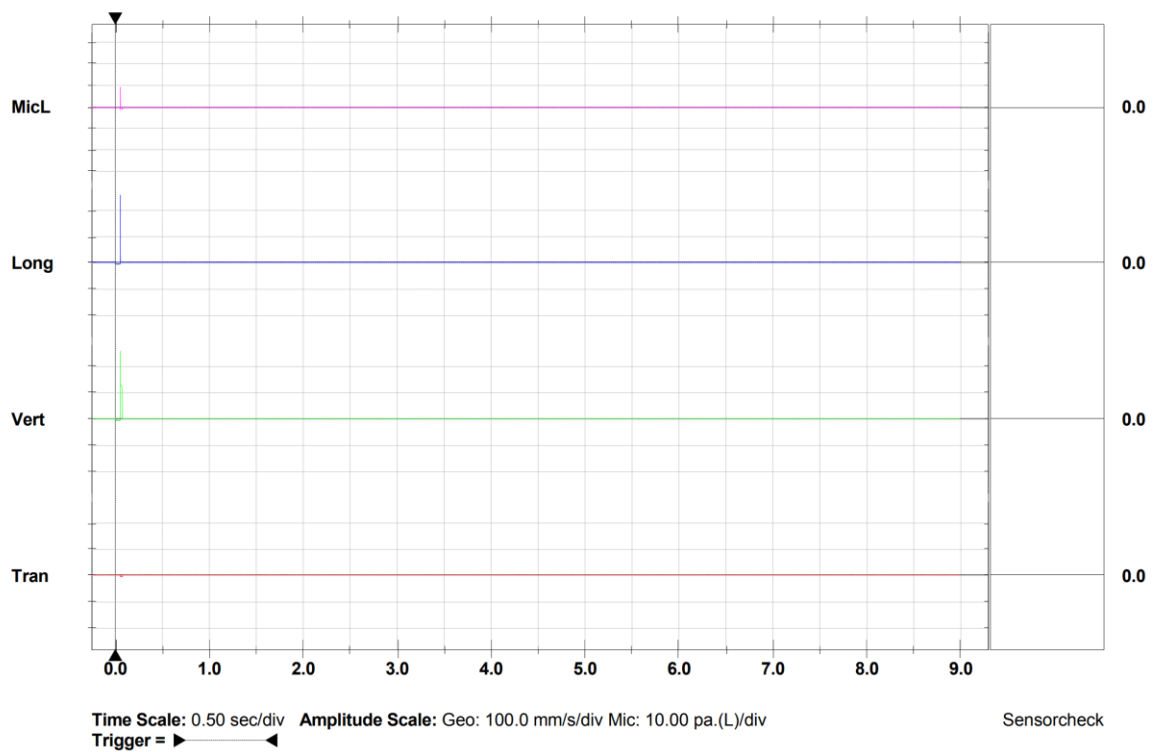
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 9.25 pa.(L) at 0.047 sec
 ZC Freq 51 Hz
 Channel Test Disabled

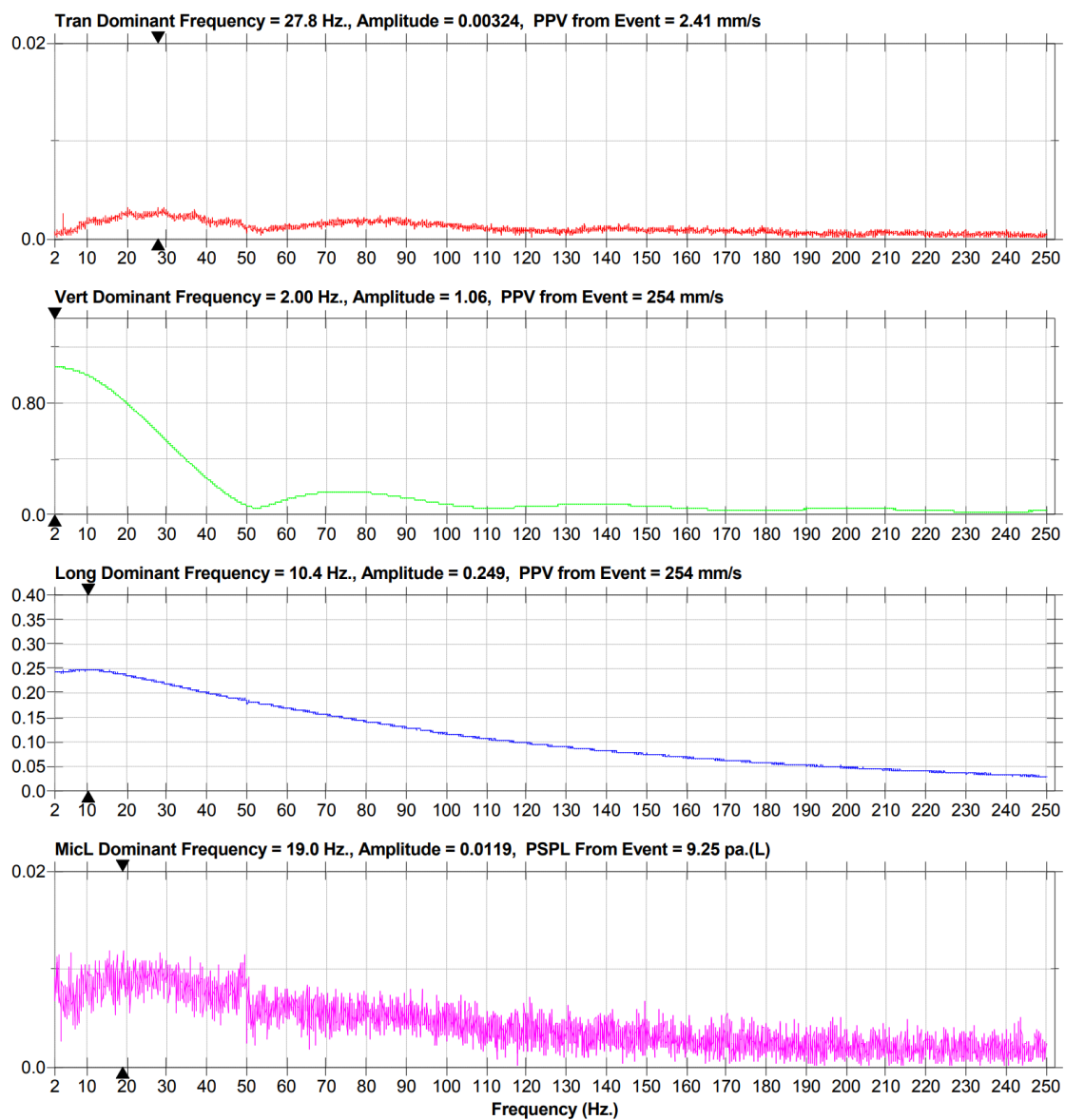
	Tran	Vert	Long	
PPV	2.41	***	***	mm/s
PPV (Ponderated)	0.940	343	140	mm/s
ZC Freq	85	13.8	22	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.047	0.047	0.047	sec
Peak Acceleration	0.186	16.7	17.2	g
Peak Displacement	0.00372	2.47	0.565	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum *** mm/s at 0.047 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد سه



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد سه

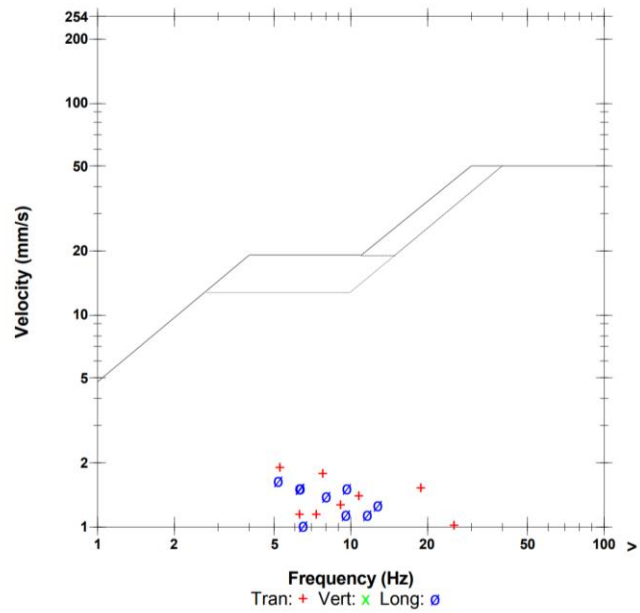
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

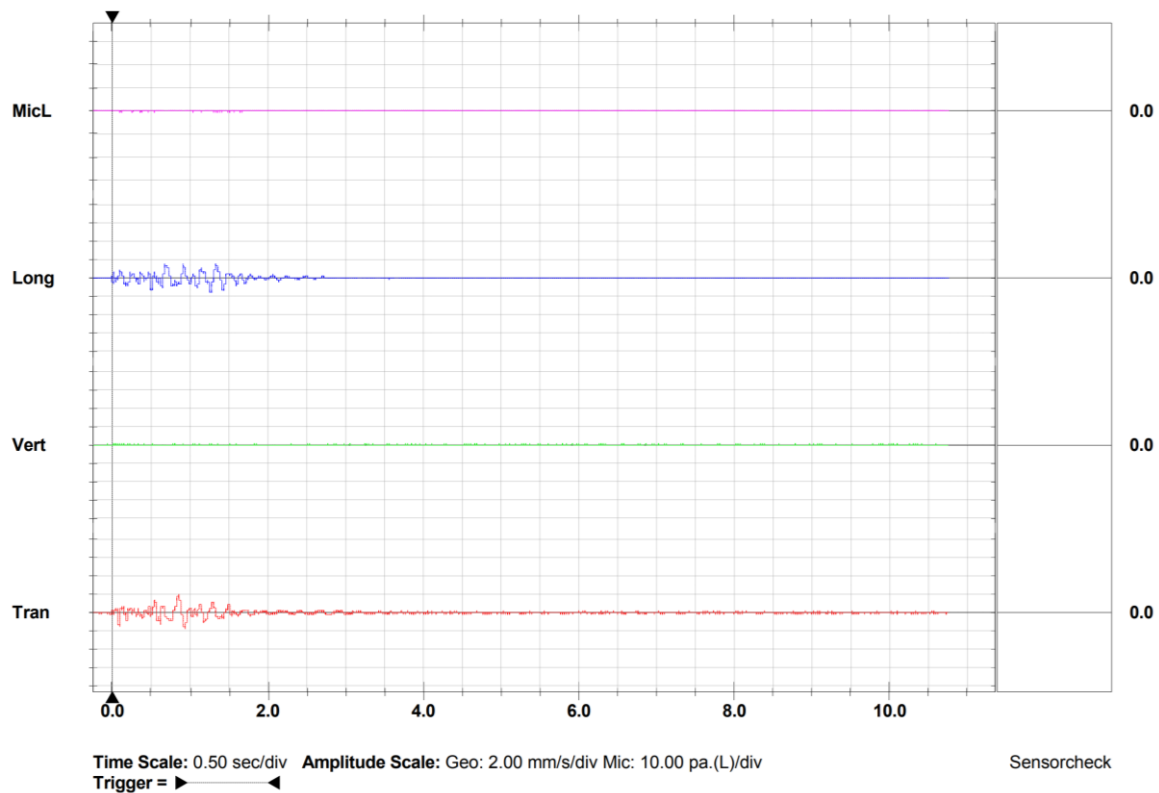
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.086 sec
 ZC Freq >200 Hz
 Channel Test Disabled

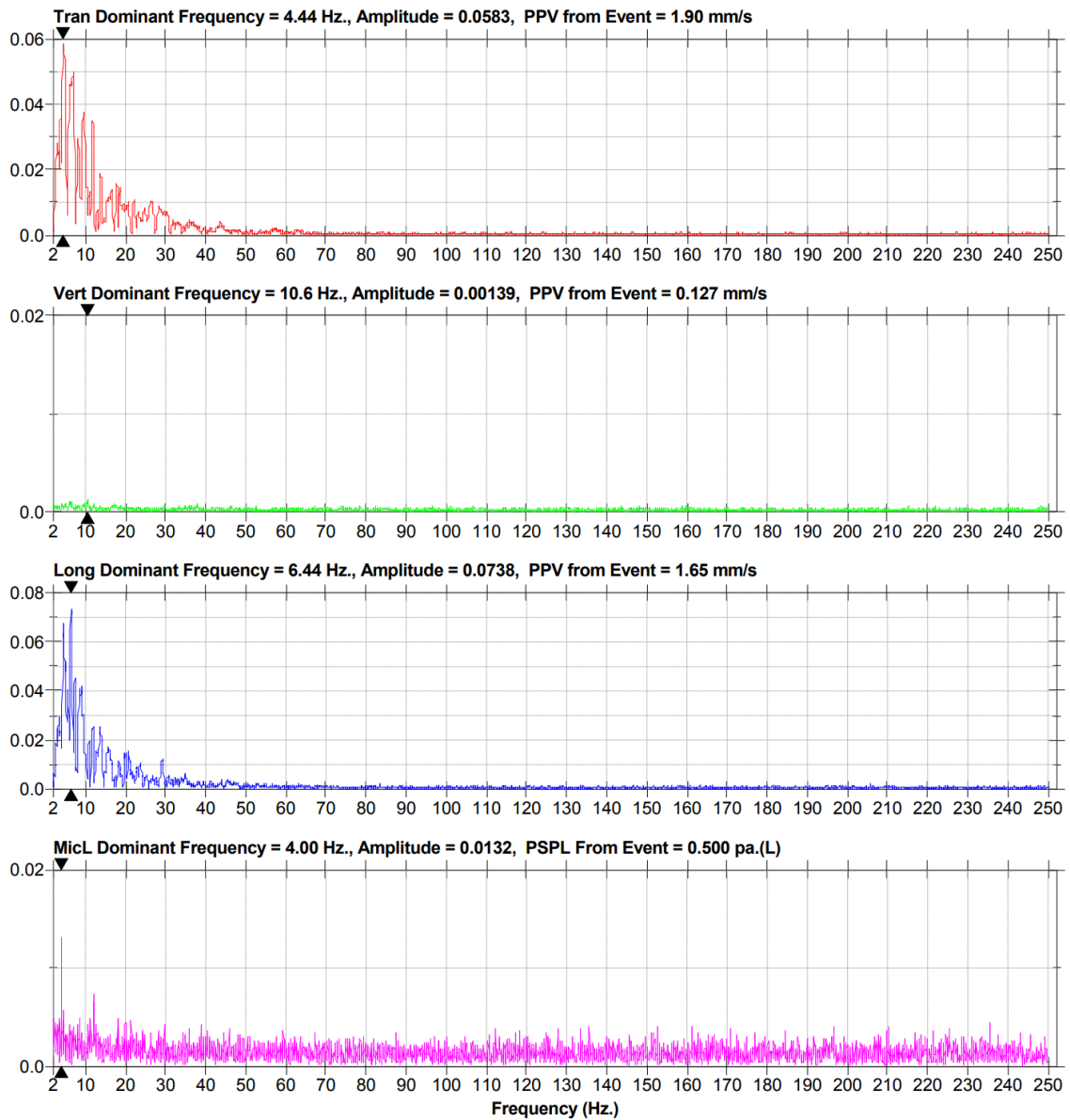
	Tran	Vert	Long	
PPV	1.90	0.127	1.65	mm/s
PPV (Ponderated)	2.75	0.109	2.39	mm/s
ZC Freq	5.3	>200	5.2	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.846	-0.074	1.259	sec
Peak Acceleration	0.0265	0.0530	0.0265	g
Peak Displacement	0.0484	0.0	0.0444	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 2.01 mm/s at 0.921 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد پنج



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد پنج

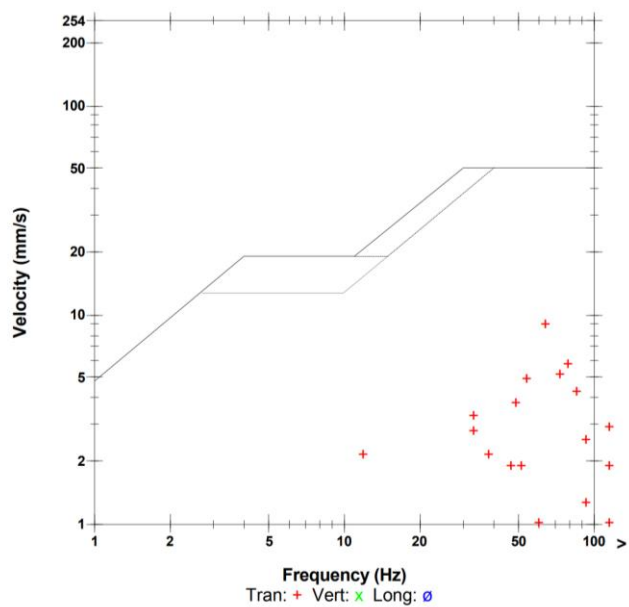
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

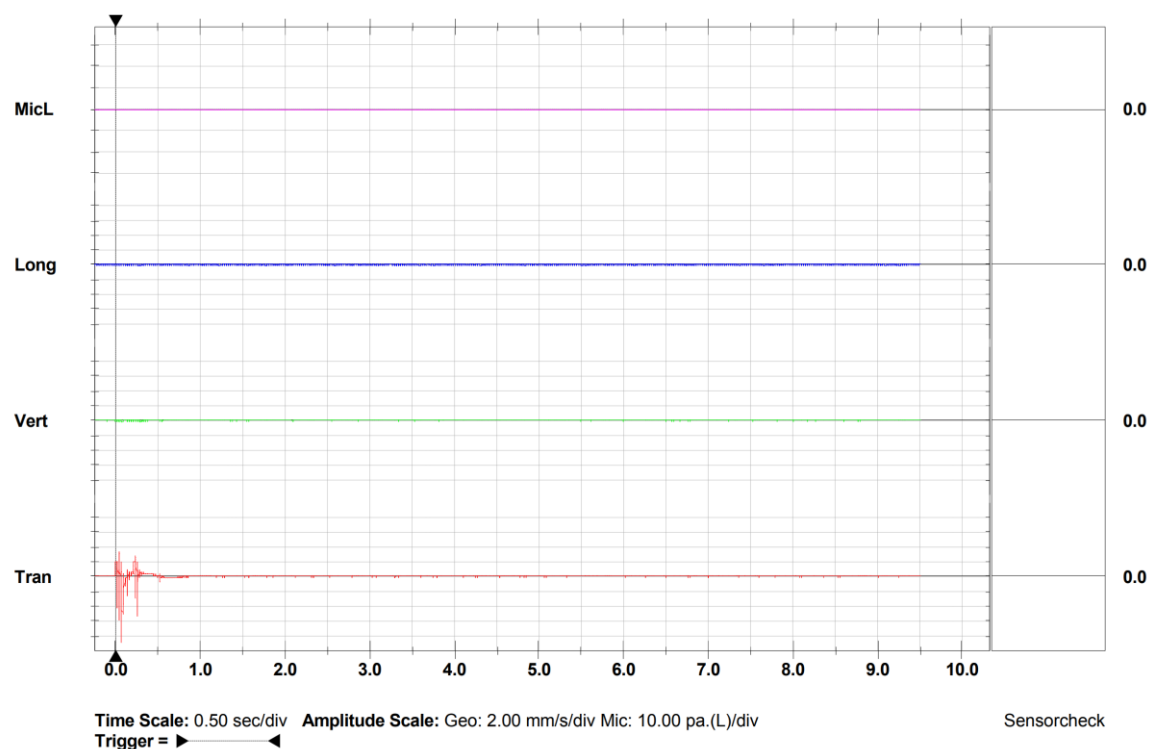
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.248 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

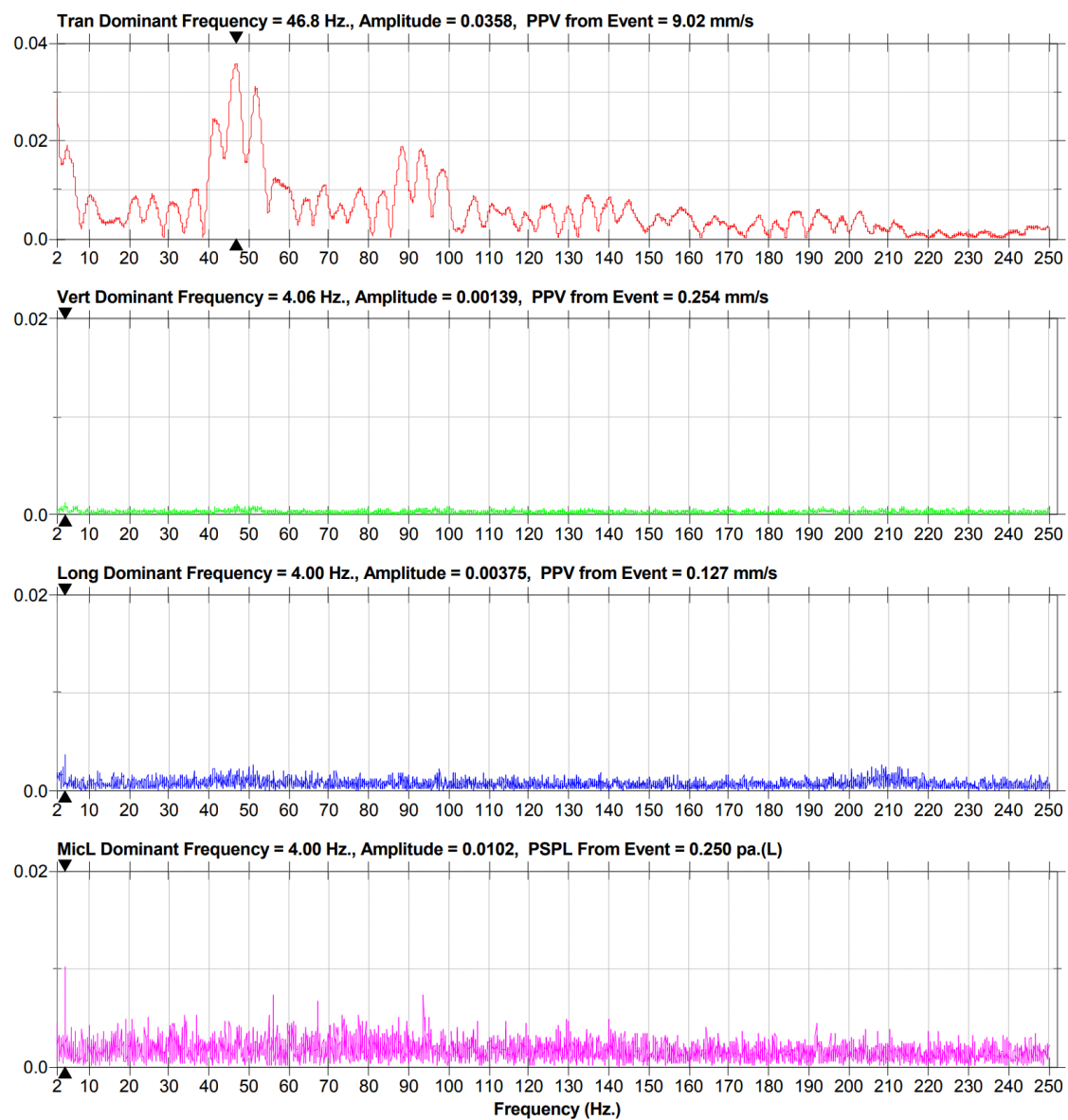
	Tran	Vert	Long	
PPV	9.02	0.254	0.127	mm/s
PPV (Ponderated)	6.02	0.118	0.127	mm/s
ZC Freq	64	>200	>200	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.056	0.056	-0.238	sec
Peak Acceleration	0.557	0.0530	0.0265	g
Peak Displacement	0.0294	0.00006	0.0	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 9.02 mm/s at 0.056 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد شش



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد شش

Notes

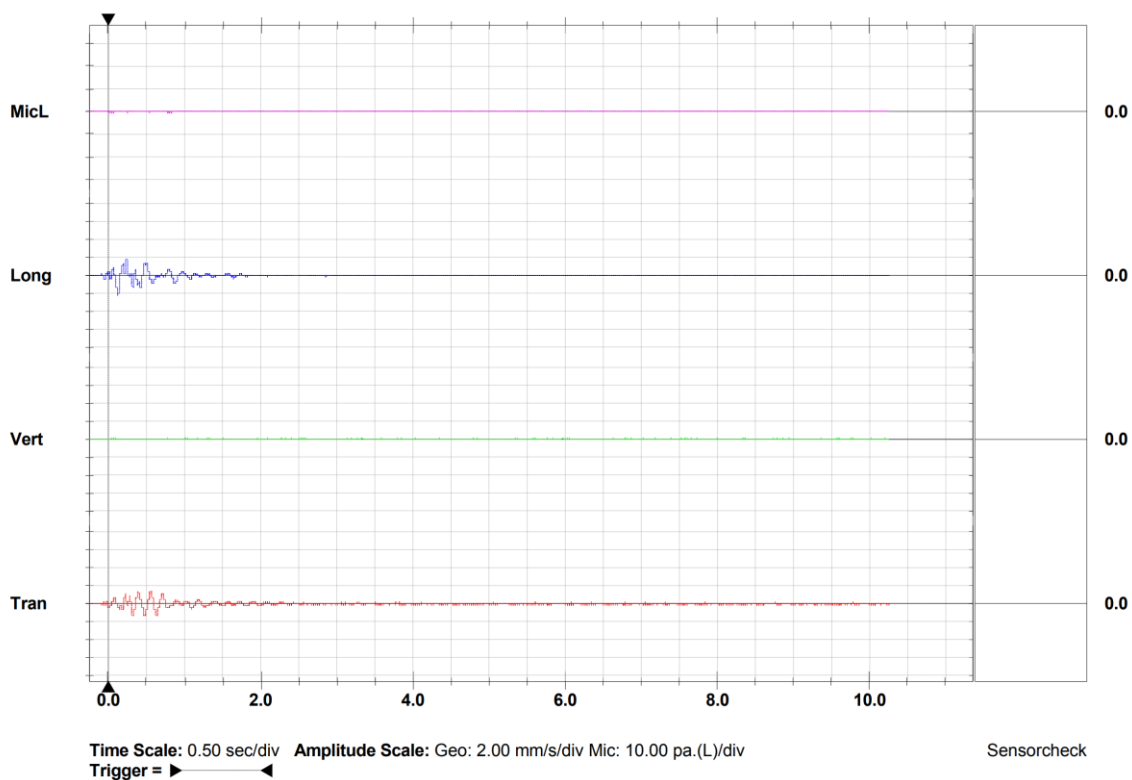
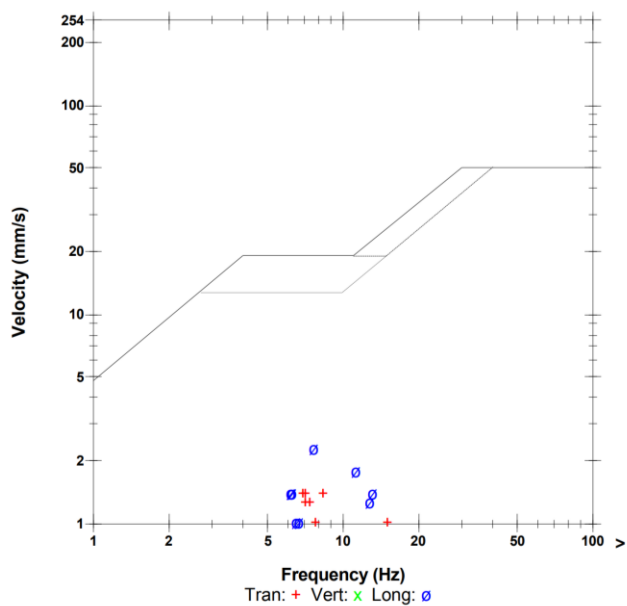
USBM R18507 And OSMRE

Post Event Notes

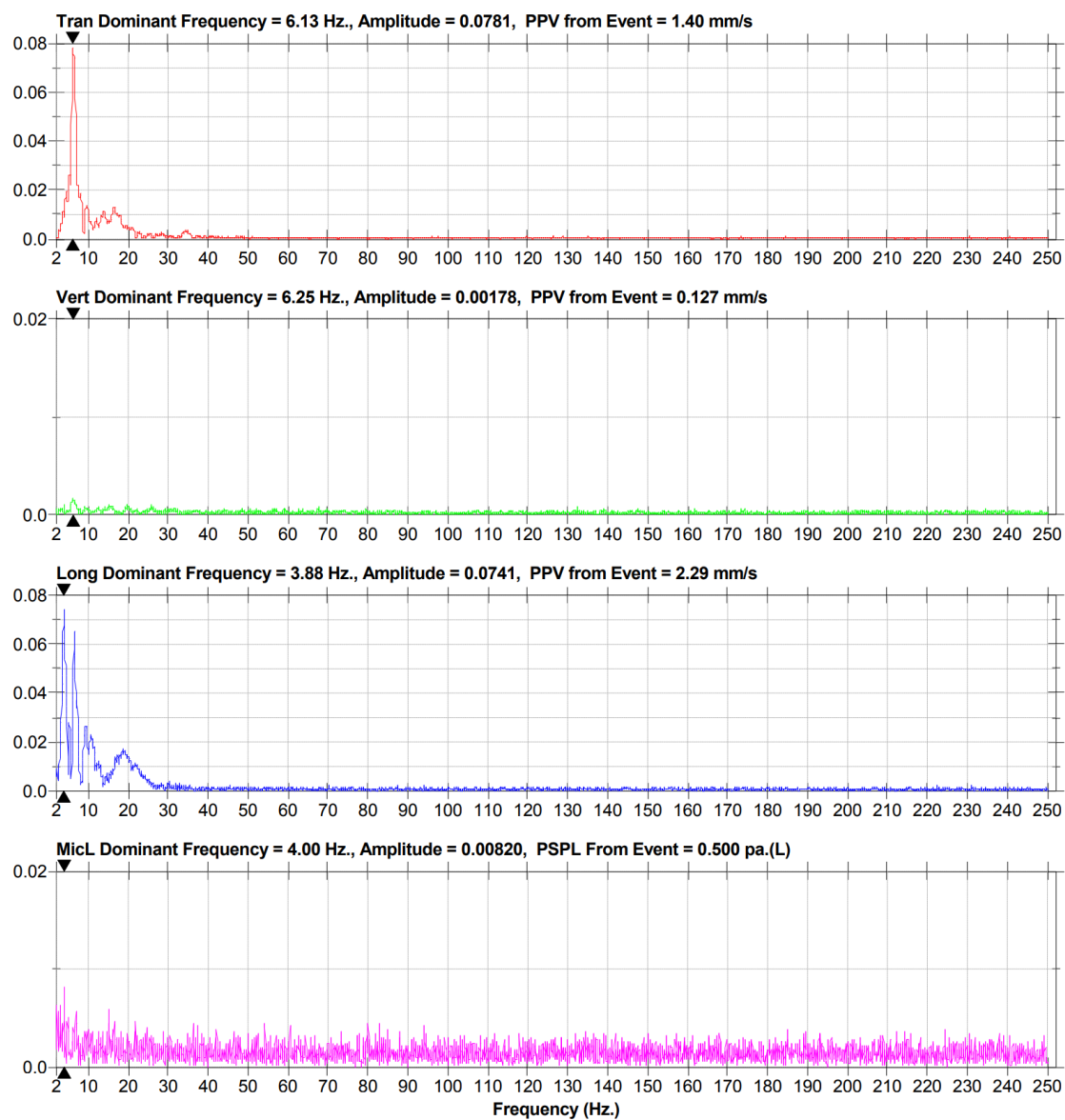
Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.004 sec
 ZC Freq >200 Hz
 Channel Test Disabled

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.40	0.127	2.29	mm/s
PPV (Ponderated)	1.50	0.101	3.03	mm/s
ZC Freq	8.3	>200	7.6	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.318	-0.244	0.120	sec
Peak Acceleration	0.0530	0.0530	0.0530	g
Peak Displacement	0.0340	0.0	0.0420	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 2.32 mm/s at 0.120 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد هفت



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد هفت

Notes

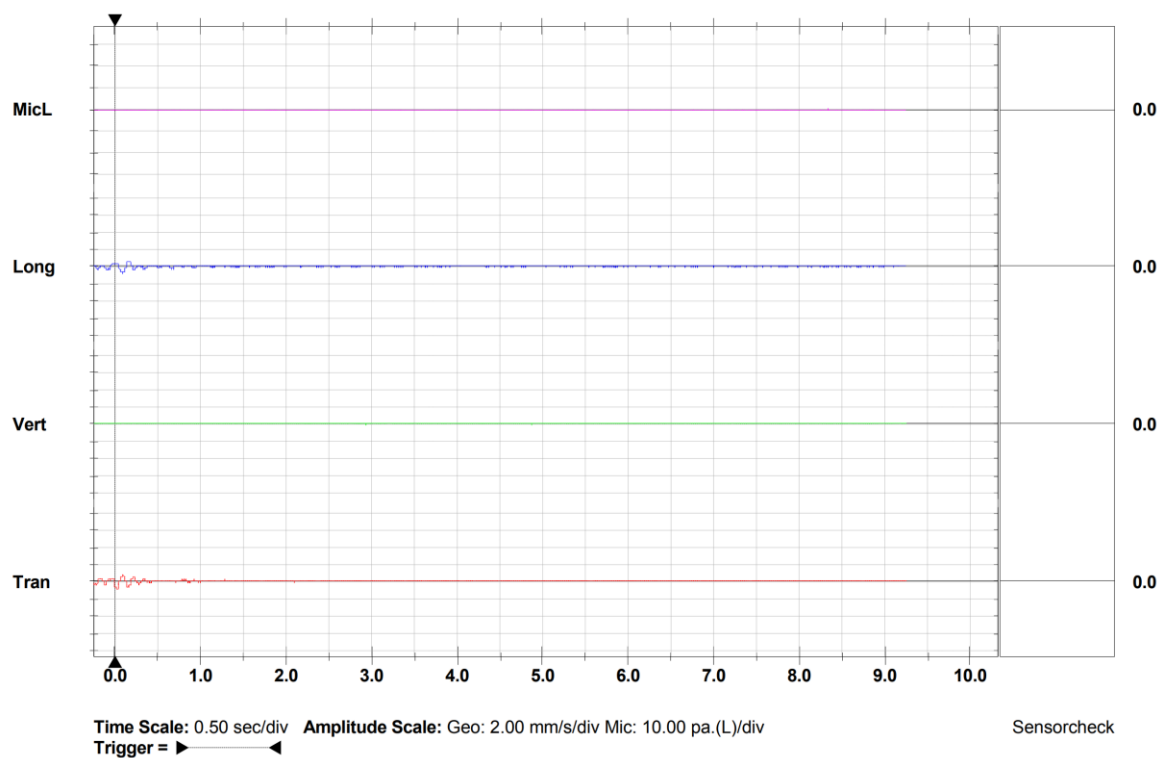
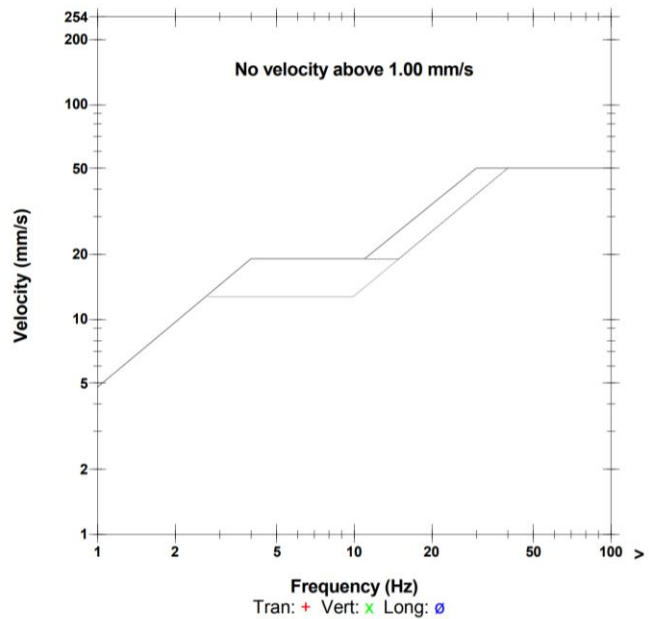
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.192 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

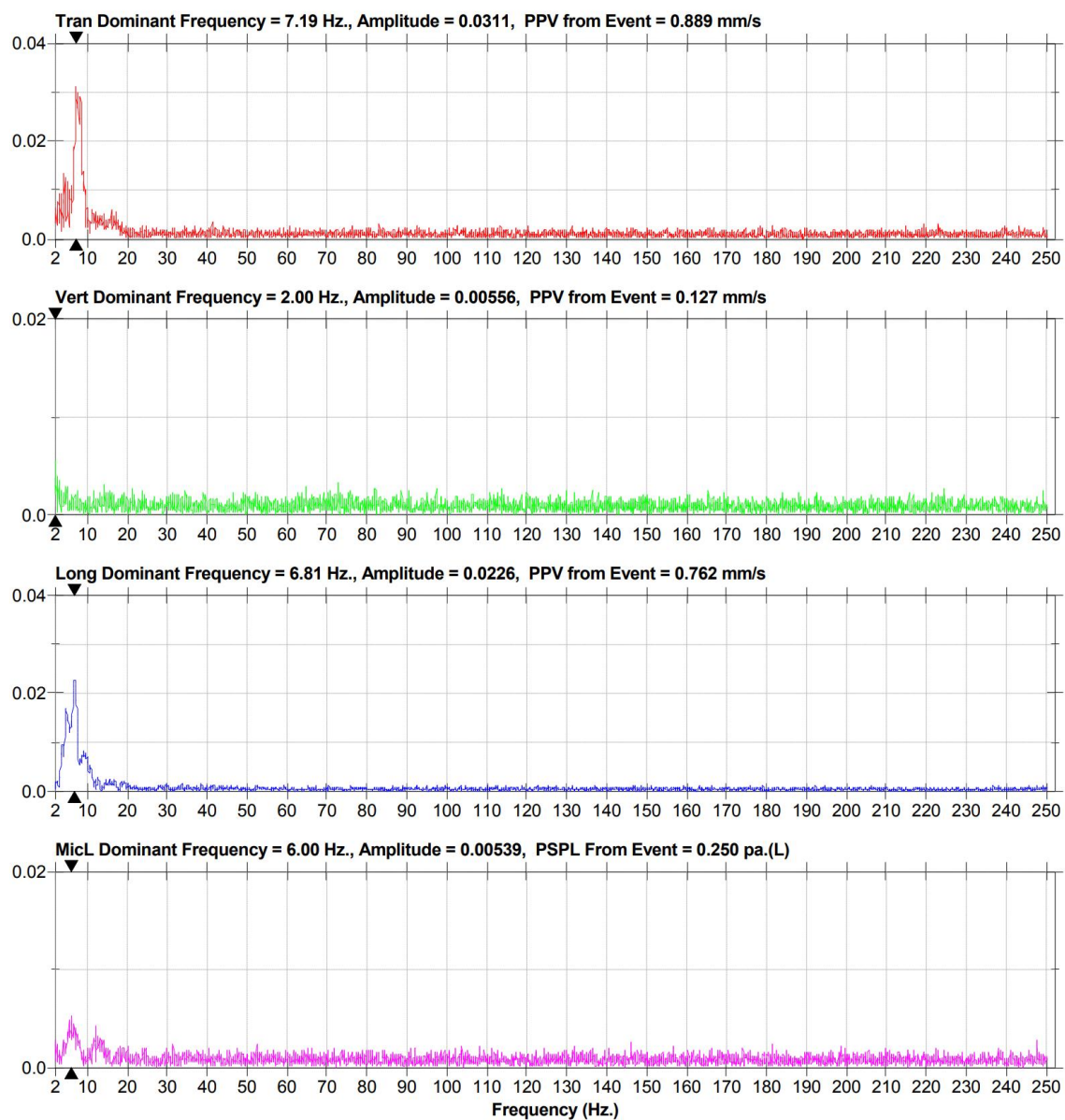
	Tran	Vert	Long	
PPV	0.889	0.127	0.762	mm/s
PPV (Ponderated)	0.971	0.160	0.787	mm/s
ZC Freq	8.7	>100	7.1	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.087	-0.241	0.086	sec
Peak Acceleration	0.0265	0.0133	0.0265	g
Peak Displacement	0.0166	0.0	0.0171	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 1.09 mm/s at 0.087 sec

USBM RI8507 And OSMRE



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد هشت



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد هشت

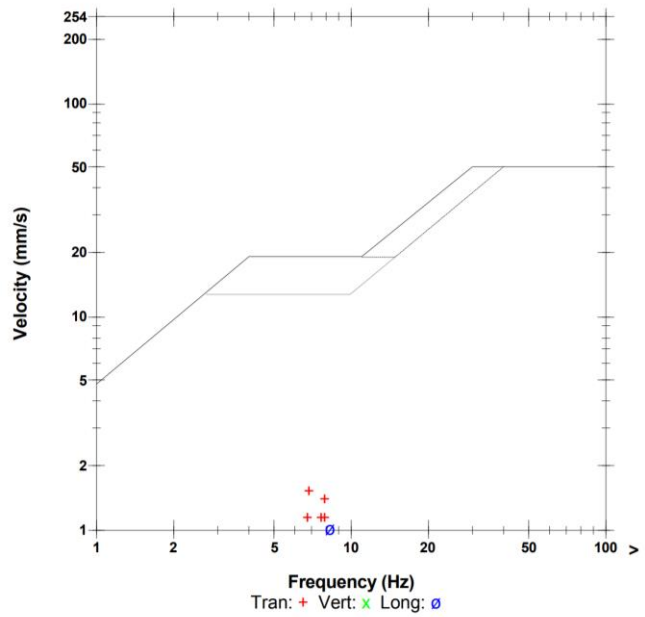
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

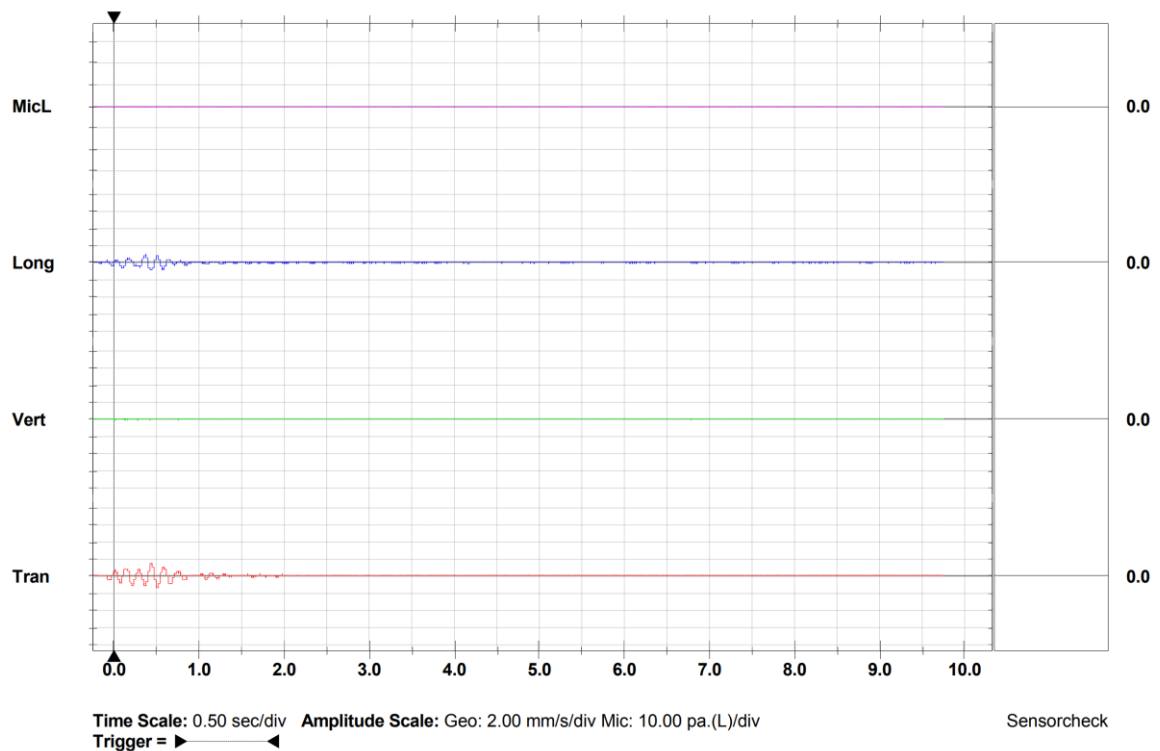
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.234 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

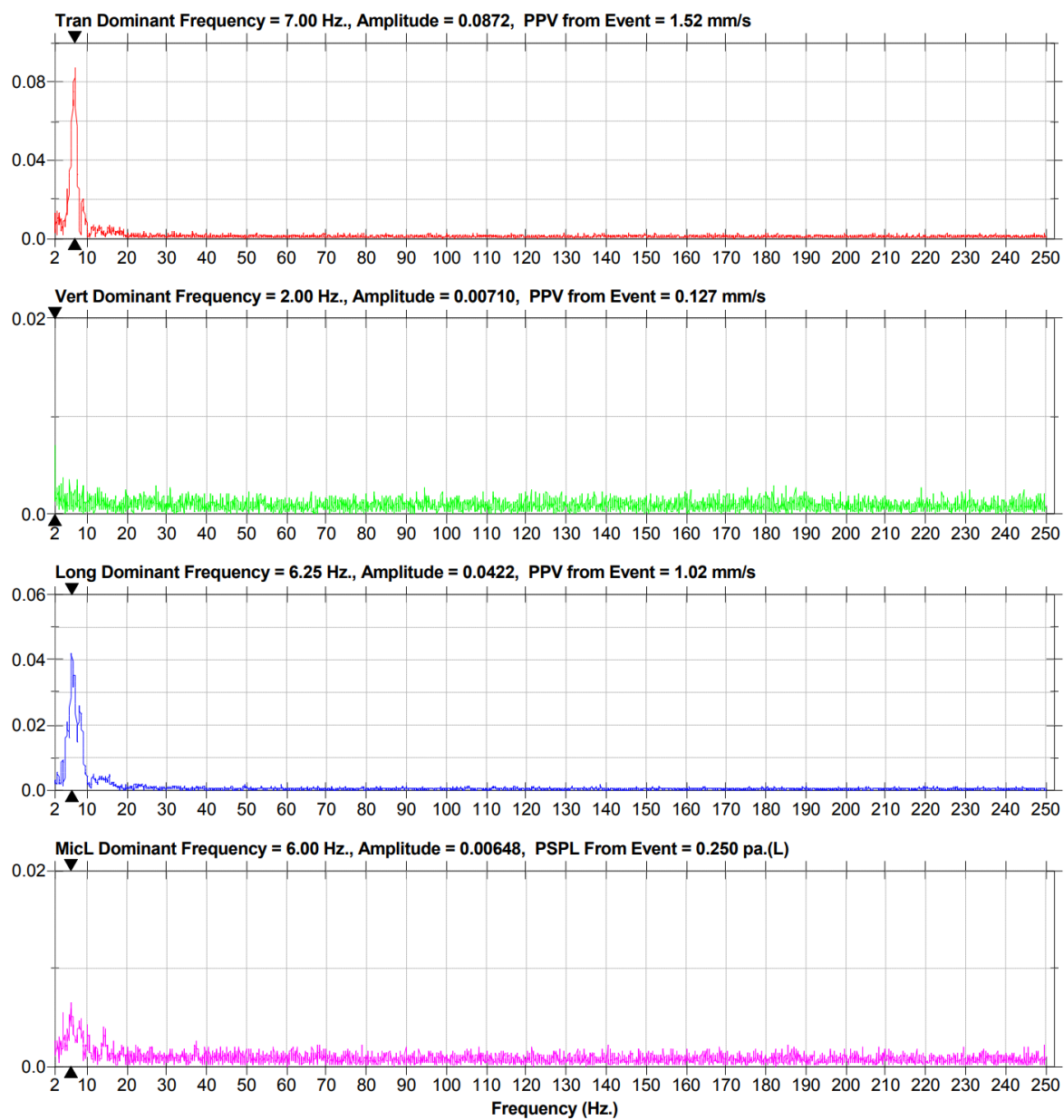
	Tran	Vert	Long	
PPV	1.52	0.127	1.02	mm/s
PPV (Ponderated)	1.74	0.137	1.03	mm/s
ZC Freq	6.8	>100	8.3	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.431	-0.249	0.365	sec
Peak Acceleration	0.0133	0.0265	0.0265	g
Peak Displacement	0.0383	0.0	0.0233	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 1.76 mm/s at 0.431 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد نه



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد نه

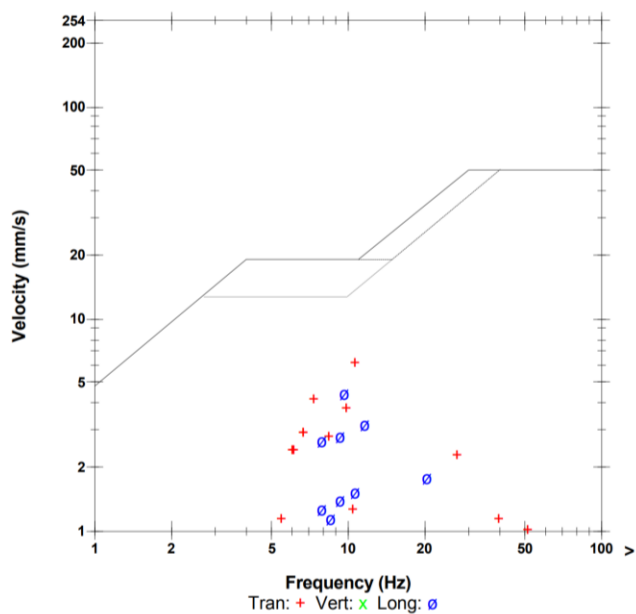
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

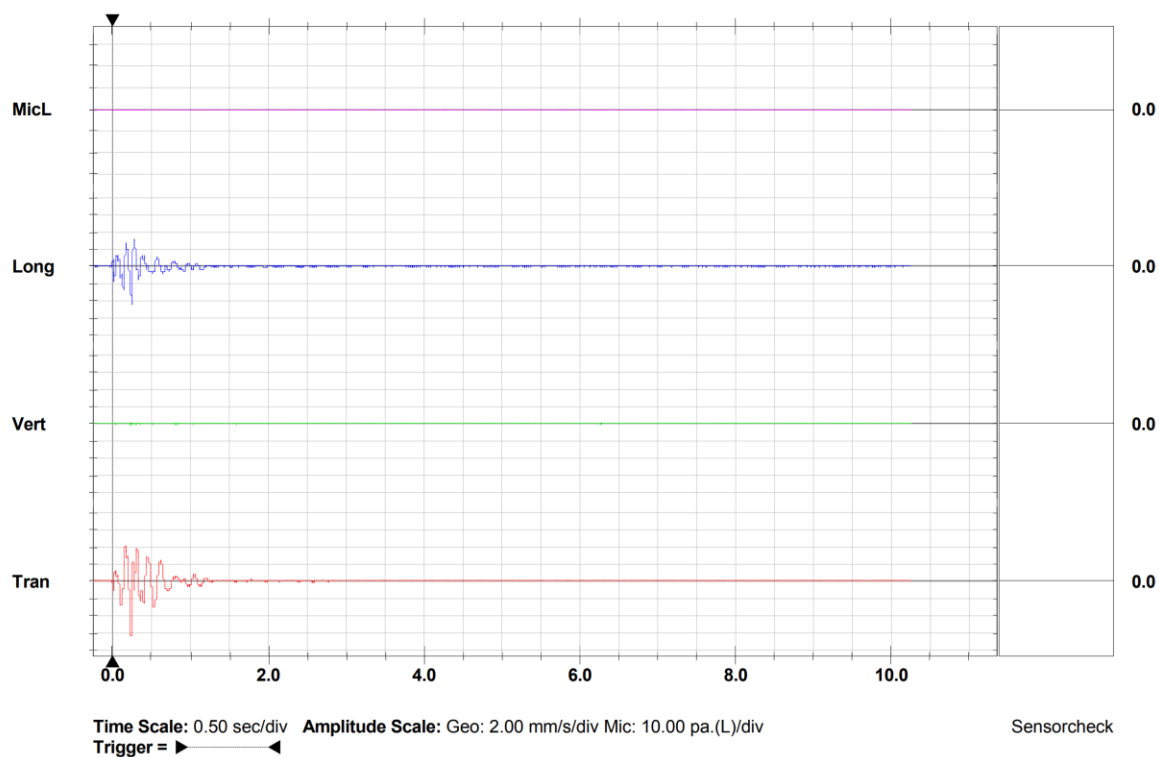
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.227 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

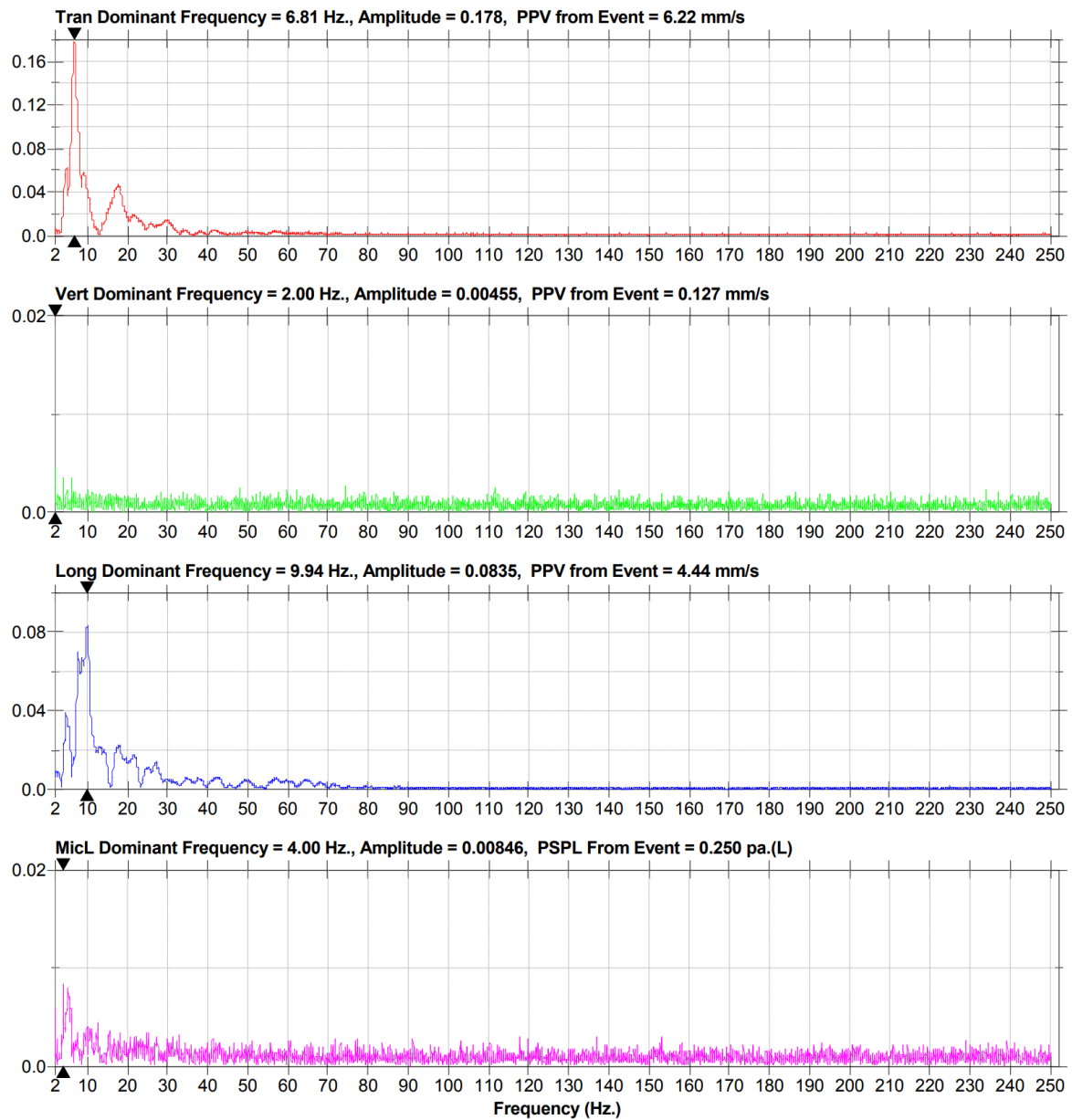
	Tran	Vert	Long	
PPV	6.22	0.127	4.44	mm/s
PPV (Ponderated)	6.30	0.176	4.75	mm/s
ZC Freq	11	>100	9.7	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.234	-0.193	0.245	sec
Peak Acceleration	0.0663	0.0133	0.0530	g
Peak Displacement	0.0913	0.0	0.0624	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 7.12 mm/s at 0.238 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ده



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ده

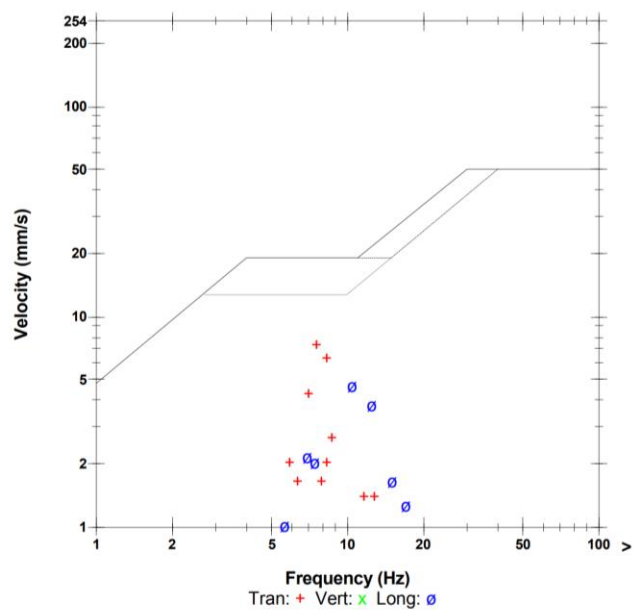
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

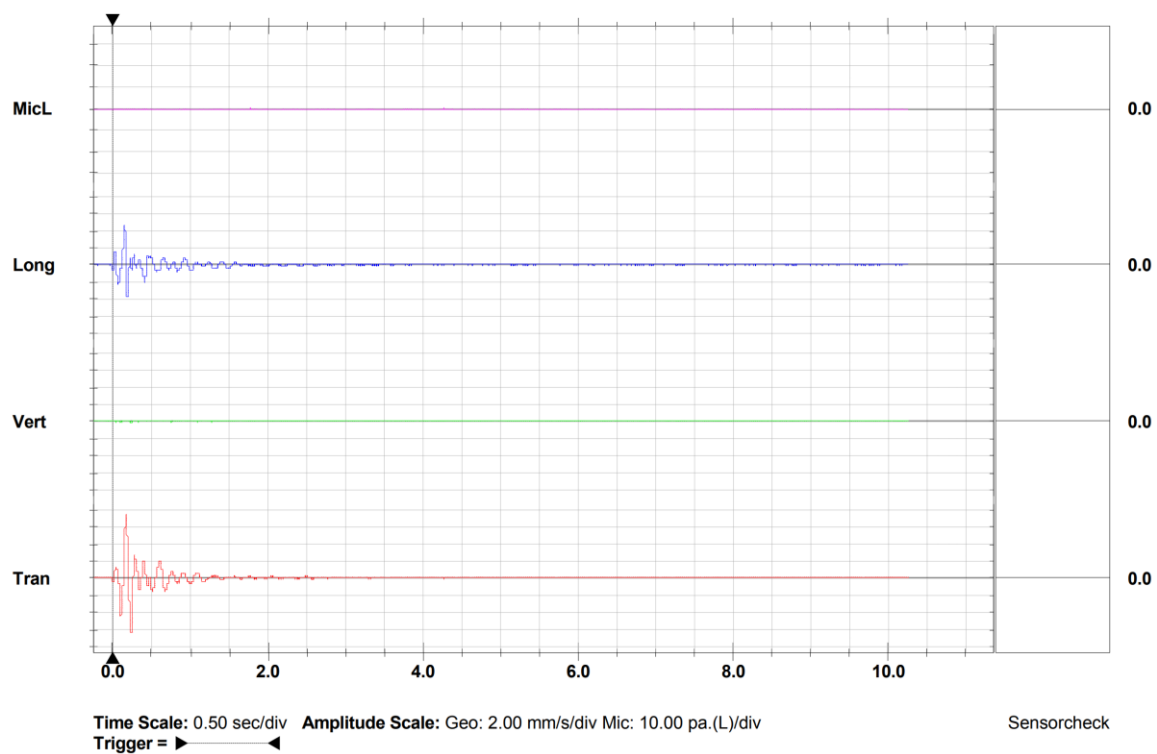
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.071 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

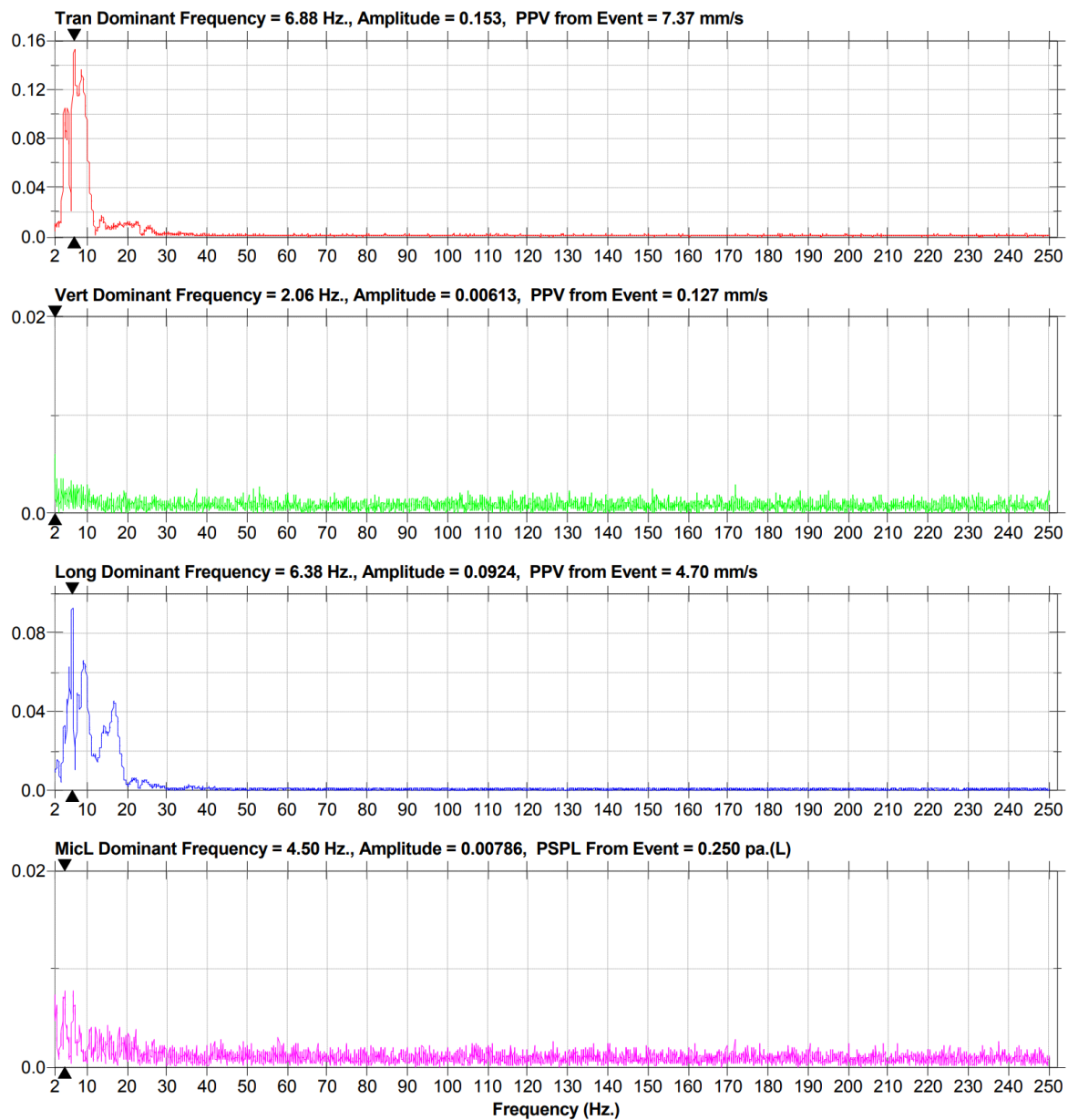
	Tran	Vert	Long	
PPV	7.37	0.127	4.70	mm/s
PPV (Ponderated)	8.19	0.188	5.14	mm/s
ZC Freq	7.5	>100	10	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.167	-0.240	0.148	sec
Peak Acceleration	0.0398	0.0133	0.0398	g
Peak Displacement	0.148	0.0	0.0683	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 7.52 mm/s at 0.167 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۱



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۱

Notes

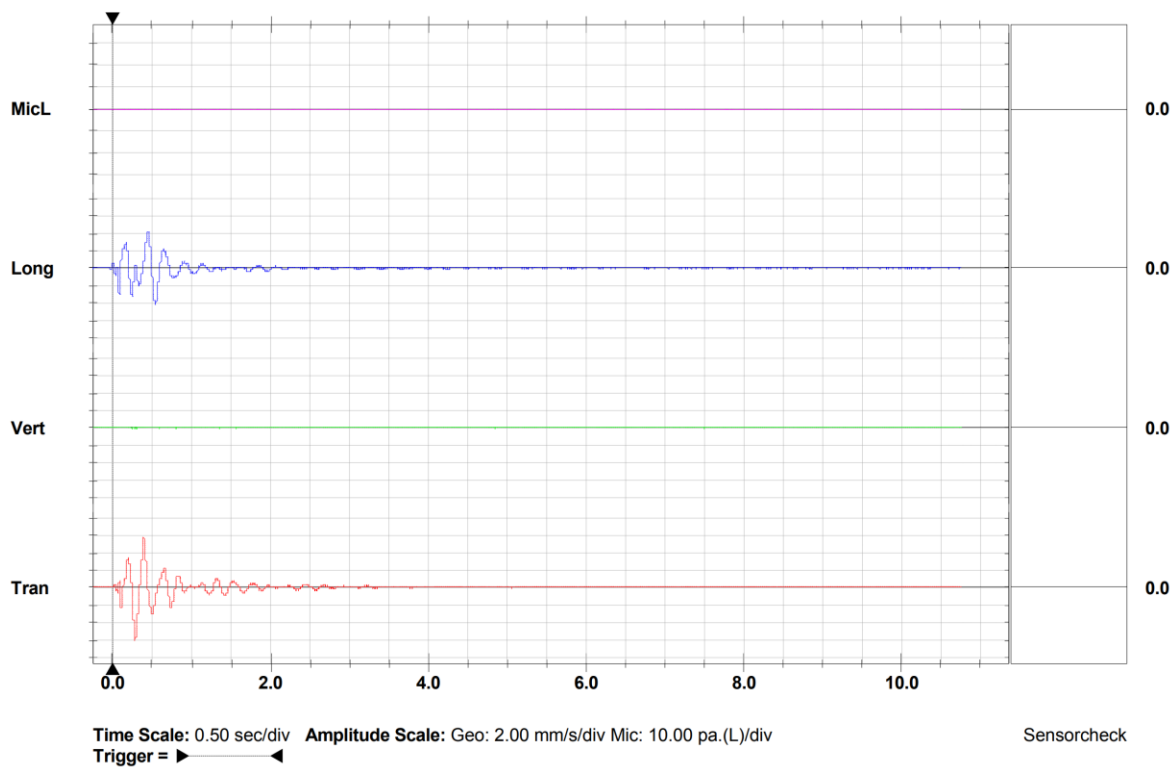
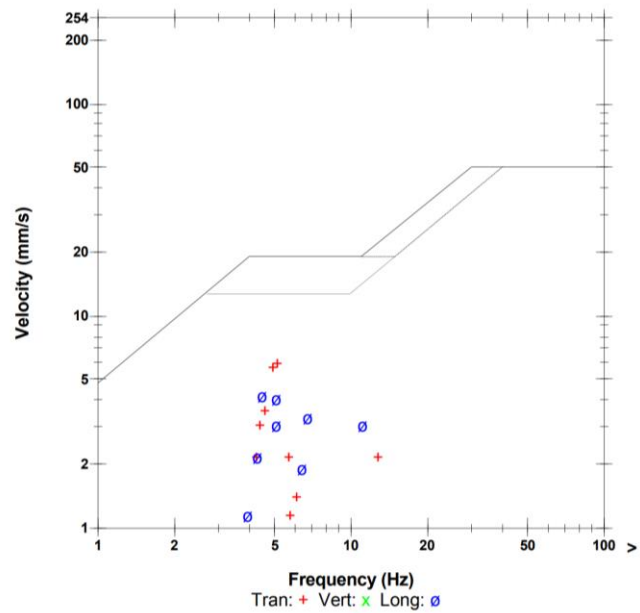
USBM RI8507 And OSMRE

Post Event Notes

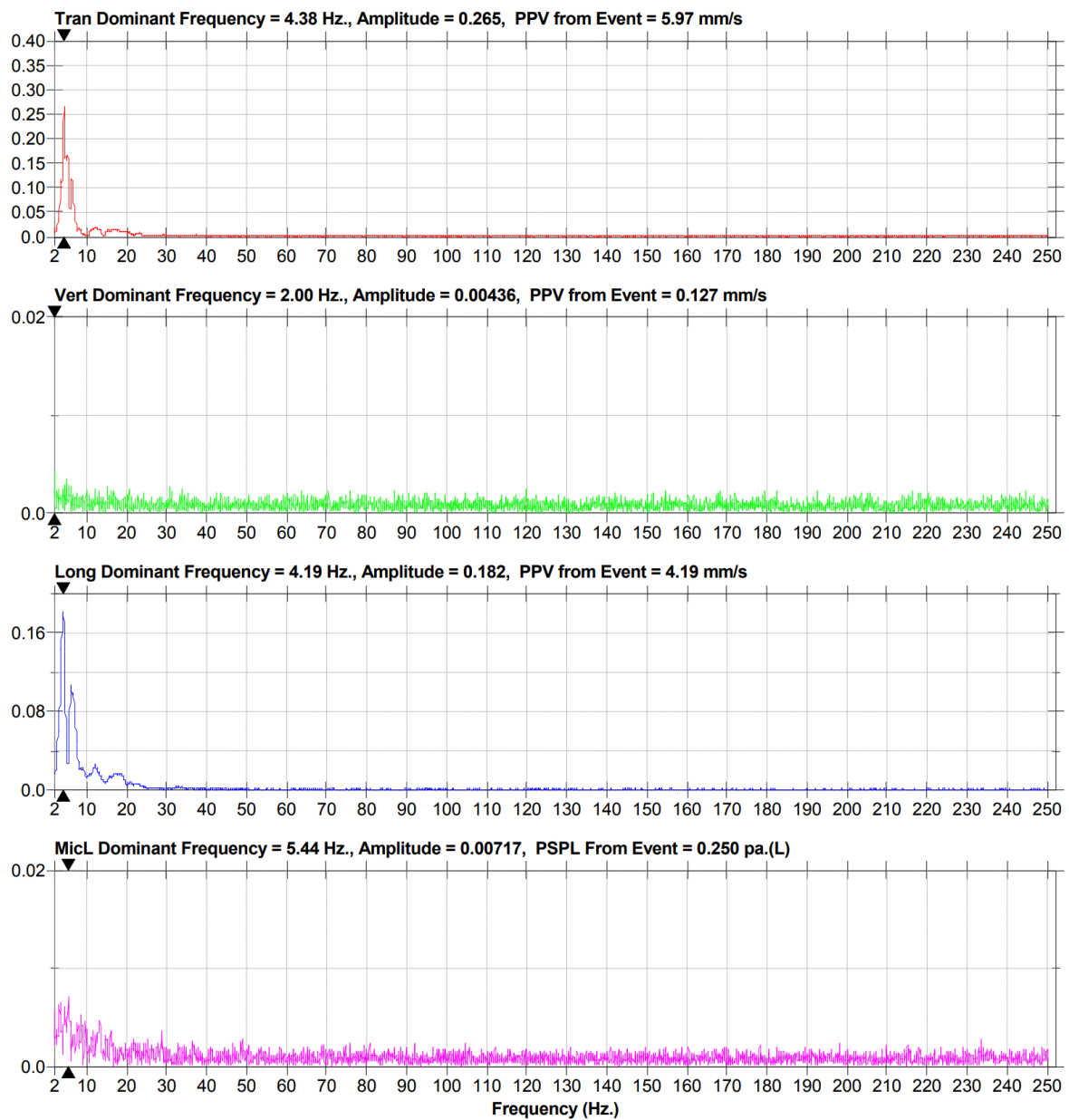
Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.043 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

	Tran	Vert	Long	
PPV	5.97	0.127	4.19	mm/s
PPV (Ponderated)	8.68	0.165	7.39	mm/s
ZC Freq	5.1	>100	4.5	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.285	-0.246	0.442	sec
Peak Acceleration	0.0265	0.0133	0.0398	g
Peak Displacement	0.166	0.0	0.135	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 5.98 mm/s at 0.287 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۲



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۲

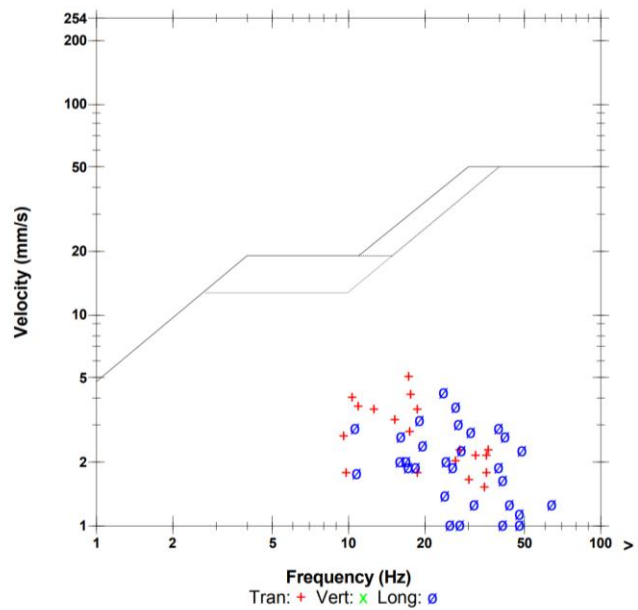
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

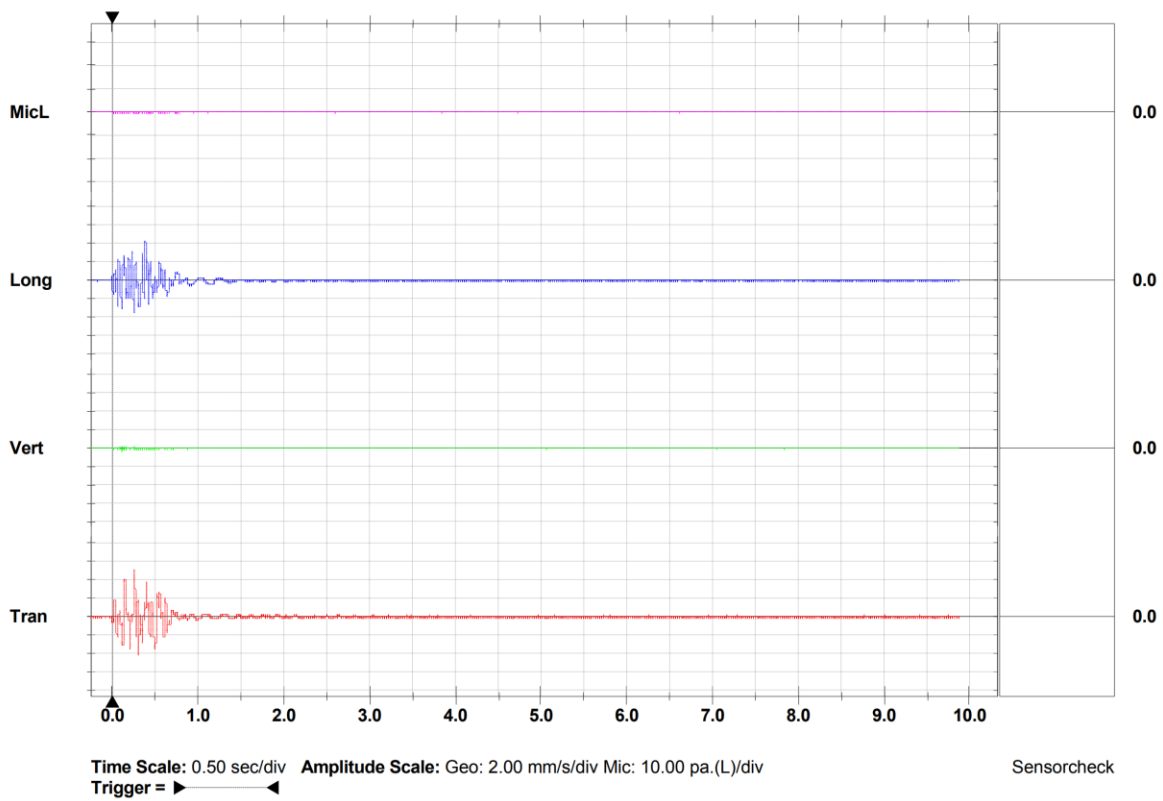
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.016 sec
 ZC Freq >400 Hz
 Channel Test Disabled

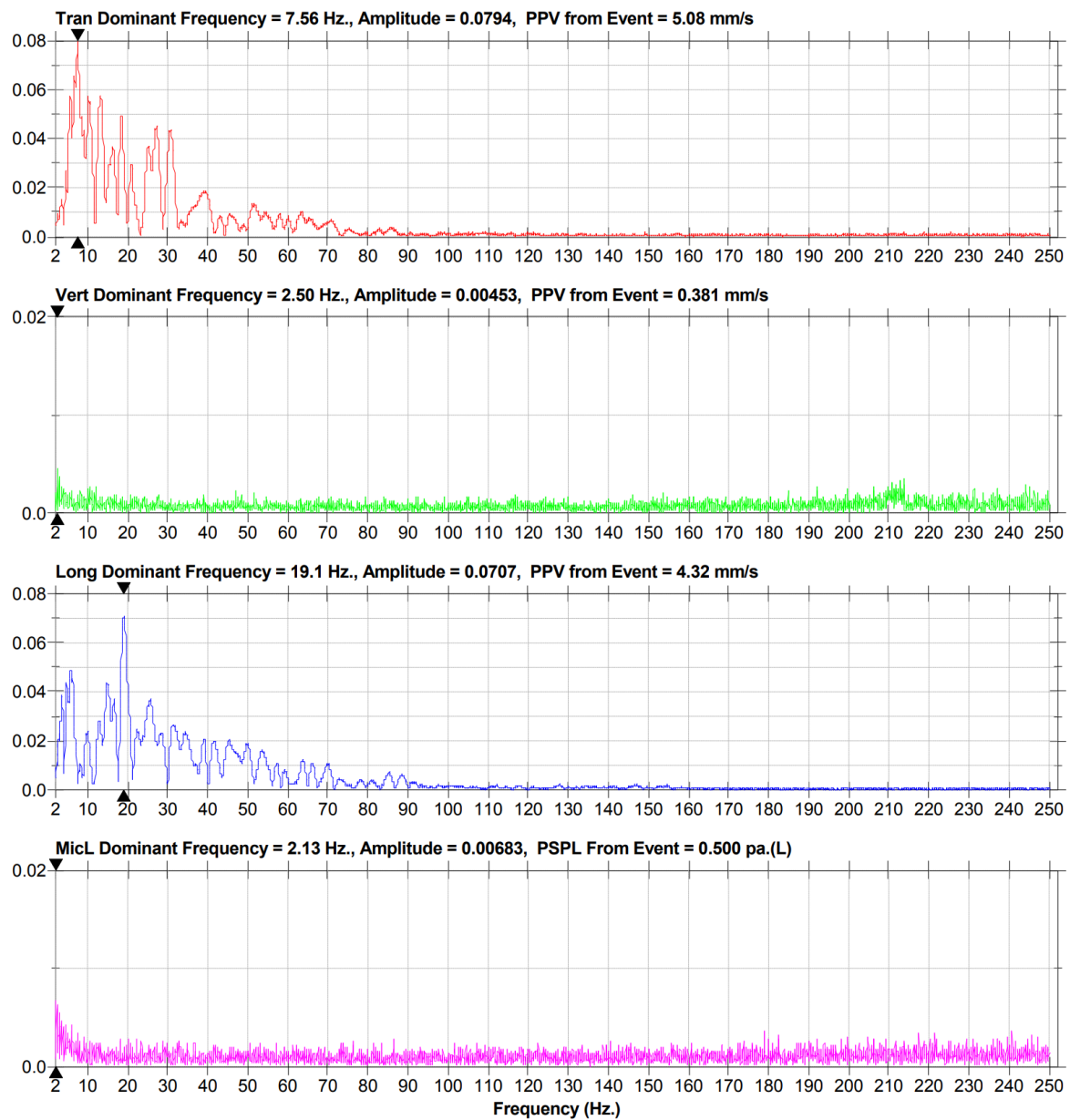
	Tran	Vert	Long	
PPV	5.08	0.381	4.32	mm/s
PPV (Ponderated)	5.02	0.128	4.22	mm/s
ZC Freq	17.4	256	23.8	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.259	0.109	0.384	sec
Peak Acceleration	0.106	0.0530	0.159	g
Peak Displacement	0.0493	0.00031	0.0448	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 5.08 mm/s at 0.259 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۳



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۳

Notes

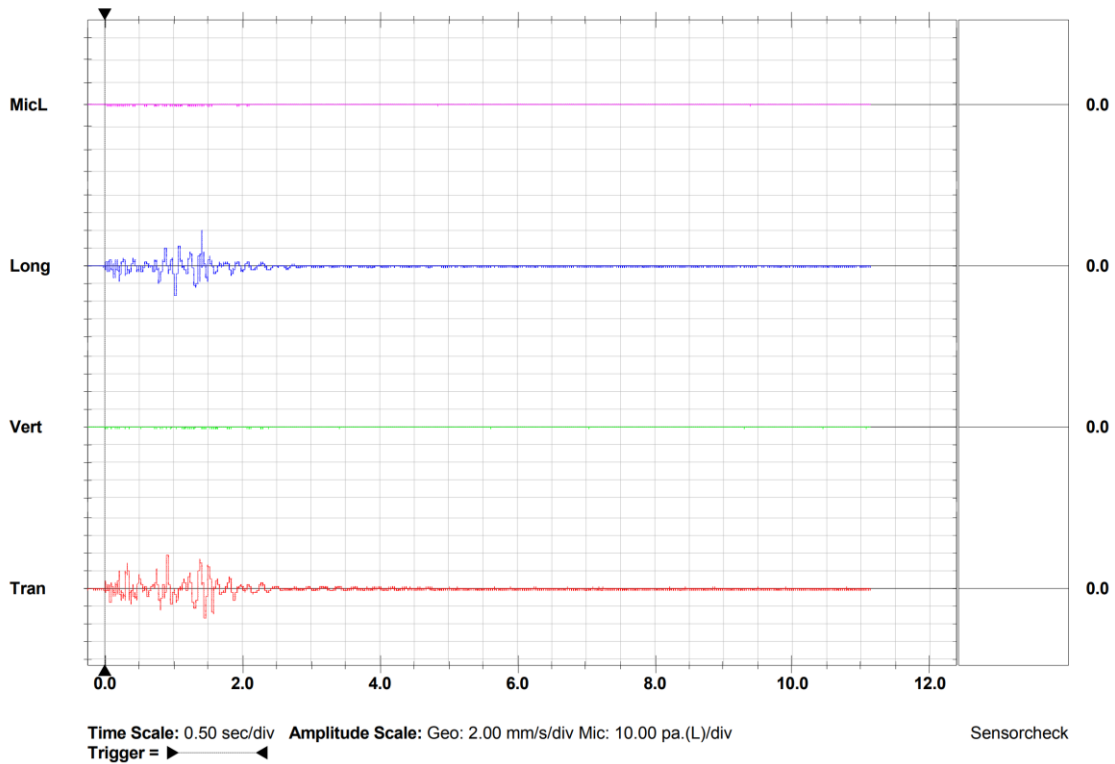
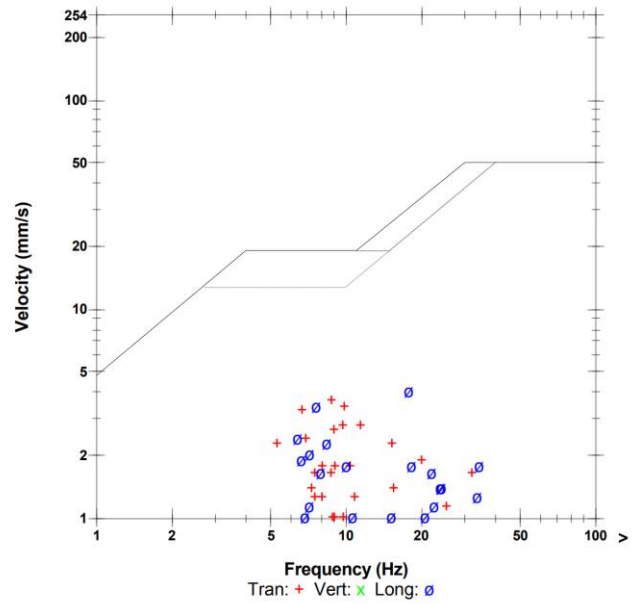
USBM RI8507 And OSMRE

Post Event Notes

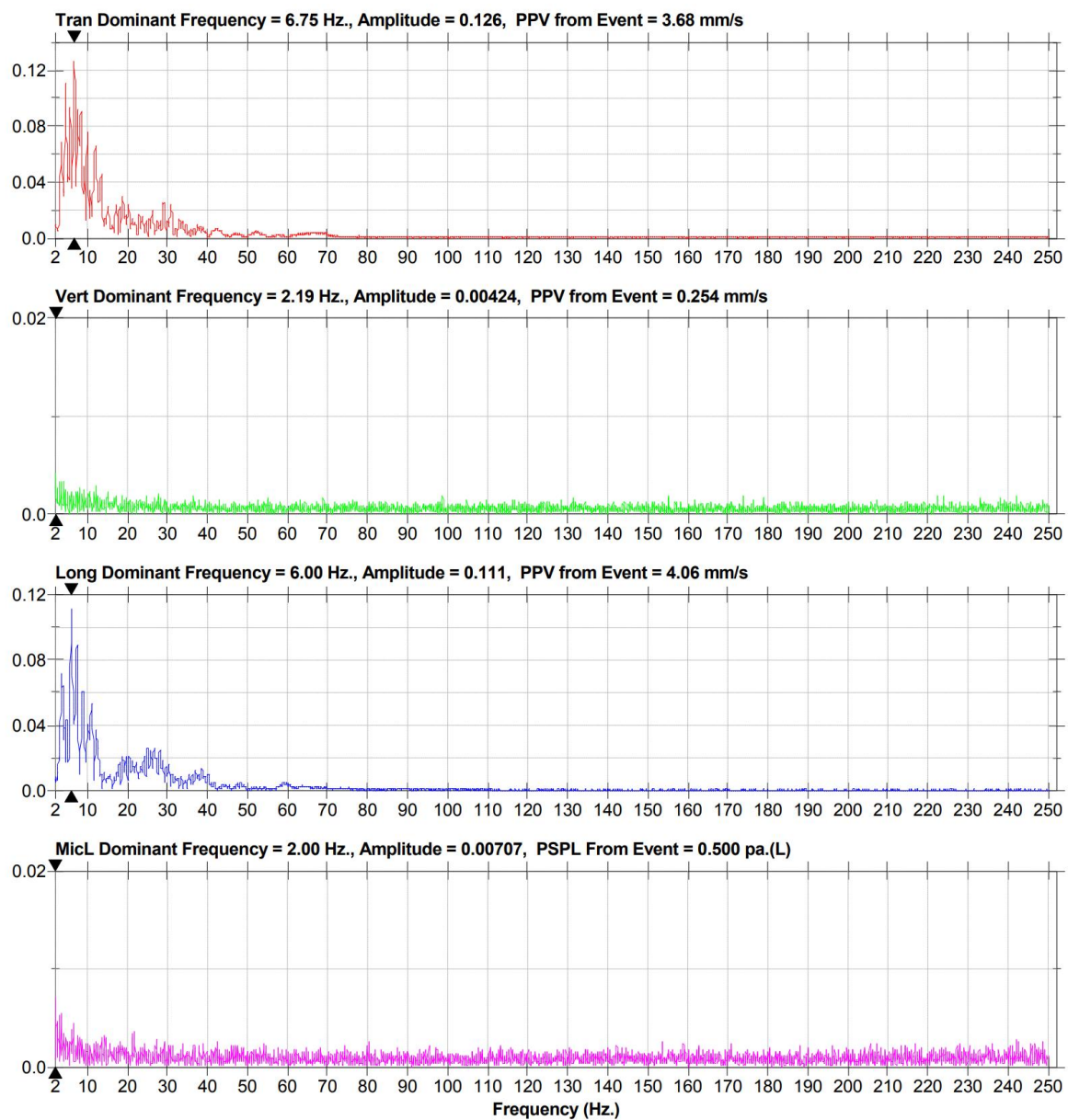
Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.051 sec
 ZC Freq >400 Hz
 Channel Test Disabled

	Tran	Vert	Long	
PPV	3.68	0.254	4.06	mm/s
PPV (Ponderated)	4.62	0.156	4.60	mm/s
ZC Freq	8.8	>400	17.8	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.911	0.011	1.405	sec
Peak Acceleration	0.106	0.106	0.106	g
Peak Displacement	0.0755	0.00009	0.0732	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 4.66 mm/s at 1.405 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۴



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۴

Notes

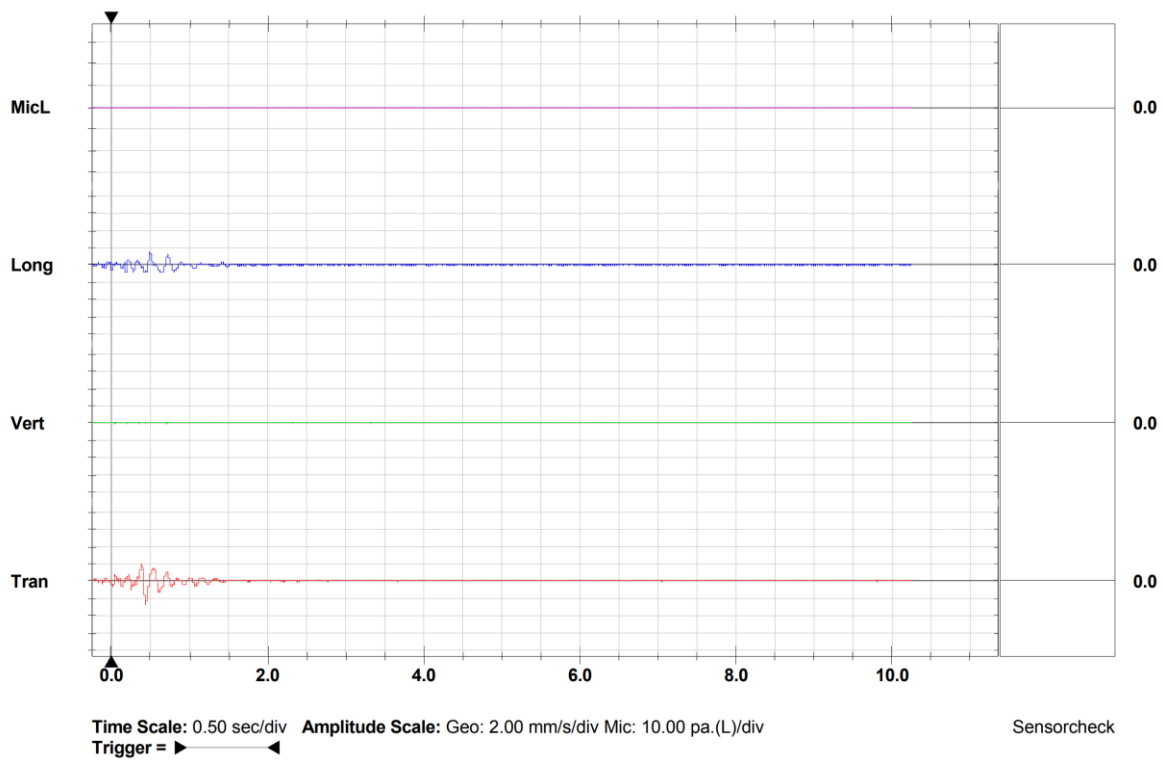
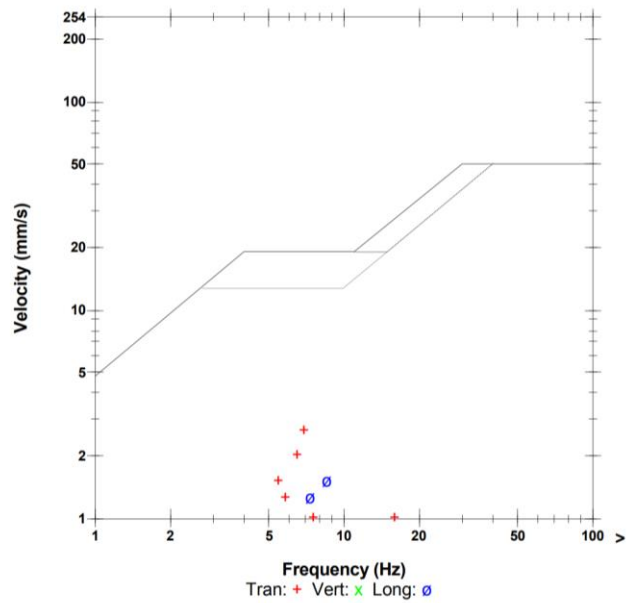
USBM RI8507 And OSMRE

Post Event Notes

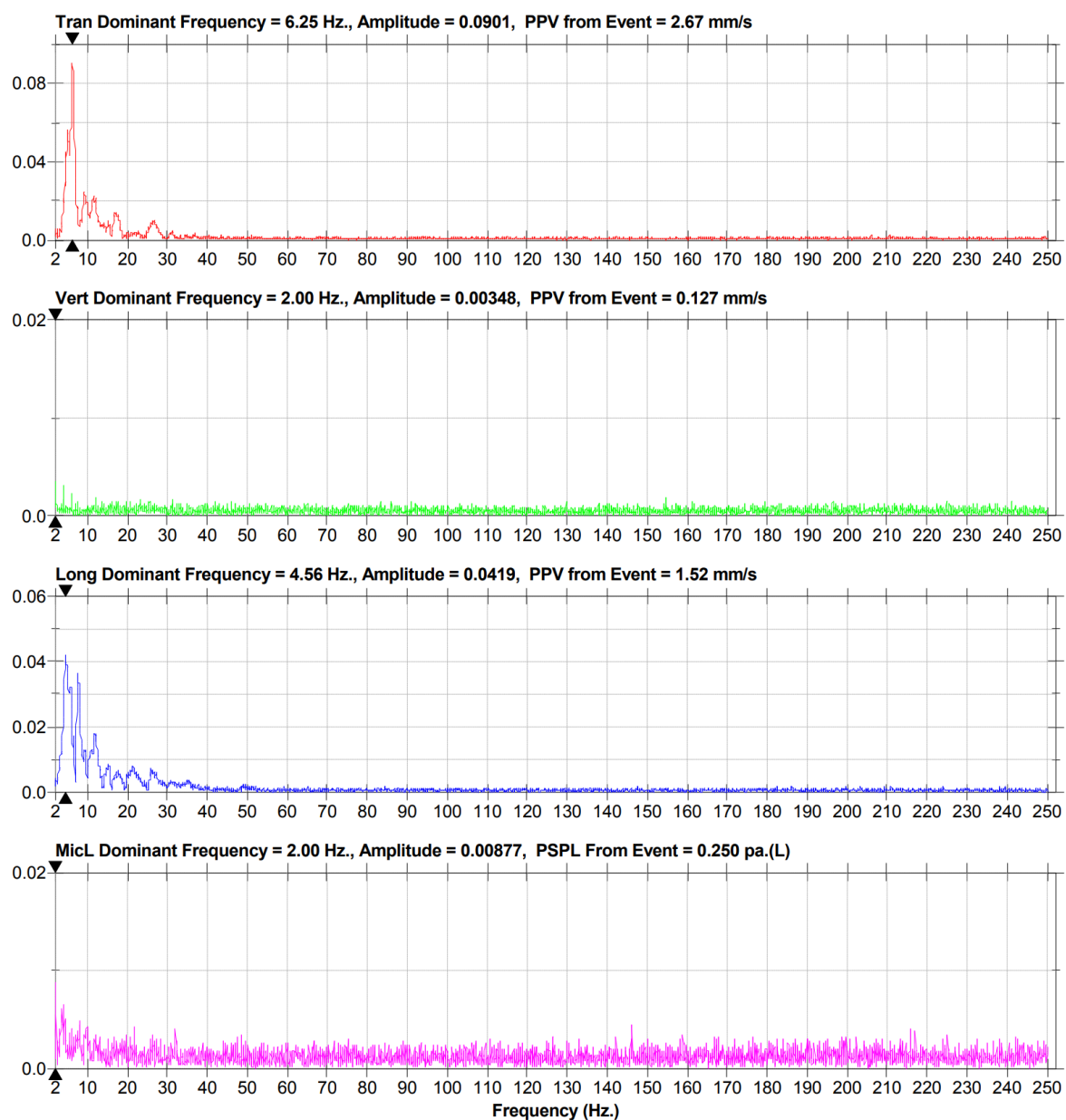
Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.216 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

	Tran	Vert	Long	
PPV	2.67	0.127	1.52	mm/s
PPV (Ponderated)	2.94	0.0984	2.08	mm/s
ZC Freq	6.9	>100	8.5	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.435	-0.241	0.491	sec
Peak Acceleration	0.0265	0.0133	0.0265	g
Peak Displacement	0.0544	0.0	0.0306	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 2.77 mm/s at 0.435 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۵



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۵

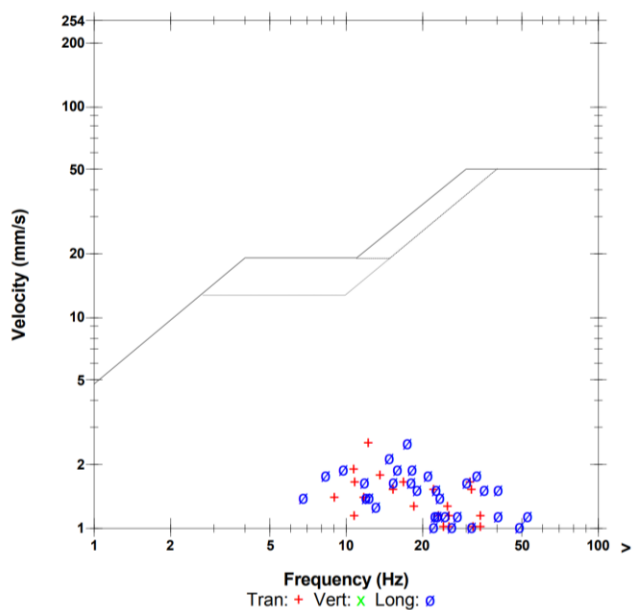
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

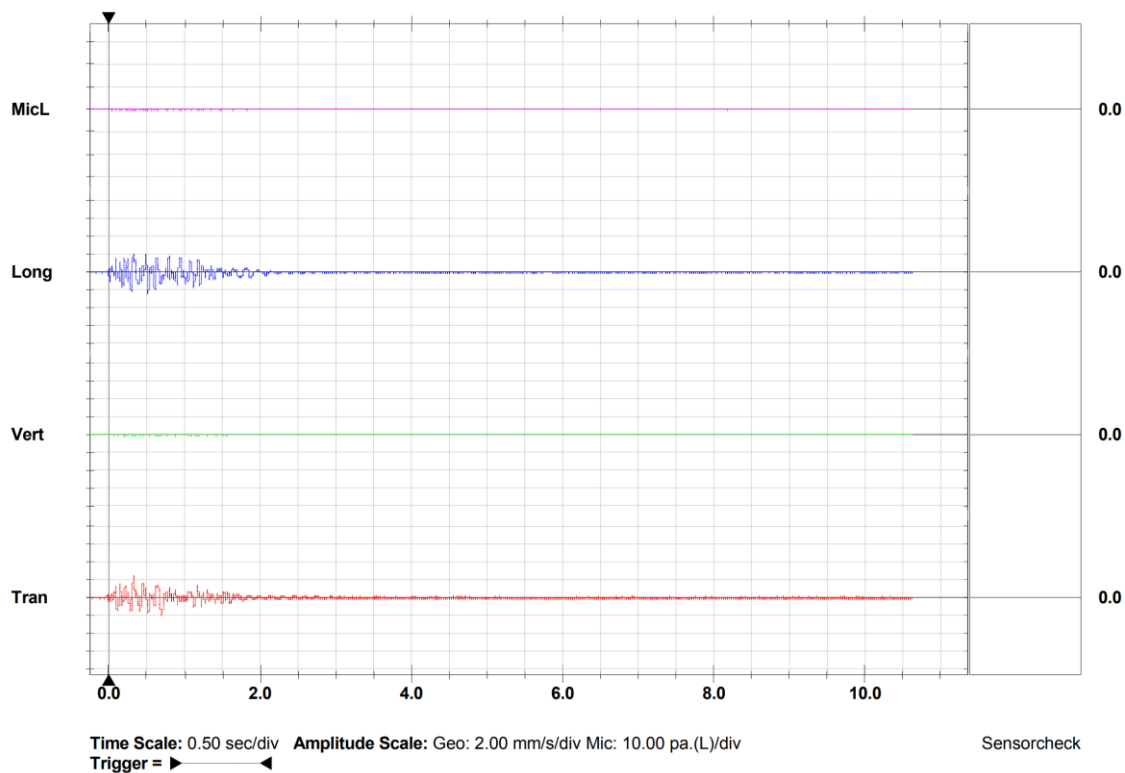
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.037 sec
 ZC Freq >400 Hz
 Channel Test Disabled

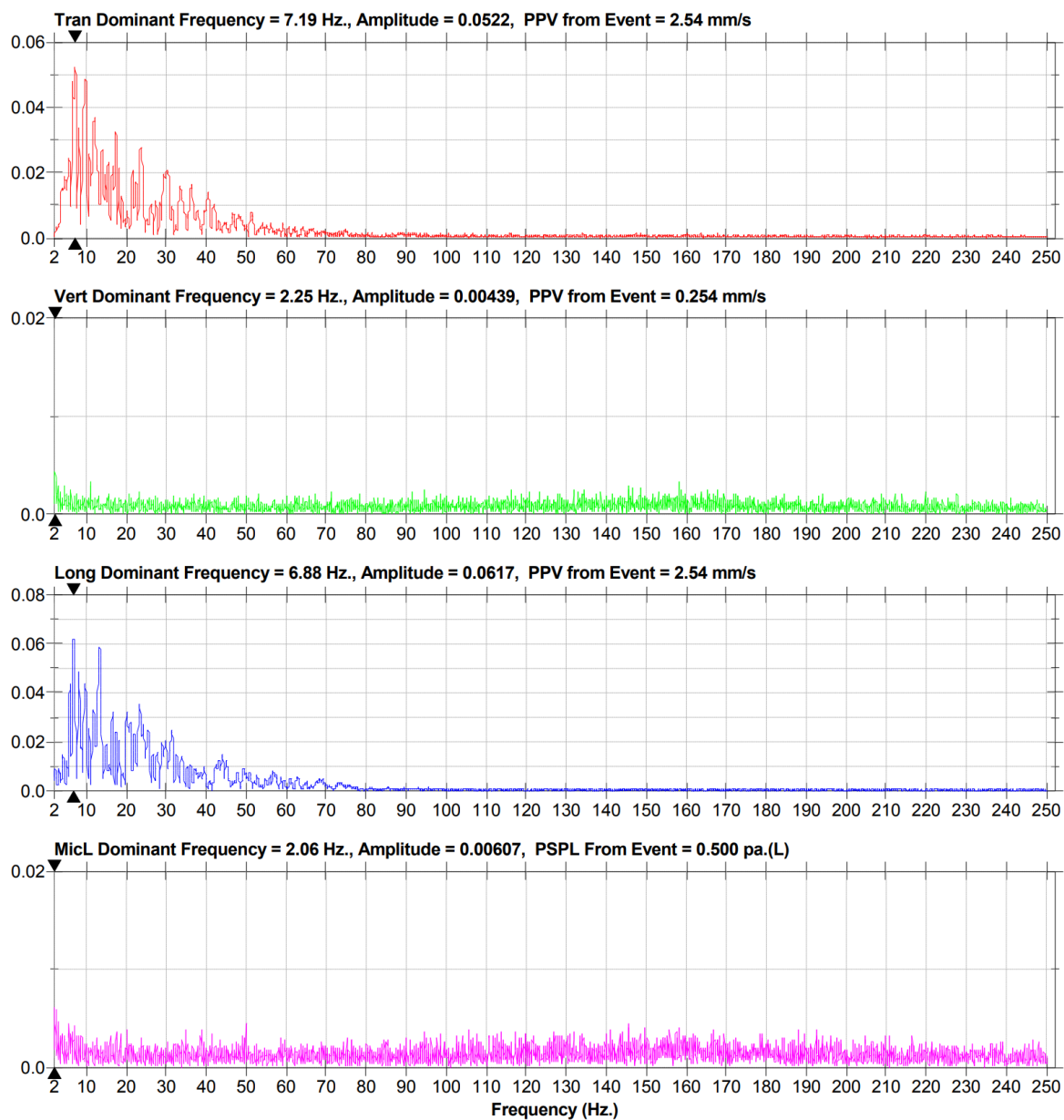
	Tran	Vert	Long	
PPV	2.54	0.254	2.54	mm/s
PPV (Ponderated)	2.68	0.121	2.18	mm/s
ZC Freq	12.3	>400	17.5	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.320	0.074	0.521	sec
Peak Acceleration	0.106	0.106	0.106	g
Peak Displacement	0.0285	0.00019	0.0303	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 3.10 mm/s at 0.320 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۶



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۶

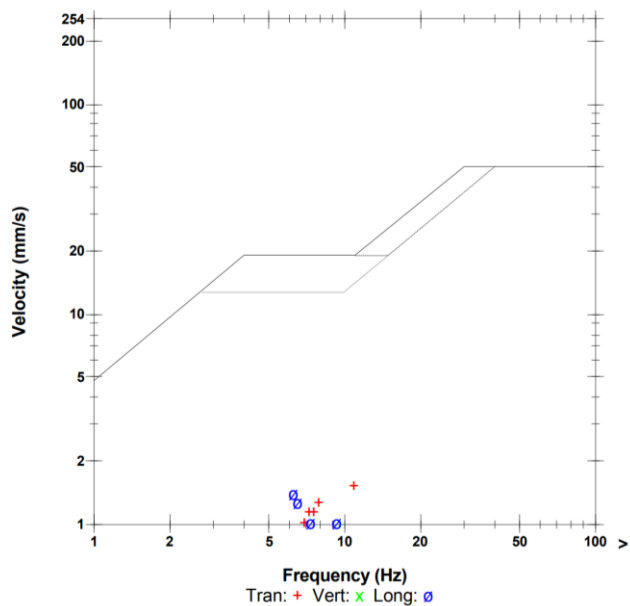
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

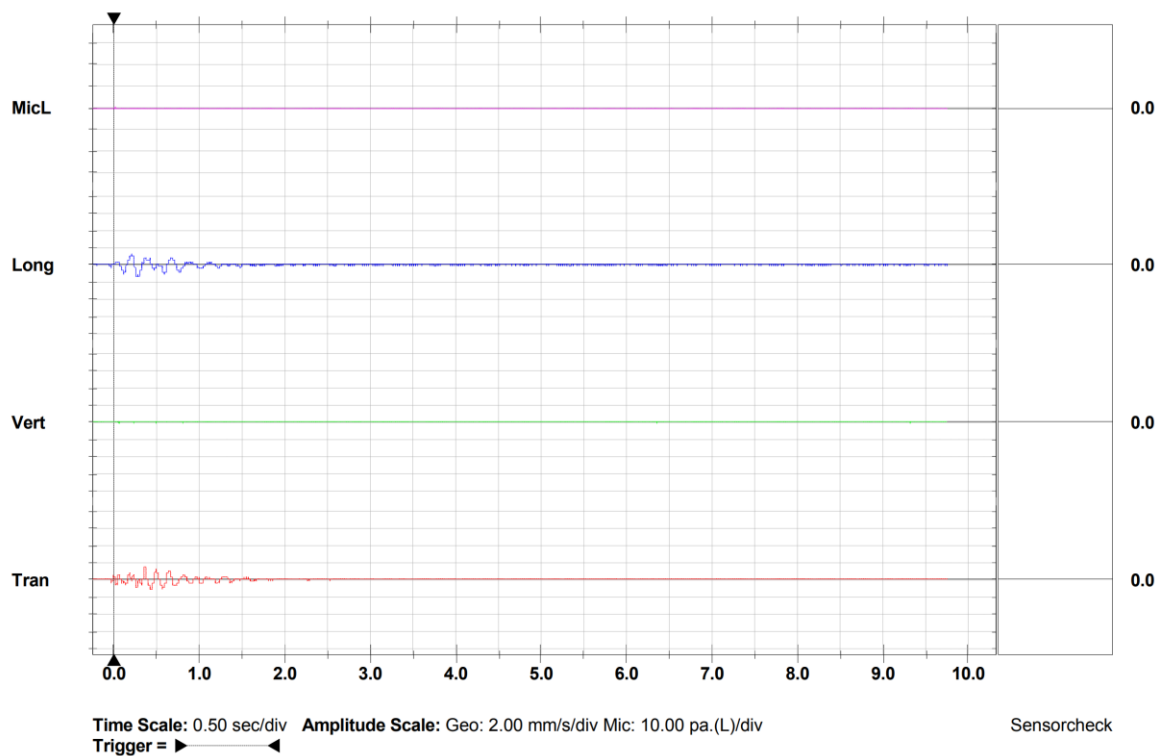
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.247 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

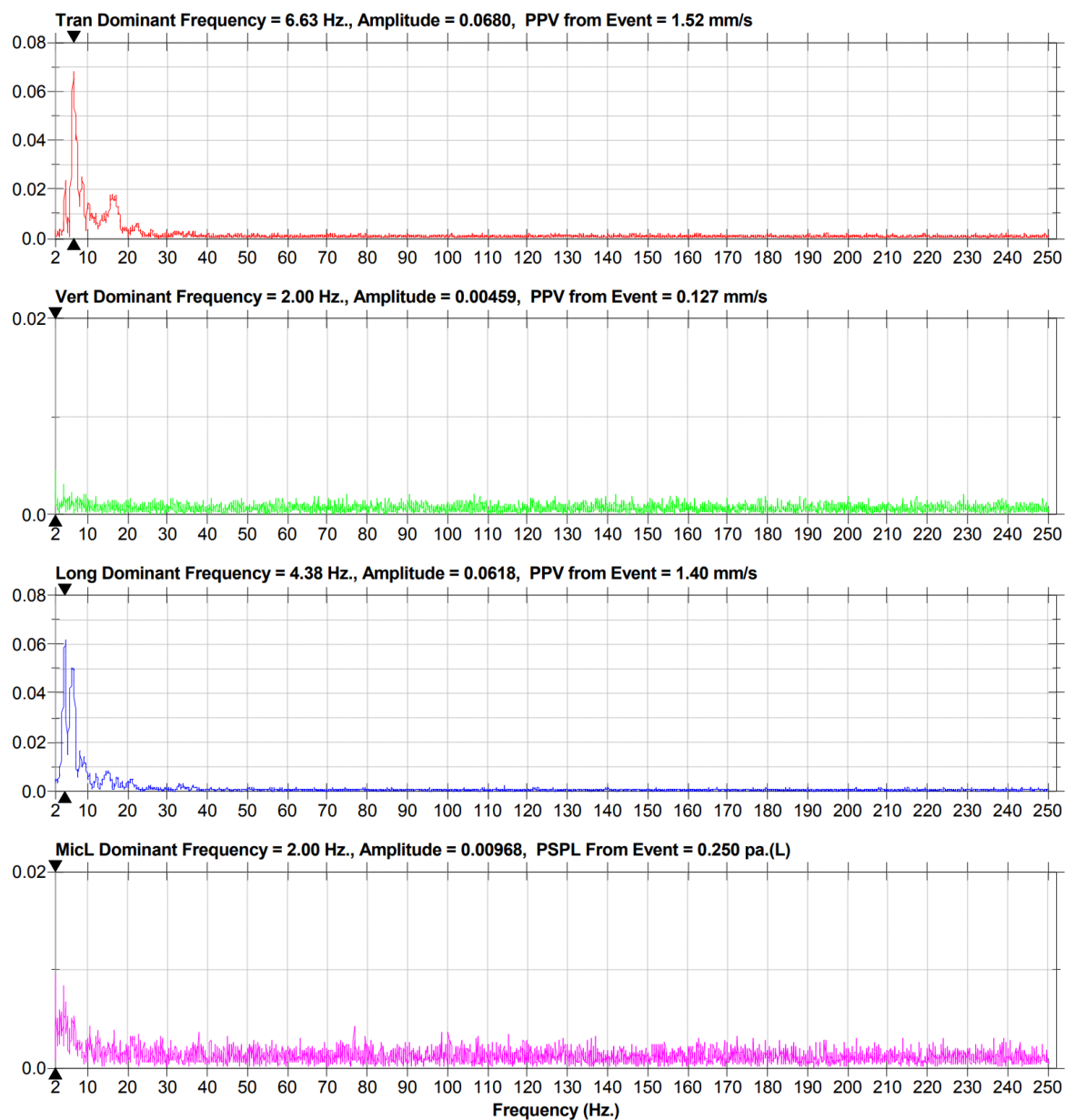
	Tran	Vert	Long	
PPV	1.52	0.127	1.40	mm/s
PPV (Ponderated)	1.53	0.110	1.82	mm/s
ZC Freq	11	>100	6.2	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.358	-0.249	0.265	sec
Peak Acceleration	0.0133	0.0133	0.0265	g
Peak Displacement	0.0259	0.0	0.0405	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 1.70 mm/s at 0.361 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۷



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۷

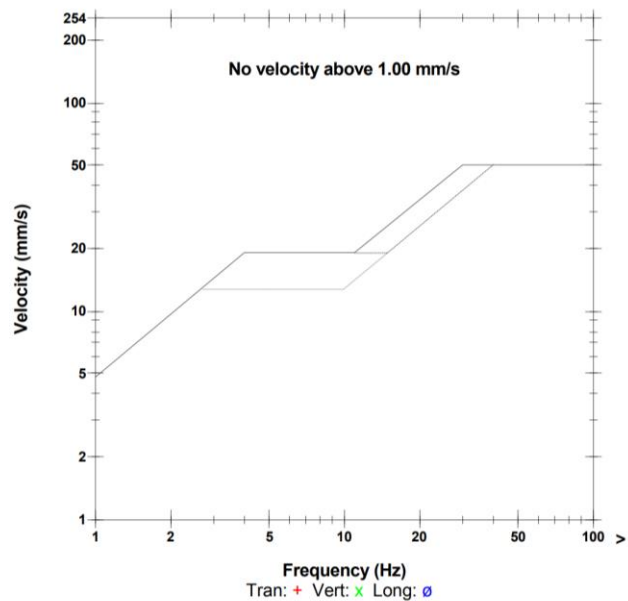
Notes

USBM RI8507 And OSMRE

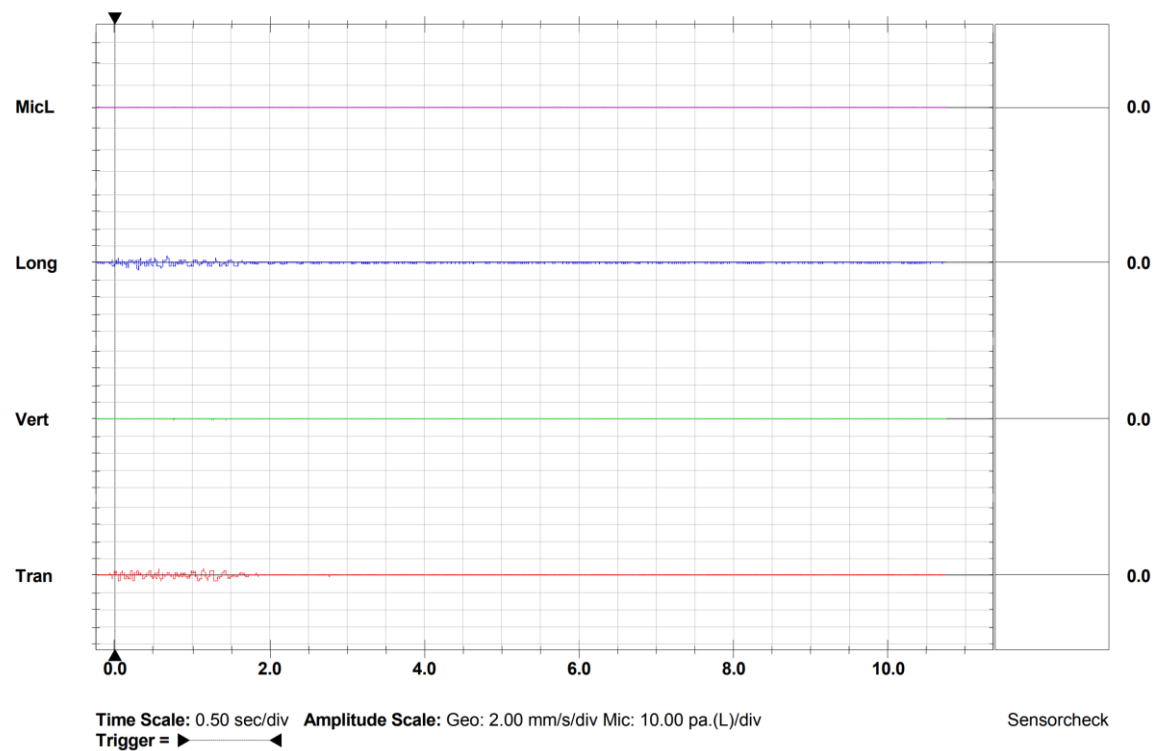
Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.245 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

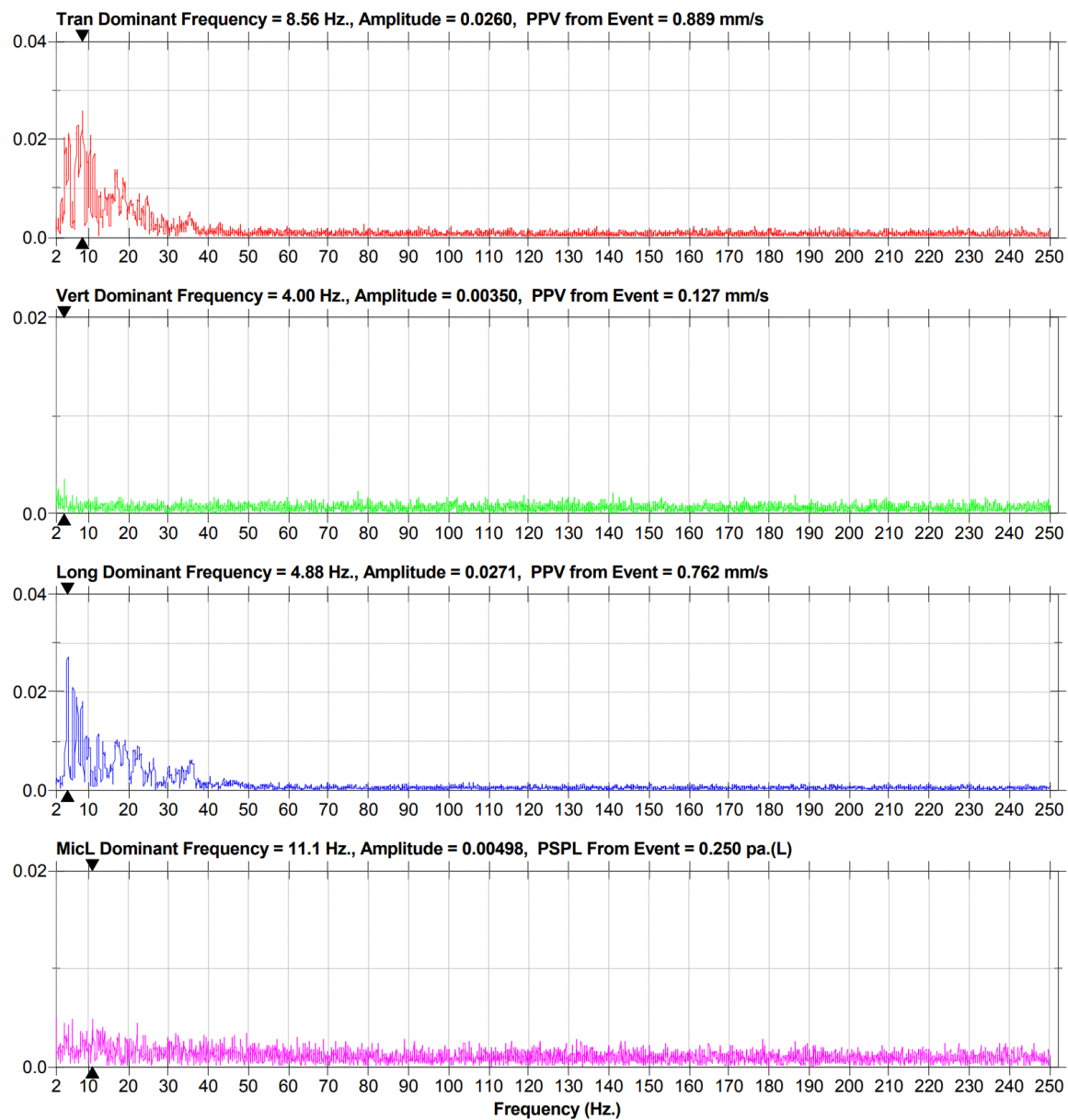
	Tran	Vert	Long	
PPV	0.889	0.127	0.762	mm/s
PPV (Ponderated)	0.937	0.109	0.825	mm/s
ZC Freq	13	>100	17	Hz
Time (Rel. to Trig)	1.138	-0.191	0.291	sec
Peak Acceleration	0.0133	0.0133	0.0265	g
Peak Displacement	0.0148	0.0	0.0116	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	



Peak Vector Sum 0.925 mm/s at 1.141 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۸



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۸

Notes

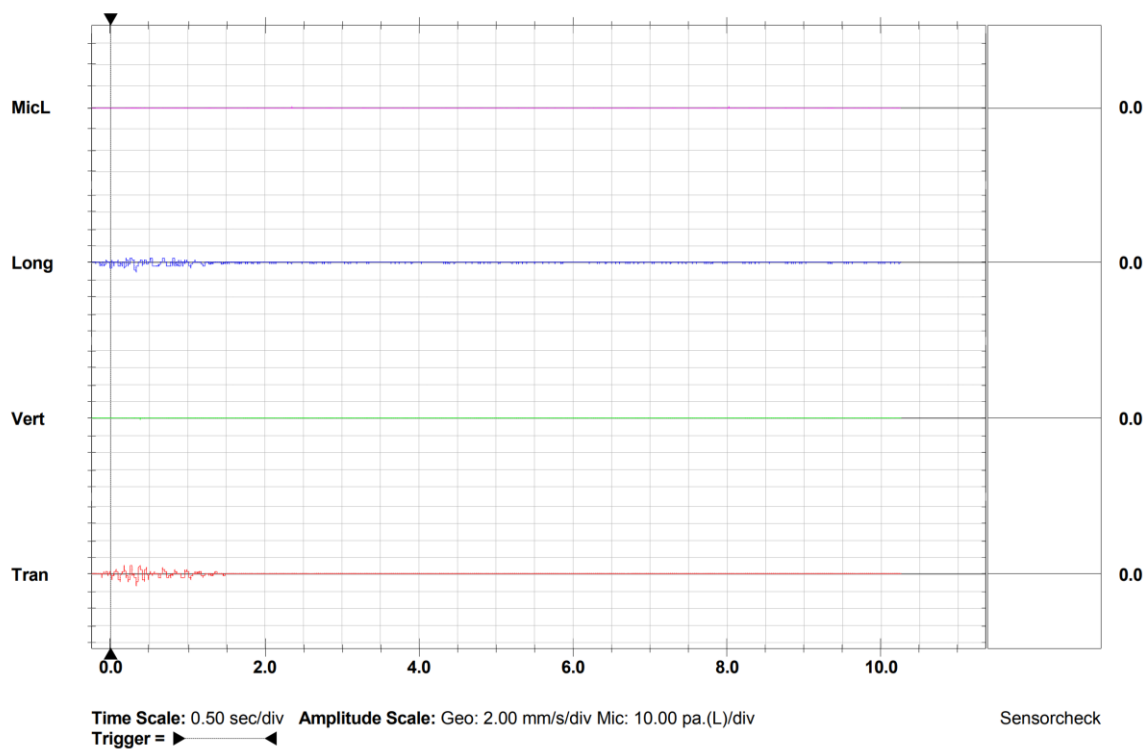
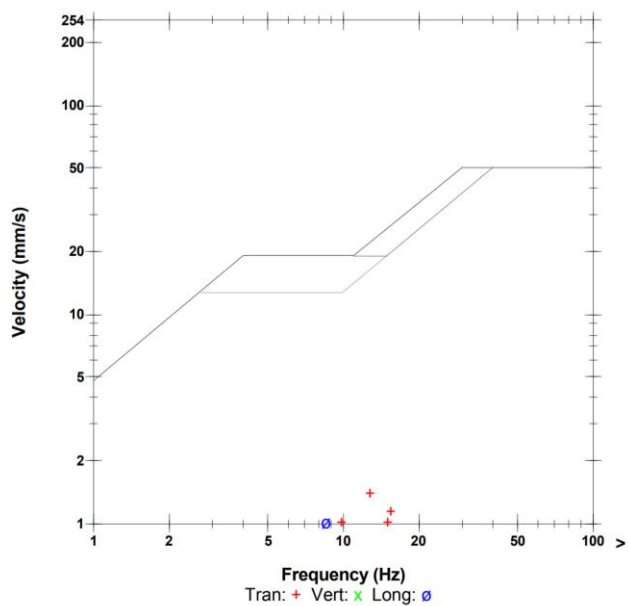
USBM RI8507 And OSMRE

Post Event Notes

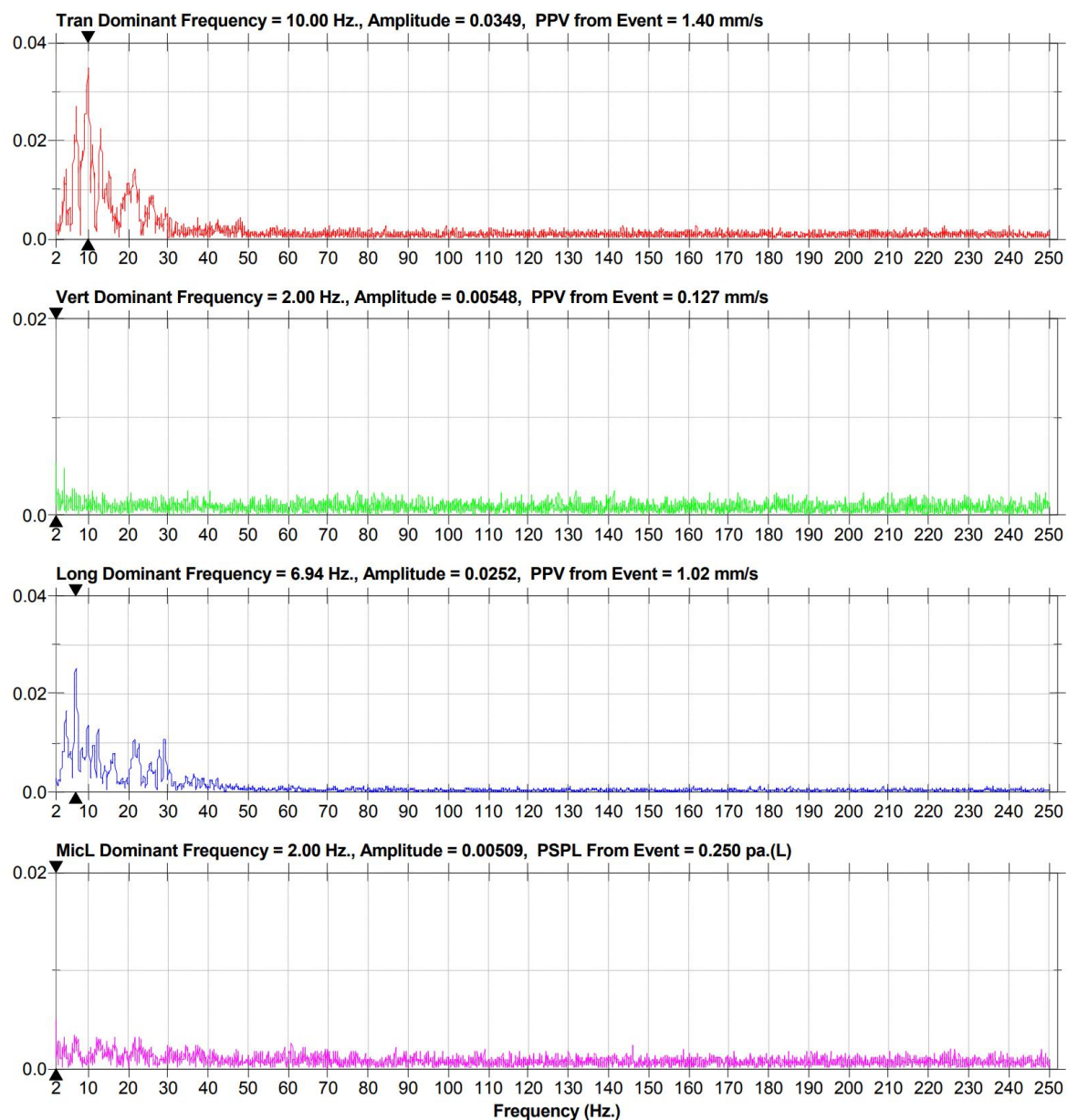
Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.173 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Disabled

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.40	0.127	1.02	mm/s
PPV (Ponderated)	1.52	0.151	1.16	mm/s
ZC Freq	13	>100	8.5	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.331	-0.248	0.319	sec
Peak Acceleration	0.0265	0.0133	0.0133	g
Peak Displacement	0.0164	0.0	0.0158	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Peak Vector Sum 1.53 mm/s at 0.331 sec



نتایج خروجی و نمودار سرعت زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۹



نمودار فرکانس زمان حاصل از دستگاه برای رویداد ۱۹

منابع

- استوار، ر. (۱۳۸۷). آتش کاری در معادن: انتشارات جهاد دانشگاهی. جلد دوم، چاپ اول.
- معدن گل گهر، با پارامترهای دینامیکی. کنگره بین المللی معدن.
- پازوکی، ا.، رشیدی خبیر، ر.، معمارنیایی، ب.، محمدیان، ح. (۱۳۹۰). بررسی ژئومکانیکی ریزش پله‌های شمال غربی معدن انگوران. دومین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران.
- تقوی، س. (۱۳۹۴). انتخاب روش مناسب پرکردن کارگاه استخراج بخش زیرزمینی انگوران. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فنی مهندسی تربیت مدرس.
- شرکت آتیه نگاران قاره. (۱۳۹۹)، نقشه ۱:۱۰۰۰ زمین شناسی معدن انگوران.
- شرکت معدن زمین. (۱۳۹۹). گزارش عملکرد ماهیانه معدن روباز سرب و روی انگوران.
- شرکت معدن زمین. (۱۳۹۹). گزارش معدن زیرزمینی سرب و روی انگوران.
- مرتضایی، ع. (۱۳۹۲). مطالعه موردی یک ساختمان بتن آرمه مقاوم در برابر زلزله تحت اثر بارگذاری انفجار. پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله. سال شانزدهم، شماره اول، ۲۳-۳۱.
- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. (۱۳۸۸). پیش نویس مبحث بیست و یکم مقررات ملی ساختمان. ویرایش ششم.
- وزارت صنعت، معدن و تجارت. (۱۳۸۷). راهنمایی ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن سطحی. انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن.
- Afeni, T. B., & Osasan, S. K. (2009). Assessment of noise and ground vibration induced during blasting operations in an open pit mine—a case study on Ewekoro limestone quarry, Nigeria. *Mining Science and Technology (China)*, 19(4), 420-424.
- Ak, H., Iphar, M., Yavuz, M., & Konuk, A. (2009). Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4), 669-676.
- Badal K, K. (2010). Blast vibration studies in surface mines (Doctoral dissertation).
- Deb, D., & Jha, A. K. (2010). Estimation of blast induced peak particle velocity at underground mine structures originating from neighbouring surface mine. *Mining Technology*, 119(1), 14-21.
- Dey, K., & Sen, P. (2003). Concept of blastability-an update.

- Draganić, H., & Sigmund, V. (2012). Blast loading on structures. *Tehnički vjesnik*, 19(3), 643-652.
- Duan, B., Xia, H., & Yang, X. (2018). Impacts of bench blasting vibration on the stability of the surrounding rock masses of roadways. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 605-622.
- Duvall, W. I., & Petkof, B. (1959). Spherical propagation of explosion-generated strain pulses in rock (No. 5481-5485). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Feng, X., Zhang, Q., & Ali, M. (2019). Explosion-induced stress wave propagation in interacting fault system: Numerical modeling and implications for Chaoyang Coal Mine. *Shock and Vibration*.
- Fourie, A. B., & Green, R. W. (1993). Damage to underground coal mines caused by surface blasting. *International Journal of Surface Mining and Reclamation*, 7(1), 11-16.
- Hayatdavoudi, A., & Brown, R. C. (1979). Surface coal mine blasting effects on underground coal mine stability. University of Alabama, College of Engineering, Bureau of Engineering Research.
- Hinman, E. E., Rojahn, C., Smilowitz, R., Campi, D., Myers, R. J., Sauer, N., & Mork, P. A. (2003). Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks: providing protection to people and buildings.
- Instantel, Inc. (2013). Minimate Plus™ Operator Manual.
- Jensen, D. E., Munson, R. D., Oriard, L. L., Rietman, J. D., & Wright, R. S. (1979). Underground Vibrations from Surface Blasting at Jenny Mine, Kentucky. Final Report, (408741).
- Jha, A. K., & Deb, D. (2015). Estimation of damage in an underground mine due to effect of surface blasting. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 4, 203-212.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., Carcedo, F. J. A., & Deramiro, Y. V. (1995). Drilling and blasting of rocks.
- Kahrman, A. (2002). Analysis of ground vibrations caused by bench blasting at can open-pit lignite mine in Turkey. *Environmental Geology*, 41(6), 653-661.
- Kahrman, A. (2004). Analysis of parameters of ground vibration produced from bench blasting at a limestone quarry. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11), 887-892.
- Kuhnaw, F. B. (2013). Vibration Effects on Underground Concrete Structures (Doctoral dissertation, Department of Mining Engineering, University of Utah).
- Kumar, R., Choudhury, D., & Bhargava, K. (2016). Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(3), 341-349.

- Lewandowski, T. (2014). Blast Impact Assessment of The Mount Owen Countinued Operations Project. Report No. UM-1404081014
- Liu, Z., Jiang, N., Sun, J., Xia, Y., & Lyu, G. (2020). Influence of tunnel blasting construction on adjacent highway tunnel: A case study in Wuhan, China. *International Journal of Protective Structures*, 11(3), 283-303.
- Lu, S., Zhou, C., Zhang, Z., & Jiang, N. (2019). Particle velocity response of surrounding rock of a circular tunnel subjected to cylindrical P-waves. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 393-400.
- Mingyang, W. A. N. G., Ting, T. A. N. G., & Zeping, Z. H. O. U. (2005). Effects of geological structural faults on blasting seismic wave propagation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(4).
- Morris, G. (1950). Some considerations of the mechanism of the generation of seismic waves by explosives. *Geophysics*, 15(1), 61-69.
- Mussa, M. H., Mutalib, A. A., Hamid, R., & Raman, S. N. (2018). Blast damage assessment of symmetrical box-shaped underground tunnel according to peak particle velocity (PPV) and single degree of freedom (SDOF) criteria. *Symmetry*, 10(5), 158.
- Nicholls, H. R. (1971). *Blasting vibrations and their effects on structures* (No. 656-660). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Phang, M. K., Simpson, T. A., & Brown, R. C. (1983). Investigation of blast-induced underground vibrations from surface mining. University of Alabama.
- Rupert, G. B., & Clark, G. B. (1977). Criteria for the proximity of surface blasting to underground coal mines. In *Proc. 18th Symposium on Rock Mechanics*.
- Sawmliana, C., Singh, R. K., Pal Roy, P., & Basu, P. (2009). Impact of deep-hole opencast blasting on the stability of water dams of a close-by underground coal mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 109(7), 401-410.
- Singh, P. K. (2002). Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(8), 959-973.
- Singh, P. K., Roy, M. P., Paswan, R. K., Dubey, R. K., & Drebenstedt, C. (2015). Blast vibration effects in an underground mine caused by open-pit mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 79-88.
- Siskind, D. E. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting (Vol. 8507). US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Siskind, D. E., Stachura, V. J., & Nutting, M. J. (1987). Low-frequency vibrations produced by surface mine blasting over abandoned underground mines (No. 9078). US Department of the Interior, Bureau of Mines.

- Trajkovski, J., Kunc, R., Perenda, J., & Prebil, I. (2014). Minimum mesh design criteria for blast wave development and structural response-MMALE method. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11, 1999-2017.
- VIRGINIA, W. (2007). Peak Particle Velocities. West Virginia Department of environmental Protection, Office of Explosives and Blasting.
- Wang, G., Cao, A., Wang, X., Yu, R., Huang, X., & Lin, J. (2021). Numerical simulation of the dynamic responses and damage of underground cavern under multiple explosion sources. *Engineering Failure Analysis*, 120, 105085.
- Xia, X., Li, H. B., Li, J. C., Liu, B., & Yu, C. (2013). A case study on rock damage prediction and control method for underground tunnels subjected to adjacent excavation blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 1-7.
- Zhang, W., Ma, N., Ren, J., & Li, C. (2021). Peak particle velocity of vibration events in underground coal mine and their caused stress increment. *Measurement*, 169, 108520.

Abstract

Today, blasting operations are used to develop underground spaces and extract minerals in mines. Improper design of blasting operations in mines has always led to hazards such as fly rock, ground vibrations, etc. In mines that operate simultaneously in both surface and underground mines, severe ground vibrations resulting from explosions increase the likelihood of instability in adjacent underground spaces. Any instability in the underground space can lead to human and financial damage. Therefore, calculating the maximum allowable peak particle velocity in an explosion can help to increase the safety of underground structures. In order to investigate the effect of blast vibrations in an open pit mine on the underground structures, ANGOURAN lead and zinc mine has been selected as a case study. In this research, an attempt has been made to provide experimental relationships to calculate the peak particle velocity and determine the allowable value for this parameter by seismic surveys inside the main ramp of ANGOURAN mine during surface blasting operations, and also to modify the blast pattern if necessary. . A total of 19 seismic recordings of surface blasting events have been recorded. Among these, the maximum PPV recorded is 9.67 mm / s. According to the observations, no damage was visible in the underground space of this mine during the surface blasting operations, which shows the correctness of the open fire pattern of this mine. Finally, experimental equations for calculating the PPV using univariate regression with a scaled distance parameter are presented. These relationships are categorized based on the impact of a fault on the eastern and western regions. The correlation coefficients for the eastern and western regions are 0.9544 and 0.7357, respectively. By comparing the obtained relations with the previously presented relations, it is concluded that the mentioned relations had higher correlation coefficients than the previous relations. By examining the fall occurred in this mine and using the provided relationships, a threshold for small local falls has been presented.

Keywords: Blasting, Ground Vibration, PPV, ANGOURAN lead and zinc mine



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

**Effect Of Blasting Vibrations From Open Pit Mine Bench on
Underground Structures (case study: Angouran Mine)**

By:

Arshia Yekrang

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Mohammad Ataei

September 2021