

جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

راهنمای ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن سطحی

نشریه شماره ۶۱۶

وزارت صنعت، معدن و تجارت

معاونت امور معادن و صنایع معدنی

دفتر نظارت و بهره‌برداری

<http://www.mimt.gov.ir>

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

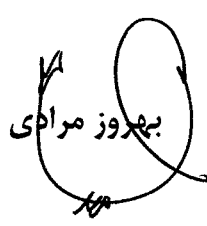
Nezamfanni.ir



بسمه تعالی

ریاست جمهوری

معاون برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور

شماره:	۹۱/۱۰۸۵۴۴	بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران
تاریخ:	۱۳۹۱/۱۲/۱۹	
موضوع: راهنمای ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن سطحی		
<p>به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی - مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویبنامه شماره ۴۲۳۳۹/ت/۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۶۱۶ امور نظام فنی، با عنوان «راهنمای ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن سطحی» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.</p> <p>رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۲/۵/۱ اجباری است.</p> <p style="text-align: center;"> بهروز مرادی</p>		

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلط‌های مفهومی، فنی، ابهام، ابهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی

مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

- ۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.
 - ۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.
 - ۳- در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.
 - ۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.
- کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت. پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی‌علیشاه، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱
Email: info@nezamfanni.ir web: <http://nezamfanni.ir>

بسمه تعالی

پیشگفتار

نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت ۳۳۴۹۷ هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات وزیران) به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تاکید جدی قرار داده است و این امور به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرحهای توسعه‌ای کشور را به عهده دارد. استفاده از انفجار برای استخراج مواد معدنی امری اجتناب‌ناپذیر است. میزان تولید و همچنین هزینه نسبتاً پایین این روش در مقایسه با روش‌های دیگر کندن سنگ، اجتناب‌ناپذیر بودن آن را توجیه می‌کند. انرژی آزاد شده توسط ماده منفجره علاوه بر انجام کار مفیدی که صرف خردایش و جابه‌جایی سنگ می‌شود اثرات جنبی غیرمفیدی نیز به همراه دارد که شرایط نامطلوبی را ایجاد می‌کند. از جمله این اثرات می‌توان به پدیده‌های لرزش زمین، لرزش هوا و پرتاب سنگ اشاره کرد. این پدیده‌ها علاوه بر تاثیر بر فرآیند معدنکاری، محیط وسیعی در اطراف منطقه انفجار را تحت تاثیر قرار می‌دهند که در صورت عدم کنترل، می‌تواند خسارات زیادی ایجاد کنند. به این ترتیب، شناخت چگونگی ایجاد، رفتار، نحوه تاثیر، مقادیر مجاز و روش‌های کنترل پدیده‌های ناشی از انفجار می‌تواند در طراحی‌های مهندسی انفجار برای کنترل میزان تاثیر آنها مفید واقع شود.

بر این اساس، نشریه «**راهنمای ارزیابی و کنترل پیامدهای ناشی از انفجار در معادن سطحی**» که مشتمل بر اطلاعات مفیدی در زمینه شناخت بهتر این پدیده‌ها و نحوه رفتار، عملکرد و روش‌های کنترل آنها است، تهیه و ارائه شده است. امید است با مطالعه و اجرای این راهنما، گامی موثر در جهت کاهش اثرات منفی این پدیده‌ها برداشته شود.

با همه‌ی تلاش انجام شده قطعاً هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که **إن شاء الله** کاربرد عملی و در سطح وسیع این نشریه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آنها را فراهم خواهد نمود.

در پایان، از تلاش و جدیت جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان امور نظام فنی همچنین جناب آقای مهندس وجیه‌الله جعفری مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی بخش معدن کشور در وزارت صنایع و معادن، کارشناسان دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

معاون نظارت راهبردی

اسفند ۱۳۹۱

مجری طرح

آقای وجیه... جعفری معاون امور معادن و صنایع معدنی - وزارت صنایع و معادن

تهیه پیش نویس اصلی

آقای دکتر مهدی پورقاسمی

اعضای شورای عالی به ترتیب حروف الفبا

خانم فرزانه آقارمضانعلی	معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
آقای بهروز برنا	سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
آقای وجیه... جعفری	وزارت صنایع و معادن	کارشناس مهندسی معدن
آقای عبدالعلی حقیقی	معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	کارشناس ارشد زمین شناسی
آقای عبدالرسول زارعی	وزارت صنایع و معادن	کارشناس ارشد زمین شناسی
آقای ناصر عابدیان	سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای هرمز ناصرینیا	سازمان نظام مهندسی معدن	کارشناس ارشد مهندسی معدن

اعضای کارگروه استخراج به ترتیب حروف الفبا

آقای محمد فاروق حسینی	دانشگاه تهران	دکترای مهندسی معدن، مکانیک سنگ
آقای مصطفی شریفزاده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی مکانیک سنگ
آقای کورش شهریار	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی معدن
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای علی مرتضوی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی انفجار، مکانیک سنگ

اعضای کارگروه تنظیم و تدوین به ترتیب حروف الفبا

آقای مهدی ایران نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
آقای عبدالرسول زارعی	وزارت صنایع و معادن	کارشناس ارشد زمین شناسی
آقای مصطفی شریفزاده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی مکانیک سنگ
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای بهزاد مهرابی	دانشگاه تربیت معلم	دکترای زمین شناسی اقتصادی

اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه

خانم فرزانه آقارمضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی
آقای علیرضا فلسفی	کارشناس عمران امور نظام فنی
آقای علیرضا غیاثوند	رئیس گروه ضوابط و معیارهای معاونت امور معادن و صنایع معدنی

فهرست

صفحه

عنوان

فصل اول- معرفی پیامدهای انفجار و تئوری حاکم بر آن‌ها

۳	۱-۱- آشنایی
۳	۲-۱- لرزش زمین
۳	۱-۲-۱- امواج لرزه‌ای و تئوری انتشار امواج
۴	۲-۲-۱- انواع امواج لرزه‌ای
۶	۳-۲-۱- ویژگی‌های اصلی یک موج لرزه
۹	۴-۲-۱- امواج لرزه‌ای حاصل از عملیات انفجار معدنی
۹	۵-۲-۱- کاهش دامنه و انرژی امواج لرزه‌ای
۱۰	۳-۱- لرزش هوا
۱۱	۴-۱- پرتاب سنگ

فصل دوم- عوامل موثر در پیامدهای نامطلوب

۱۵	۱-۲- آشنایی
۱۵	۲-۲- عوامل موثر بر لرزش زمین
۱۵	۱-۲-۲- میزان خرج در هر تاخیر
۱۵	۲-۲-۲- فاصله از محل انفجار
۱۶	۳-۲-۲- خرج ویژه
۱۶	۴-۲-۲- نوع مواد منفجره
۱۷	۵-۲-۲- فاصله تاخیر
۱۸	۶-۲-۲- طول خرج
۱۸	۷-۲-۲- جهت شروع انفجار
۱۸	۸-۲-۲- شرایط زمین‌شناسی و مشخصات مکانیکی توده سنگ
۱۹	۹-۲-۲- ویژگی‌های هندسی انفجار
۲۰	۳-۲- عوامل موثر بر لرزش هوا
۲۰	۱-۳-۲- زمان تاخیر
۲۱	۲-۳-۲- بارسنگ و فاصله‌داری چال‌ها
۲۱	۳-۳-۲- گل‌گذاری
۲۱	۴-۳-۲- عمق خرج
۲۱	۵-۳-۲- روش آتشیاری
۲۱	۶-۳-۲- شرایط زمین‌شناسی
۲۲	۷-۳-۲- شرایط آب و هوایی
۲۲	۴-۲- عوامل موثر بر پرتاب سنگ
۲۲	۱-۴-۲- عوامل زمین‌شناسی
۲۲	۲-۴-۲- وضعیت سطح انفجار
۲۲	۳-۴-۲- مواد منفجره و توزیع آن در چال
۲۳	۴-۴-۲- تاثیر توالی انفجار بر روند پرتاب سنگ

۲۳ ۲-۴-۵- تاثیر خرج ویژه.....

فصل سوم- اندازه گیری و پیش بینی میزان پیامدهای نامطلوب

۲۷ ۳-۱-۱- روش ها و ابزارهای اندازه گیری پیامدها.....

۲۷ ۳-۱-۱- رفتارسنجی لرزش میدان دور.....

۲۷ ۳-۱-۲- رفتارسنجی میدان نزدیک.....

۲۸ ۳-۱-۳- حسگرهای لرزه.....

۲۹ ۳-۱-۴- انتخاب نوع حسگر مناسب.....

۲۹ ۳-۱-۵- ملاحظات میدانی.....

۳۱ ۳-۱-۶- نصب حسگر.....

۳۲ ۳-۲- برآورد میزان پیامدها.....

۳۲ ۳-۲-۱- برآورد لرزش زمین.....

۳۴ ۳-۲-۲- مدل های عمومی برآورد لرزش زمین ناشی از انفجار.....

۳۹ ۳-۲-۳- برآورد لرزش هوا.....

۴۱ ۳-۲-۴- اندازه گیری و برآورد پرتاب سنگ.....

فصل چهارم- عناصر تاثیرپذیر از پیامدهای نامطلوب و واکنش آنها

۴۷ ۴-۱- تاثیر لرزش زمین ناشی از انفجار بر سازه های سطحی.....

۴۷ ۴-۱-۱- معیارهای خسارت برای سازه ها.....

۴۸ ۴-۱-۲- طیف واکنش.....

۴۹ ۴-۱-۳- تخمین فرکانس طبیعی سازه ها.....

۵۰ ۴-۲- تاثیر لرزش زمین ناشی از انفجار بر سازه های زیرزمینی.....

۵۰ ۴-۲-۱- لرزش های انفجاری.....

۵۰ ۴-۲-۲- اثر کیفیت سنگ.....

۵۰ ۴-۲-۳- شاخص آسیب انفجار.....

۵۱ ۴-۲-۴- اثر عمق.....

۵۱ ۴-۳- تاثیر لرزش بر توده سنگ.....

۵۵ ۴-۴- تاثیر لرزش زمین ناشی از انفجار بر بتن.....

۵۶ ۴-۵- تاثیر لرزش زمین بر انسان.....

۵۸ ۴-۶- خستگی ناشی از تکرار انفجار.....

فصل پنجم- استانداردها و معیارهای موجود

۶۱ ۵-۱- آشنایی.....

۶۱ ۵-۲- استانداردهای لرزش برای سازه ها و تاسیسات.....

۶۶ ۵-۳- معیارها و استانداردهای لرزش موجود برای جلوگیری از خسارت.....

۶۶ ۵-۳-۱- حداکثر سرعت ذره (PPV) به عنوان معیار خسارت.....

۶۶ ۵-۳-۲- حداکثر سرعت ذره و فرکانس به عنوان معیارهای خسارت.....

فصل ششم- روش‌های پیشگیری، کنترل و کاهش پیامدهای نامطلوب

۷۱	..... ۱-۶- آشنایی
۷۱	..... ۲-۶- روش‌های کاهش سطح لرزش
۷۲	..... ۳-۶- روش‌های عمومی برای کنترل لرزش انتقالی
۷۲	..... ۱-۳-۶- ایجاد شکاف برای کنترل لرزش
۷۳	..... ۲-۳-۶- استفاده از ترانسه‌های باز در معادن سطحی
۷۳	..... ۴-۶- روش‌های کاهش لرزش هوا
۷۴	..... ۵-۶- جلوگیری از پرتاب سنگ
۷۴	..... ۱-۵-۶- تاثیر ساختار توده سنگ
۷۴	..... ۲-۵-۶- حفاری
۷۴	..... ۳-۵-۶- خرج‌گذاری و شروع انفجار
۷۵	..... ۴-۵-۶- کنترل پرتاب سنگ

فصل ۱

معرفی پیامدهای انفجار و

تئوری حاکم بر آنها

۱-۱- آشنایی

انرژی حاصل از انفجار ماده منفجره در یک چال صرف فعالیت‌های متعددی می‌شود که بعضی از آنها مانند خردایش و جابه‌جایی سنگ به عنوان پیامدهای مفید و مطلوب و بعضی دیگر مانند لرزش زمین، لرزش هوا و پرتاب سنگ جزو پیامدهای نامطلوب به حساب می‌آیند. بر اساس محاسبات، مشخص شده است که سهم انرژی انفجار در ایجاد پیامدهای نامطلوب به مراتب بیش از اثرات مفید است و این مقدار به بیش از ۸۰ درصد انرژی منتقل شده به سنگ می‌رسد. جدول ۱-۱ سهم انرژی هر کدام از پیامدهای انفجار را ارایه می‌دهد. از میان پیامدهای نامطلوب انفجار، لرزش زمین، لرزش هوا و پرتاب سنگ بیشترین سهم انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به بررسی خسارت‌های ایجاد شده از این پیامدها ملاحظه شده است که لرزش زمین، بیشترین خسارت را ایجاد می‌کند و عناصر تاثیرپذیر این پیامد، گسترده و متعدّدند. بر این اساس، در مورد پدیده لرزش زمین نسبت به دیگر پیامدها، تحقیقات و بررسی‌های بیشتری انجام شده است. از طرفی، با توجه به عمیق‌تر شدن معادن روباز و تولید بالا و در نتیجه انفجارهای بزرگتر، این پدیده از سوی معدنکاران، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

جدول ۱-۱- میزان انرژی هر یک از پیامدهای انفجار

نوع پیامد	میزان انرژی (درصد)
ایجاد شکاف درجا	۱
شکستن سنگ	۱۴-۱۵
جابه‌جایی	۴
خرد کردن در نزدیکی چال	۱-۲
پرتاب سنگ	۱
تغییر شکل سنگ	۱
لرزش زمین	۴۰
لرزش هوا	۳۸-۳۹

لرزش زمین و لرزش هوا از نظر برخی خصوصیات با هم مشابه‌اند و تئوری‌های حاکم بر آنها در بعضی موارد یکسانند. پدیده پرتاب سنگ تا حدودی با دو پیامد دیگر متفاوت است زیرا در این دو پیامد، امواج لرزه‌ای نقش اساسی را ایفا می‌کنند در حالی که در پرتاب سنگ، امواج لرزه‌ای تاثیر کمتری دارند.

به منظور کاهش اثرات مخرب این پیامدهای نامطلوب باید شناخت کاملی نسبت به چگونگی ایجاد، عوامل موثر، عوامل تاثیرپذیر و روش‌های جلوگیری و کنترل آنها پیدا کرد. شناخت و کنترل این پیامدها دو نتیجه کلی مطلوب را به دنبال دارد. یکی کاهش خسارات ناشی از آنها و دیگری اختصاص سهم بیشتری از انرژی انفجار به پیامدهای مطلوب.

۱-۲- لرزش زمین

۱-۲-۱- امواج لرزه‌ای و تئوری انتشار امواج

آزاد شدن طبیعی انرژی در یک نقطه مانند زلزله و یا با منشا مصنوعی مانند عملیات انفجار، باعث بر هم خوردن تعادل تنش در آن منطقه می‌شود. در عملیات انفجار معادن، این انرژی از حرارت و فشار گازهای ناشی از انفجار مواد منفجره حاصل می‌شود. تنش ایجاد شده در اثر آزاد شدن انرژی به اندازه‌ای است که در محدوده اطراف منبع تولید، از مقاومت سنگ، فراتر می‌رود و شکست و تخریب آن را به دنبال دارد. با افزایش فاصله از منبع، این تنش کاهش می‌یابد و مقاومت سنگ کمتر می‌شود و به صورت امواج

لرزه‌ای در داخل یا روی محیط انتشار می‌یابد. به این ترتیب به غیر از مناطق نزدیک به منبع تولید انرژی، اکثر حرکات زمین به صورت گذرا است و پس از عبور امواج لرزه‌ای، زمین به حالت اولیه خود برمی‌گردد. به عبارت دیگر این امواج باعث ایجاد تغییر شکل‌های الاستیک در محیط می‌شوند. بر این اساس به این امواج، امواج الاستیک گفته می‌شود و قوانین و تئوری حاکم بر آن‌ها تحت عنوان تئوری انتشار امواج الاستیک ارایه شده است. با وجود این که در واقعیت و عمل نمی‌توان زمین را همیشه به صورت الاستیک و همگن در نظر گرفت ولی برای ساده‌تر شدن مساله و ارایه روابط ریاضی حاکم، این فرضیات در نظر گرفته می‌شوند. برخی پدیده‌های غیرالاستیک و ناهمگن را می‌توان به صورت یک سری فاکتورها و ضرایب، در نتایج تاثیر داد.

۱-۲-۲- انواع امواج لرزه‌ای

امواج لرزه‌ای را صرف نظر از منشا ایجاد آن‌ها به دو گروه تقسیم می‌کنند. گروه اول، امواج بدنه، درونی یا حجمی و گروه دیگر امواج سطحی هستند. امواج درونی خود به دو دسته امواج فشاری یا اولیه و امواج برشی یا ثانویه تقسیم می‌شوند. امواج سطحی نیز شامل امواج متعددی از جمله امواج ریلی^۱ و امواج لاول^۲ هستند که در ادامه تشریح می‌شوند:

الف- امواج درونی

این امواج به علت این که از درون محیط عبور می‌کنند و باعث تغییر در محیط انتقال دهنده خود می‌شوند به عنوان امواج درونی شناخته شده‌اند.

- امواج فشاری (P): این امواج، امواج طولی یا اولیه نیز گفته می‌شوند، زیرا امواج فشاری نسبت به امواج دیگر بیشترین سرعت انتشار را دارند و اولین دریافت در نقاط ثبت، مربوط به این نوع از امواج است. سرعت انتشار بالای این نوع امواج ناشی از راستای ارتعاش آن‌ها است زیرا راستای ارتعاش این امواج با راستای انتشار آن‌ها در یک جهت است. امواج فشاری به علت نوع ارتعاش خود باعث تغییر حجم در محیط انتقال دهنده می‌شوند و به طور متناوب محیط را تحت فشار و کشش قرار می‌دهند. این نوع امواج قابلیت انتشار در تمام محیط‌ها از جمله جامد، مایع و گاز را دارند.

- امواج برشی (S): این امواج به عنوان امواج عرضی و ثانویه نیز معرفی شده‌اند زیرا پس از امواج اولیه یا فشاری به نقطه ثبت می‌رسند. به عبارت دیگر سرعت این امواج از امواج فشاری کمتر است. این امواج در حین عبور از محیط باعث تغییر شکل در محیط انتقال دهنده می‌شوند. ماهیت برشی این نوع از امواج باعث شده است تا آن‌ها فقط قابلیت انتشار در جامدات را داشته و توانایی عبور از محیط‌های سیال را نداشته باشند. راستای انتشار و ارتعاش در این امواج عمود بر هم و به همین دلیل سرعت انتشار آن‌ها پایین‌تر از امواج فشاری است.

امواج برشی در اکثر منابع علمی با نماد S نشان داده شده‌اند ولی با توجه به این که راستای انتشار و ارتعاش در این نوع امواج بر هم عمودند و از طرفی ارتعاش در صفحه قائم یا افقی به صورت عمود بر راستای انتشار قرار می‌گیرد، امواج برشی را با دو نماد S_V (امواج برشی با راستای ارتعاش در صفحه قائم) و S_H (امواج برشی با راستای ارتعاش در صفحه افقی) نمایش می‌دهند. امواج درونی در برخورد با مرزها به یکدیگر تبدیل می‌شوند.

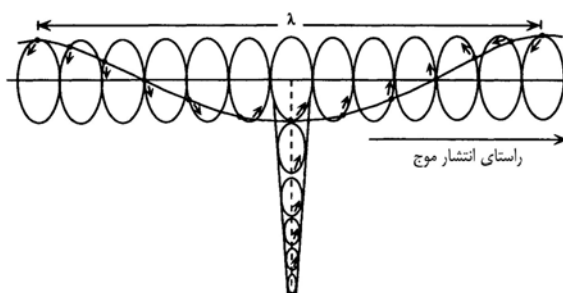
1- Rayleigh

2- Love

ب- امواج سطحی

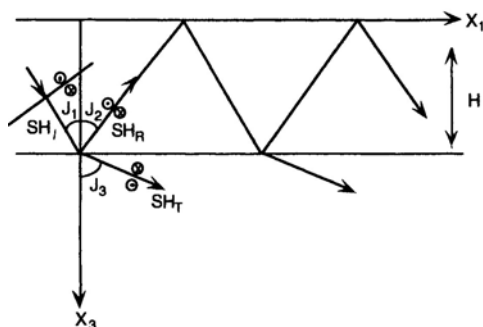
اگر محیط انتقال دهنده امواج در تمام جهات تا بی‌نهایت بدون هیچ تغییری ادامه داشته باشد در این محیط فقط امواج درونی ایجاد و منتشر می‌شوند. وجود یک سطح جدید مانند سطح زمین باعث می‌شود تا امواج سطحی ایجاد شوند. دو نوع از امواج سطحی که بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند امواج رایلی و لائو هستند. اکثر سیستم‌های اندازه‌گیری و نقاط ثبت امواج لرزه‌ای مخصوصاً در مورد عملیات آتشیاری در معادن در سطح زمین قرار دارند. بنابراین لرزه‌نگاشت‌ها وجود هر دو نوع امواج درونی و سطحی را نشان می‌دهند. - امواج رایلی: امواج برشی در مسیر حرکت خود در هنگام برخورد با یک سطح آزاد به صورت امواج فشاری (P) و امواج برشی (S_v) منعکس می‌شوند. با تغییر زاویه برخورد امواج برشی با سطح، زاویه بازتاب هر دو نوع امواج بازتابی تغییر می‌کند. در یک زاویه خاص (زاویه بحرانی) اگر امواج برشی با سطح زمین برخورد کنند امواج فشاری (P) و برشی (S_v) بازتاب شده با هم روی سطح زمین تداخل کرده و شروع به انتشار می‌کنند. در این حالت امواج سطحی رایلی ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر از تداخل امواج فشاری و برشی (S_v) بر روی سطح زمین امواج رایلی ایجاد می‌شوند.

امواج رایلی با یک حرکت بیضی شکل بر روی سطح زمین حرکت می‌کنند و حرکت ذره در این امواج بر روی این بیضی به صورت چپ‌گرد (در جهت عکس حرکت عقربه‌های ساعت) است. قطر بزرگ این بیضی به صورت قائم و نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک آن بر اساس معادلات حرکت موج، حدود ۱/۵ است. انرژی امواج رایلی با افزایش عمق به شدت کاهش می‌یابد. در شکل ۱-۱ نحوه انتشار امواج رایلی و تغییر دامنه آن با عمق نشان داده شده است.

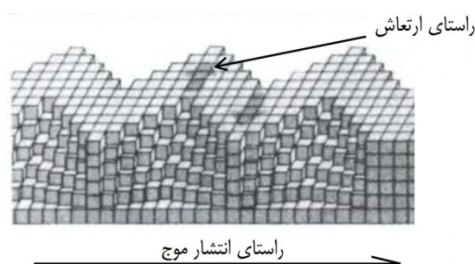


شکل ۱-۱- نحوه انتشار امواج رایلی و وضعیت تغییر دامنه آن‌ها با افزایش عمق

- امواج لائو: برای ایجاد امواج لائو، وجود لایه‌بندی ضروری است. به عبارت دیگر برای تولید این نوع از امواج، وجود یک لایه با ضخامت کم و با سرعت پایین که بر روی یک لایه سخت و با سرعت بالا قرار گرفته باشد، ضروری است. در این شرایط هنگامی که امواج برشی با راستای ارتعاش در صفحه افقی (S_H) از محیط لایه با سرعت بالا وارد لایه سطحی با سرعت پایین شوند در این لایه به تله می‌افتند و از تداخل این امواج برشی، امواج لائو ایجاد می‌شوند (شکل ۱-۲). نحوه انتشار و ارتعاش امواج لائو در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. سرعت انتشار امواج لائو از سرعت امواج رایلی بیشتر است.



شکل ۱-۲- نحوه ایجاد امواج لای (به تله افتادن امواج در لایه کم سرعت)



شکل ۱-۳- راستای انتشار و ارتعاش امواج لای

۱-۲-۳- ویژگی‌های اصلی یک موج لرزه

ویژگی‌های اصلی امواج لرزه‌ای شامل دامنه، فرکانس و طول موج هستند.

الف- دامنه موج

دامنه موج لرزه‌ای به عنوان حداکثر فاصله‌ای که ذره در حول موقعیت تعادل خود نوسان می‌کند تعریف می‌شود. دامنه موج به صورت‌های زیر بیان می‌شود:

- شتاب ذره: شتاب اعمال شده روی یک ذره به واسطه گذر موج لرزه‌ای
- سرعت ذره: سرعت نوسان ذره حول نقطه تعادل خود
- جابه‌جایی ذره: فاصله جابه‌جا شدن ذره از نقطه تعادل خود

رفتارسنجی لرزه‌ای عموماً به صورت سه مولفه‌ای انجام می‌شود. بنابراین دامنه شتاب، سرعت و جابه‌جایی ذره با حالت تک مولفه‌ای تفاوت خواهد داشت. در این شرایط از حاصل جمع برداری دامنه‌ها یا حداکثر دامنه ذره استفاده می‌شود. در حالت سه مولفه‌ای، لرزه دریافت شده در یک نقطه در سه جهت مختلف (عمود بر هم) ثبت می‌شود. بنابراین به صورت سه سیگنال لرزه تک مولفه یا تک محوری مشخص می‌شوند. به منظور محاسبه دامنه برآیند سیگنال سه مولفه‌ای از عملگر جمع برداری استفاده می‌شود:

$$V_{sum}(t) = \sqrt{A_x^2(t) + A_y^2(t) + A_z^2(t)} \quad (1-1)$$

که در آن V_{sum} دامنه برآیند در لحظه t ، A_x دامنه لرزش ثبت شده در طول محور x در لحظه t ، A_y دامنه لرزش ثبت شده در طول محور y در لحظه t ، A_z دامنه لرزش ثبت شده در طول محور z در لحظه t است.

دامنه‌های ذکر شده در رابطه ۱-۱ را می‌توان در واحدهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی ذره عنوان کرد. حداکثر مقدار دامنه برآیند به عنوان حداکثر دامنه ذره انفجار نامیده می‌شود و مقدار خالص دامنه حداکثر را ارائه می‌دهد. بر اساس لرزه‌نگاشت ثبت شده، حداکثر دامنه ذره به صورت حداکثر شتاب ذره، حداکثر سرعت ذره و حداکثر جابه‌جایی ذره بیان می‌شود.

ب- فرکانس و دوره تناوب موج

فرکانس، یک ویژگی بسیار مهم هر رویداد لرزشی است. فرکانس یک موج هارمونیک ساده به صورت تعداد نوسان در یک ثانیه تعریف می‌شود. زمان تناوب یک موج نیز پارامتر مهمی است که به صورت عکس فرکانس و به عنوان مدت زمان یک سیکل یا نوسان تعریف می‌شود.

امواج حاصل از انفجار به صورت ترکیب پیچیده‌ای از امواج سینوسی هستند که هر کدام از آنها دارای یک فرکانس است. بنابراین امواج ناشی از انفجار دارای فرکانس‌های مختلفی هستند. در طیف فرکانس موج لرزشی، فرکانسی که بالاترین محتوای انرژی را داشته باشد به عنوان فرکانس غالب معرفی می‌شود. این فرکانس غالب در تحلیل‌های تاثیر لرزش بر سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طوری که اگر این فرکانس نزدیک به فرکانس طبیعی سازه باشد پتانسیل تخریب افزایش می‌یابد. به منظور جداسازی فرکانس‌ها و مشخص کردن محتوای فرکانس موج لرزه‌ای از تکنیک تبدیل فوریه استفاده می‌شود.

مفهوم فرکانس در تحلیل لرزش‌های ناشی از انفجار به اندازه دامنه مهم است. دامنه به تنهایی فقط شدت یک سیگنال را مشخص می‌کند و بدون در نظر گرفتن فرکانس، انرژی واقعی حمل شده به وسیله این سیگنال قابل ارزیابی نیست. برای یک سیگنال با گام‌های زمانی مجزا، انرژی موج با سطح کل زیر منحنی سرعت ذره-زمان متناسب است. این تناسب به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E \propto \sum_{i=1}^N |S(t_i)|^2 \quad (2-1)$$

که در آن E انرژی موج (واحد انرژی)، N تعداد نمونه‌های ثبت شده مجزای زمان، $S(t_i)$ سرعت ذره برای نمونه i ام است.

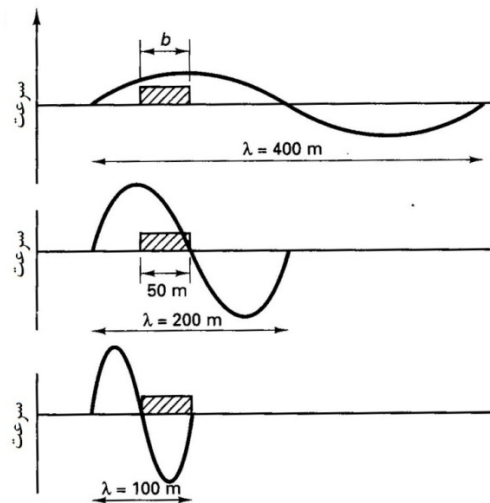
پ- طول موج

طول موج یک تابع هارمونیک ساده است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda = V_p \times T = V_p \times \frac{1}{f} \quad (3-1)$$

که در آن λ طول موج بر حسب متر، V_p سرعت انتشار موج در محیط بر حسب متر بر ثانیه، T زمان تناوب بر حسب ثانیه و f فرکانس تابع هارمونیک بر حسب هرتز است.

در رفتارسنجی و تحلیل لرزش ناشی از انفجار، طول موج، یک عامل مهم برای ارزیابی پتانسیل تخریب محسوب می‌شود. به عنوان مثال در حالتی که جزو فرکانس غالب موج لرزه، طول موجی تقریباً دو برابر طول یک بلوک سنگی یا بتنی داشته باشد پتانسیل تخریب به مراتب بیشتر از حالتی است که طول موج‌ها کوچکتر از ابعاد بلوک باشند. بنابراین در حالت دو برابر بودن طول موج، حداکثر جابه‌جایی تفاضلی در دو سر بلوک اتفاق می‌افتد که این موضوع باعث بالا رفتن پتانسیل تخریب می‌شود. طول موج‌های کوتاه‌تر باعث تحریک بلوک‌های کوچکتر می‌شوند (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴- تاثیر اندازه طول موج و ابعاد بلوک در ناپایداری بلوک سنگ (b عرض بلوک و λ طول موج است)

طول موج تاثیر زیادی بر اندرکنش بین امواج لرزه‌ای و ناپیوستگی‌ها یا بلوک‌های سنگی دارد. طول موج‌های خیلی بزرگتر از طول ناپیوستگی یا ابعاد بلوک سنگی برجا به علت آهنگ تغییر شکل تفاضلی نسبی کم، حداقل تحریک را اعمال می‌کنند (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۲- مقایسه بعد ناپیوستگی خطی و فرکانس بحرانی تحریک بر اساس طول موج مشابه با بعد ناپیوستگی

طول خط اثر ناپیوستگی	فرکانس بحرانی موج فشاری (kHz)	فرکانس بحرانی موج برشی (kHz)
۱۰۰-۵۰۰ میلی‌متر	۱۰-۵۰	۶-۳۰
۵۰۰ میلی‌متر تا ۱ متر	۵-۱۰	۳-۶
۱ متر تا ۵ متر	۱-۵	۰/۶-۳
۵ تا ۵۰ متر (گسل محلی یا ناپیوستگی بزرگ)	۰/۱-۱	۰/۰۶-۰/۶
بزرگتر از ۵۰ متر (گسل بزرگ)	< ۰/۱	< ۰/۰۶

با توجه به جدول ۱-۲ ملاحظه می‌شود که ناپیوستگی‌ها و گسل‌های بزرگ مقیاس در محدوده گسترده‌تری از فرکانس‌های لرزش ناشی از انفجار تحریک می‌شوند در حالی که ناپیوستگی‌های کوچکتر نیاز به فرکانس‌های بالاتر دارند که عموماً این فرکانس‌ها در مناطق خیلی نزدیک به انفجار ظاهر می‌شوند.

اندازه طول موج به گونه‌ای دیگر نیز بر پتانسیل تخریب تاثیرگذار است به این صورت که امواج لرزه‌ای دارای طول موج‌های کوتاه‌تر (فرکانس‌های بالاتر)، تحت تاثیر اکثر ناپیوستگی‌های کوچک قرار می‌گیرند و میرایی بالایی دارند. اگر طول موج‌ها بزرگ (فرکانس کمتر) باشد اکثر ناپیوستگی‌های کوچک به وسیله این امواج دیده نمی‌شود و تاثیری بر آن‌ها ندارند که این موضوع باعث کم شدن میرایی این امواج می‌شود.

۱-۲-۴- امواج لرزه‌ای حاصل از عملیات انفجار معدنی

در عملیات انفجار در معادن، به دلیل این که چشمه تولید لرزه (خرج داخل چال) در فاصله کمی از سطح زمین قرار دارد، امواج غالب سطحی در دستگاه‌های ثبت‌کننده لرزش ثبت می‌شوند. البته امواج درونی نیز در لرزه‌نگاشت‌ها ثبت می‌شوند ولی امواج سطحی مخصوصاً در فواصل دور از انفجار به صورت قوی‌تر و غالب ظاهر می‌شوند. بر این اساس اکثر انرژی حاصل از انفجار در مناطق دورتر از چشمه تولید به امواج سطحی اختصاص می‌یابد و در نتیجه اکثر خسارت‌ها نیز ناشی از این امواج هستند.

امواج لرزه‌ای حاصل از انفجارهای معدنی به دلیل وجود چشمه‌های متعدد (چال‌های متعدد)، فواصل زمانی انفجار بین چال‌ها، تاثیر عوارض زمین‌شناسی و همچنین تداخل امواج مختلف به شکل پیچیده‌ای در نقاط ثبت لرزش ظاهر می‌شوند. امواج مختلف (درونی و سطحی) به علت اختلاف در راستای ارتعاش و انتشار آن‌ها در نقاط ثبت، در راستاهای مختلف اثر متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به عبارت دیگر امواج مختلف در برخی جهت‌ها قوی‌تر از دیگر راستاها ظاهر می‌شوند. بر این اساس و با توجه به نیاز به تحلیل کامل برآیند امواج دریافت شده در یک مکان خاص، سعی می‌شود تا امواج لرزه‌ای در سه راستای عمود بر هم ثبت شوند. این سه راستا به صورت مولفه‌های شعاعی یا طولی (R)، قائم (V) و مماسی (T) لرزش مشخص می‌شوند. مولفه شعاعی یا طولی در راستای خط اتصال بین منبع لرزش و نقطه ثبت یا به عبارتی در راستای شعاع امواج دایره‌ای حاصل از چشمه لرزش، مولفه قائم به صورت عمود بر مولفه شعاعی و در صفحه قائم و مولفه مماسی نیز عمود بر مولفه شعاعی و در صفحه افقی و به صورت مماس بر جبهه امواج قرار می‌گیرند. این سه مولفه، امواج لرزه‌ای را به طور کامل ثبت می‌کنند.

از مطالعه و بررسی امواج لرزه‌ای ثبت شده به صورت مولفه‌های مختلف موارد زیر استنباط می‌شود:

- بر روی مولفه شعاعی (R)، امواج فشاری (P) و برشی (S_V) قابل اندازه‌گیری هستند.

- بر روی مولفه قائم (V)، امواج سطحی مخصوصاً امواج رایلی قوی‌تر ظاهر می‌شوند.

- بر روی مولفه مماسی (T)، امواج برشی (S_H) قابل اندازه‌گیری هستند.

- امواج لاو فقط بر روی مولفه مماسی (T) ظاهر می‌شوند.

به دلیل ناهمسانگردی سنگ، امواج فشاری بر روی مولفه مماسی نیز ظاهر می‌شوند. موارد یاد شده در شرایطی صدق می‌کنند که راستاهای ثبت‌کننده‌ها در جهت‌های خاص ذکر شده قرار گرفته باشند، در غیر این صورت امواج مختلف بر روی مولفه‌های سه‌گانه با شرایط متفاوتی ظاهر می‌شوند.

۱-۲-۵- کاهش دامنه و انرژی امواج لرزه‌ای

یکی از متغیرهای مهم امواج، دامنه است که میزان انرژی امواج را نیز مشخص می‌کند. به عبارت دیگر با کاهش دامنه امواج، انرژی آن‌ها نیز کاهش می‌یابد. بنابراین به منظور بررسی وضعیت کاهش انرژی امواج، مواردی که باعث کاهش دامنه آن‌ها شوند را مورد بررسی قرار می‌دهند. کاهش دامنه امواج با عنوان میرایی امواج نیز بیان می‌شود. بعضی از عوامل اصلی موثر در کاهش دامنه امواج لرزه‌ای به صورت زیر بیان شده‌اند:

- گسترش هندسی^۱ یا کاهش دامنه با افزایش فاصله

- تقسیم انرژی لرزه‌ای در مرزها

- پراکنش^۱

- میرایی غیرالاستیک

بر اساس فاصله سیر امواج، میرایی با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$A(x) = A_0 \times e^{\left(\frac{\pi \cdot f}{Q \cdot V}\right)x} \quad (4-1)$$

که در آن $A(x)$ دامنه موج در فاصله مورد نظر، A_0 دامنه اولیه، f فرکانس، V سرعت انتشار امواج، Q فاکتور کیفیت و x فاصله از منبع لرزش است. فاکتور کیفیت با معکوس مقدار میرایی برابر است بنابراین با افزایش فاکتور کیفیت، میرایی کم می‌شود. با افزایش عمق از سطح زمین، فاکتور کیفیت افزایش می‌یابد. همچنین فاکتور کیفیت مربوط به امواج فشاری بزرگتر از مقدار این فاکتور برای امواج برشی است بنابراین میرایی امواج فشاری، کمتر از امواج برشی است. یکی از نتایج مهم رابطه ۴-۱ این نکته است که در صورت ثابت بودن فاکتور کیفیت (Q)، با افزایش فرکانس، میزان کاهش دامنه یا میرایی افزایش می‌یابد. بر این اساس می‌توان گفت که امواج با فرکانس بالا، بیشتر و امواج با فرکانس پایین کمتر میرا می‌شوند. به عبارت دیگر، امواج با فرکانس بالاتر، سریع‌تر جذب می‌شوند و انرژی خود را از دست می‌دهند.

۱-۳- لرزش هوا

در اثر انتشار امواج فشاری در اتمسفر، لرزش هوا ایجاد می‌شود. این امواج فشاری به صورت مستقیم، در اثر آزاد شدن انرژی در هوا مانند انفجار در فضای آزاد یا به صورت غیرمستقیم، در اثر انتقال از یک محیط به فضای آزاد، ایجاد شده و در هوا منتشر می‌شوند. به دلیل سیال بودن هوا، فقط امواج فشاری قابلیت انتشار در این محیط را دارند و امواج دیگر در لرزش هوا دخالتی ندارند. از نظر ماهیت و تئوری حاکم بر امواج مربوط به لرزش هوا، می‌توان موارد ذکر شده در مورد لرزش زمین را با لحاظ کردن تغییرات محیط انتشار در نظر گرفت. با توجه به جدول ۱-۱ ملاحظه می‌شود که لرزش هوا نیز درصد بالایی از انرژی انفجار را به خود اختصاص می‌دهد. به این ترتیب، اهمیت مطالعه و بررسی این پدیده مشخص می‌شود. امواج مربوط به لرزش هوا بر اساس فرکانس به دو دسته تقسیم می‌شوند. یک دسته، امواج فرکانس بالا که از سوی انسان قابل شنیدن هستند و دسته دوم، امواج فرکانس پایین که قابلیت شنیده شدن ندارند. صدا در واقع بخش قابل شنیدن لرزش هواست که از فرکانس ۲۰ تا ۲۰،۰۰۰ هرتز را در برمی‌گیرد اما ضربه‌های ناشی از لرزش هوا در واقع بخش غیرقابل شنیدن آن است که فرکانس کمتر از ۲۰ هرتز دارند.

با وجود این که در اکثر حالت‌های عملی، مشاهده شده است که لرزش هوا خسارت زیادی را ایجاد نکرده است ولی به دلیل تاثیر آن بر اجزا آزادتر سازه مانند پنجره‌ها، درها و وسایل داخل ساختمان‌ها و همچنین اثرات شنیداری آن عموماً ترس تخریب و ایجاد آسیب را در افراد ایجاد می‌کند. این امر باعث شده تا لرزش هوا به عنوان یک پدیده مشکل‌ساز مد نظر قرار گیرد.

بعضی از دلایل ایجاد لرزش هوا به صورت زیر است:

- پالس فشاری سنگ به علت انفجار مواد منفجره

- خروج گاز از میان مواد گل‌گذاری یا در هنگام بیرون پرتاب شدن مواد گل‌گذاری از چال

- استفاده از فتیله انفجاری برای شروع و انتقال انفجار در سطح زمین

- پالس فشاری هوا به علت جابه‌جایی سنگ از موقعیت اصلی خود

۱-۴- پرتاب سنگ

پرتاب سنگ یکی دیگر از پیامدهای نامطلوب انفجار است که نسبت به دو پیامد دیگر (لرزش زمین و هوا)، انرژی کمتری از انفجار را به خود اختصاص می‌دهد. یکی از هدف‌های اصلی انفجار، جابه‌جا شدن سنگ در اثر انفجار است اما هر گونه خارج شدن قطعات سنگ از مکان انفجار به طور غیرقابل پیش‌بینی به عنوان پرتاب سنگ شناخته می‌شود. پرتاب سنگ در مقایسه با لرزش زمین و هوا مکانیسم متفاوتی دارد. در پدیده‌های لرزش زمین و هوا، نقش اصلی را امواج لرزه‌ای به عهده دارند در صورتی که در پدیده پرتاب سنگ این نقش بیشتر به عهده گازهای حاصل از انفجار است. در حالت‌هایی مانند گل‌گذاری نامناسب، بارسنگ کوچک، وجود صفحات ضعیف در توده سنگ و وجود قطعات سنگ سست روی پله، پرتاب سنگ اتفاق می‌افتد. در زمان وقوع موارد یاد شده، انرژی ماده منفجره به جای خرد کردن و جابه‌جایی کنترل شده مواد بارسنگ، صرف پرتاب سنگ می‌شود. همچنین موارد دیگری چون زمین‌شناسی، طرح انفجار نامناسب و یا بی‌دقتی، باعث پرتاب ناخواسته سنگ می‌شوند. تقریباً در تمام انفجارها، پرتاب سنگ قابل انتظار است اما فاصله این پرتاب از چند متر تا چند صد متر در انفجارهای با کنترل ضعیف تغییر می‌کند. محدوده پرتاب سنگ عادی در حدود ۲٫۵ برابر ارتفاع پله و سطحی که برای ایمنی باید در نظر گرفته شود حدود ۴ برابر ارتفاع پله است. پرتاب سنگ در فاصله دورتر از سطح ایمن را پرتاب سنگ بیش از حد می‌نامند.

یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد پرتاب سنگ، توزیع نامناسب خرج است. به منظور تکمیل مراحل یک انفجار که شامل شکست و جابه‌جایی توده سنگ است میزان خرج مناسب را باید در نظر گرفت. در بعضی مواقع برای سهولت بارگیری، افزایش میزان خردایش توده سنگ و همچنین برای جبران انحراف در حفاری و جابه‌جایی بیشتر توده سنگ، مقدار خرج افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به افزایش خرج داخل چال برای دستیابی به مقاصد ذکر شده، درصدی از این خرج اضافی باعث ایجاد پدیده پرتاب سنگ می‌شود. بر این اساس اگر در مواردی توده سنگ نیز شرایط متفاوتی مانند وجود لایه‌های ضعیف، سنگ‌های سست شده و مواردی نظیر آن داشته باشد، اثر این خرج اضافی بیشتر می‌شود و پرتاب سنگ تشدید می‌یابد. این فرآیند با افزایش قطر چال در معادن روباز تشدید می‌شود که دلیل آن افزایش تمرکز و توزیع نامناسب خرج است.

فصل ۲

عوامل موثر در پیامدهای نامطلوب

۲-۱-۱- آشنایی

عوامل متعددی بر لرزش زمین، هوا و پرتاب سنگ ناشی از انفجار تاثیر دارند. این عوامل به دو گروه تقسیم شده‌اند. گروه اول به عنوان عوامل قابل کنترل مانند ارتفاع پله، خرج ویژه، آرایش چال‌ها و دیگر عوامل هندسی انفجار و گروه دوم تحت عنوان عوامل غیرقابل کنترل مانند شرایط زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی معرفی شده‌اند. عوامل غیرقابل کنترل بیشترین تاثیر را بر روی نتایج انفجار دارند.

۲-۲- عوامل موثر بر لرزش زمین

لرزش زمین در نقاط نزدیک به انفجار، تحت تاثیر مشخصات طراحی و هندسه انفجار قرار می‌گیرد. در حالی که در فواصل دور از انفجار، مشخصات طراحی تاثیر کمتری دارند.

با توجه به تعدد عوامل تاثیرگذار و همچنین اثر متقابل این عوامل بر امواج لرزه‌ای حاصل از انفجار، لرزش زمین بسیار پیچیده است. بر این اساس بررسی اثر هر کدام از عوامل به صورت مجزا انجام می‌شود ولی تغییر در عوامل دیگر نیز باید در این بررسی‌ها مد نظر قرار گیرد.

۲-۲-۱- میزان خرج در هر تاخیر

میزان و شدت لرزش زمین و هوا در یک نقطه معین با میزان خرج منفجر شده رابطه مستقیم دارد. در انفجارهایی که از چاشنی‌هایی با زمان‌های تاخیر متفاوت استفاده می‌شود، حداکثر خرج در هر تاخیر، بیشترین تاثیر را بر روی شدت لرزش دارد و کل خرج مصرفی در انفجار در نظر گرفته نمی‌شود. برای تعیین وزن خرج در هر تاخیر، قسمتی از خرج کلی که به وسیله چاشنی‌ها در یک زمان تاخیر منفجر شود را در نظر می‌گیرند.

حداکثر خرج در هر تاخیر، مهم‌ترین عامل موثر در تولید لرزش است. رابطه بین لرزش و خرج در هر تاخیر از نوع نمایی است:

$$V \approx Q^a \quad (1-2)$$

که در آن Q حداکثر خرج منفجر شده در هر تاخیر بر حسب کیلوگرم، V سرعت ذره بر حسب متر در ثانیه و a ضریب ثابت که مقدار پیشنهادی اولیه آن حدود ۰/۸ است.

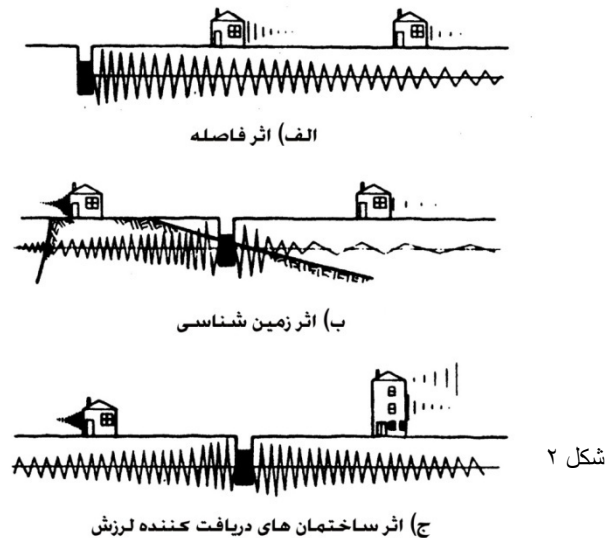
۲-۲-۲- فاصله از محل انفجار

فاصله از محل انفجار نیز مانند حداکثر خرج در هر تاخیر تاثیر زیادی بر روی لرزش دارد. رابطه فاصله و سرعت ذره به صورت معکوس است و با افزایش فاصله، سرعت ذره کاهش می‌یابد. بر این اساس، رابطه فاصله و سرعت ذره به صورت زیر ارائه شده است:

$$V \approx \frac{1}{(Ds)^b} \quad (2-2)$$

که در آن Ds فاصله از محل انفجار بر حسب متر، V سرعت ذره بر حسب متر در ثانیه و b ضریب ثابت که مقدار پیشنهادی اولیه آن حدود ۰/۶ است.

فاصله باعث افزایش میرایی امواج لرزه‌ای و در نتیجه سبب کاهش شدت لرزش آن می‌شود. زمین به صورت یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند و باعث جذب سریع امواج فرکانس بالا می‌شود. بر این اساس، در فواصل دور از انفجار، اکثر انرژی لرزش زمین مربوط به امواج فرکانس پایین است. در شرایطی که فاصله دو نقطه از محل انفجار یکسان باشد عوامل دیگر، مانند شرایط زمین‌شناسی، نوع و شرایط سازه، تاثیر زیادی بر لرزش دریافت شده خواهند داشت. این وضعیت در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



۲-۲-۳- خرج ویژه

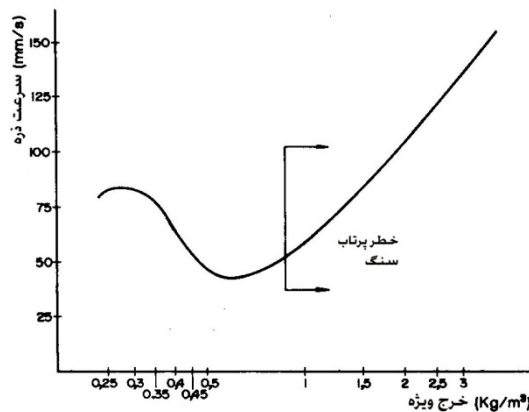
یکی دیگر از عوامل موثر بر ویژگی‌های لرزش که رفتار دوگانه‌ای از خود نشان می‌دهد، خرج ویژه است. ممکن است برای کاهش لرزش شدید زمین، کاهش خرج ویژه در آتشباری پیشنهاد شود ولی هیچ‌گاه لرزش زمین از یک میزان حداقل، کمتر نخواهد شد.

بررسی انفجارهای ثبت شده نشان داده است مواردی که در آنها میزان خرج ویژه حدود ۲۰ درصد کمتر از حد بهینه آن بوده، میزان لرزش ۲ تا ۳ برابر افزایش یافته است. این حالت باعث شده است تا انرژی حاصل از انفجار به جای ایجاد ترک‌اندن و جابه‌جایی در سنگ، صرف لرزش زمین شود. شکل ۲-۲ رابطه خرج ویژه و سرعت ذره را نشان می‌دهد.

۲-۲-۴- نوع مواد منفجره

سرعت ذره ناشی از انفجار و کرنش‌های القایی در سنگ با هم متناسب‌اند و ثابت تناسب این رابطه امیدانس^۱ سنگ است. بنابراین، نتیجه عملی تناسب مذکور این است که مواد منفجره با فشار انفجار کمتر، لرزش کمتری ایجاد می‌کنند. این نوع مواد مانند آنفو دارای چگالی کم و سرعت انفجار پایین هستند. اگر مقدار یکسانی از آنفو با یک ماده منفجره اسلاری یا مواد منفجره ژلاتینی آلومینیوم‌دار مقایسه شود، شدت لرزش‌های تولیدی به وسیله آنفو به ترتیب به اندازه ۲ تا ۲٫۴ برابر کمتر خواهد بود.

1- Impedance



شکل ۲-۲- تأثیر خرج ویژه بر روی شدت لرزش زمین

۲-۲-۵- فاصله تاخیر

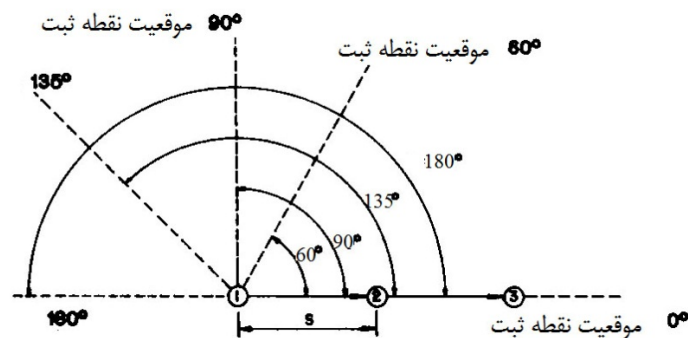
فاصله تاخیر یکی از عواملی است که به صورت مستقیم (انفجار مجزای دو چال) و غیرمستقیم (کاهش خرج بر تاخیر) اثر بسزایی بر لرزش دارد. فاصله تاخیر میان انفجار چال‌ها به صورت تاخیر تئوری (اسمی) و تاخیر موثر بیان می‌شود. در تاخیر تئوری، فاصله تاخیر برابر اختلاف زمان تاخیر اسمی دو چاشنی و در تاخیر موثر، اختلاف زمان رسیدن لرزه‌های تولید شده به وسیله انفجار چال‌های متوالی است. در حالت ساده وقتی یک ردیف چال موجود باشد رابطه زیر برقرار است:

$$t_e = t_n - \frac{S \times \cos \varphi}{V_c} \quad (3-2)$$

که در آن t_e زمان تاخیر موثر (ثانیه)، t_n زمان تاخیر اسمی (ثانیه)، S فاصله چال‌ها در یک ردیف (متر)، V_c سرعت انتشار امواج لرزه‌ای (متر در ثانیه) و φ زاویه بین امتداد چال‌های منفجر شده متوالی با موقعیت لرزه‌سنج است. شکل ۲-۳ نمونه‌ای از یک ردیف چال انفجاری را نشان می‌دهد که در آن چال‌ها با شماره مشخص شده‌اند. زاویه بحرانی موقعیت نسبی لرزه‌سنج، زاویه‌ای است که امواج لرزه‌ای در یک زمان به آن نقطه می‌رسند. بنابراین بین امواج، تداخل اتفاق می‌افتد و لرزش تشدید می‌شود. در واقع در این وضعیت خاص، تاخیر موثر برابر صفر است ($t_e=0$). بر این اساس، برای تعیین این زاویه بحرانی، رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\varphi_c = \cos^{-1} \left(\frac{V_c \times t_n}{S} \right) \quad (4-2)$$

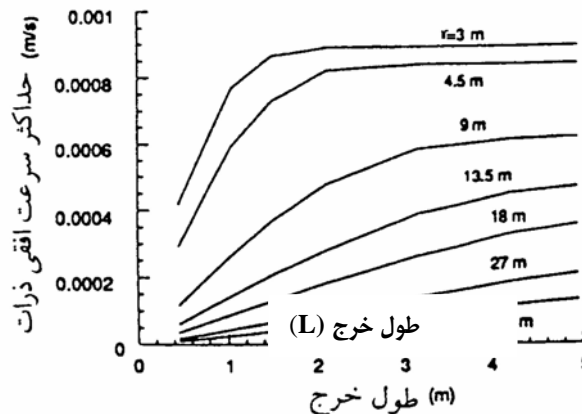
که در آن φ_c زاویه بحرانی است.



شکل ۲-۳- موقعیت یک ردیف چال انفجاری با وضعیت قرارگیری دستگاه‌های لرزه‌سنج

۲-۲-۲- طول خرج

به منظور یافتن رابطه‌ای بین طول خرج و لرزش حاصل از انفجار، بررسی‌هایی بر روی خرج‌های به طول ۰/۵ تا ۵ متر انجام شده که تاثیر پارامتر طول خرج مطابق شکل ۲-۴-۴ ارایه شده است.



رکز انفجار است).

شکل ۲-۴-۴- اری

از شکل ۲-۴ این نکته مشخص می‌شود که در فواصل دور، حداکثر سرعت افقی ذره به طور مستقیم با طول خرج متناسب است. در فواصل دور، رابطه $\frac{r}{L} \leq 5$ (فاصله نقطه اندازه‌گیری از مرکز انفجار و L طول خرج است) و در فواصل نزدیک رابطه $\frac{r}{L} \leq 5$ برقرار است. در فواصل نزدیک، با افزایش طول خرج، حداکثر سرعت ذره نیز افزایش می‌یابد تا این که بعد از یک فاصله معین حداکثر سرعت ذره مستقل از طول خرج می‌شود. با افزایش طول خرج بعد از این مقدار بحرانی فقط شکل موج منتشر شده تغییر پیدا می‌کند ولی حداکثر سرعت ذره تغییر محسوسی نخواهد کرد.

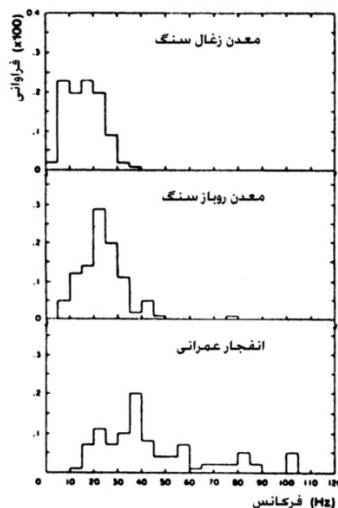
۲-۲-۷- جهت شروع انفجار

حداکثر سرعت ذره در جهت‌های مختلف یک بلوک انفجاری متفاوت و از طرف مخالف نقطه شروع انفجار همیشه بیشتر از طرف موافق یا طرف انفجار است. همچنین حداکثر سرعت ذره در پشت سطح آزاد بلوک انفجاری از این دو مقدار بیشتر است. این موضوع در تعیین جهت شروع انفجار نسبت به سازه‌های سطحی اهمیت بسیاری دارد. بر این اساس باید سعی شود تا جهت حرکت انفجار به سمت سازه مورد نظر نباشد.

۲-۲-۸- شرایط زمین‌شناسی و مشخصات مکانیکی توده سنگ

شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات توده سنگ بر لرزش زمین ناشی از انفجار تاثیر دارند. از میان این شرایط می‌توان به وجود ناپیوستگی‌ها، چگالی، شرایط آب زیرزمینی و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ اشاره کرد. بررسی تاثیر این عوامل، نیاز به کمی کردن آن‌ها و انجام آزمایش‌های مختلف دارد. تاثیر این عوامل بر روی لرزش را می‌توان به تنهایی و یا ترکیبی از آن‌ها مورد بررسی قرار داد. به منظور بررسی تاثیر عوامل متعدد می‌توان از کمیت‌های حاصل از طبقه‌بندی‌های مختلف استفاده کرد. هر چه توده سنگ دارای کیفیت بالاتری باشد، میرایی امواج و جذب انرژی در آن کمتر است و امواج با کمترین افت از داخل آن عبور می‌کنند. به عنوان مثال، برای مقدار خرج ثابت به ازای هر تاخیر، توده سنگ‌های درزه‌دار با بازشدگی زیاد مانع لرزش زمین می‌شوند در حالی که سنگ‌های با کیفیت خوب و درزه‌های جوش خورده اجازه می‌دهند که لرزش‌های زمین فواصل خیلی طولانی را طی کنند.

شکاف‌های حاصل از انفجارهای کنترل شده، مانند پیش‌شکافی، موجب می‌شوند تا لرزش‌های زمین حدود ۸۰ الی ۹۰ درصد کاهش یابند. در ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده، انتشار امواج در جهات مختلف تغییر می‌کند. در مواردی که لایه‌های سخت با روباره‌ای از خاک پوشیده شده‌اند این مسئله در میزان شدت و فرکانس نوسانات موثر است. خاک، معمولاً دارای مدول الاستیسیته کمتری نسبت به سنگ است به همین دلیل سرعت انتشار امواج در این نوع مواد کاهش می‌یابد. همچنین با ضخیم‌تر شدن روباره خاکی، جابه‌جایی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در صورت وجود روباره خاکی، با افزایش فاصله، بزرگی نوسانات به سرعت کاهش می‌یابد. علت آن است که قسمت اعظم انرژی صرف غلبه بر اصطکاک میان ذرات و جابه‌جا کردن آن‌ها می‌شود. مواد سطحی حرکت امواج را تغییر می‌دهند و باعث می‌شوند تا امواج، طول موج بیشتر و فرکانس کمتری داشته باشند و بنابراین باعث افزایش واکنش و پتانسیل تخریب در ساختمان‌های مجاور می‌شوند. فرکانس نوسانات در معادن زغال‌سنگ سطحی در مقایسه با معادن روباز سنگ و انفجارهای عمرانی کمتر است (شکل ۲-۵). این پدیده به طول و ستون مواد منفجره، ترکیب ساختارهای زمین‌شناسی و وجود روباره خاکی بستگی دارد.



شکل ۲-۵- مقایسه فرکانس‌های لرزش در معادن زغال‌سنگ، روباز و انفجارهای عمرانی

۲-۲-۹- ویژگی‌های هندسی انفجار

ویژگی‌های طراحی هندسی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر لرزش‌های ناشی از انفجار دارند که مهم‌ترین آن‌ها در ادامه آمده است.

الف- قطر چال

در انفجارهایی که از چال‌های با قطر زیاد استفاده می‌شود وزن زیادی از خرج در چال جای می‌گیرد و باعث بالا رفتن وزن خرج در هر تاخیر می‌شود.

ب- ارتفاع پله

به منظور حصول خردایش بهتر و حذف مشکلات مربوط به ایجاد پاشنه^۱ و کاهش میزان لرزش باید تا حد امکان در طراحی،

نسبت $\frac{H}{B}$ ^۲ رعایت شود (H ارتفاع پله و B بارسنگ است). رعایت این نسبت باعث می‌شود تا لرزش کمتری ایجاد شود.

پ- بارسنگ^۲ و فاصله‌داری چال‌ها^۳

اگر اندازه بارسنگ بیش از مقدار بهینه باشد، گازهای حاصل از انفجار برای خرد و جابه‌جا کردن با مقاومت زیادی مواجه می‌شوند. این پدیده باعث می‌شود قسمتی از انرژی ماده منفجره به انرژی لرزه‌ای تبدیل شود و افزایش شدت لرزش را در پی داشته باشد. اگر بارسنگ کم باشد گازهای حاصل از انفجار با سرعت زیادی به سمت سطح آزاد حرکت می‌کنند. این عمل به مواد خرد شده ضربه می‌زند و آن‌ها را به صورت غیرقابل کنترل پرتاب می‌کند. علاوه بر این، پدیده لرزش هوا نیز اتفاق می‌افتد. فاصله‌داری چال‌ها نیز اثری شبیه روباره و بارسنگ دارد که اندازه آن به فاصله ردیفی چال‌ها وابسته است.

ت- اضافه حفاری

اگر اضافه حفاری بیش از اندازه لازم باشد درصد زیادی از انرژی مربوط به آن، صرف ایجاد لرزش در زمین می‌شود و باعث کاهش راندمان خواهد شد.

ث- طول گل‌گذاری^۴

اگر طول گل‌گذاری بیش از مقدار بهینه باشد به غیر از مشکلات خردایش، باعث افزایش میزان لرزش می‌شود.

ج- شیب چال

چال‌های مایل باعث توزیع مناسب‌تر انرژی در سطح پله و کاهش لرزش می‌شوند.

چ- خرج‌گذاری منقطع^۵

با استفاده از ۶۵ تا ۷۵ درصد خرج‌گذاری منقطع، خردایش بهبود می‌یابد و همچنین توزیع ابعاد نیز یکنواخت‌تر می‌شود. بنابراین، در مواردی مانند انفجار ثانویه (۲ الی ۱۰ برابر)، خرج ویژه و شدت لرزش زمین نیز کاهش می‌یابند.

۲-۳- عوامل موثر بر لرزش هوا

لرزش هوا نیز مانند لرزش زمین به عوامل مختلفی بستگی دارد که بعضی قابل کنترل و بعضی غیرقابل کنترل هستند. تاثیر این عوامل بر روی لرزش هوا در بعضی موارد مشابه لرزش زمین و در بعضی حالات دیگر به صورت معکوس است.

۲-۳-۱- زمان تاخیر

زمان تاخیر در مورد لرزش هوا نسبت به لرزش زمین تأثیری متفاوتی دارد به طوری که در بعضی شرایط با افزایش زمان تاخیر، میزان لرزش هوا بیشتر می‌شود. با توجه به این موضوع، در صورت ثابت بودن زمان تاخیر، رابطه میزان خرج در هر تاخیر با لرزش هوا به صورت مستقیم است و افزایش آن باعث افزایش لرزش هوا می‌شود.

- 1- Toe
- 2- Burden
- 3- Spacing
- 4- Stemming
- 5- Decker

۲-۳-۲- بارسنگ و فاصله‌داری چال‌ها

این دو عامل نیز تاثیر بسزایی بر لرزش هوا دارند. با کاهش بارسنگ و فاصله‌داری چال‌ها میزان لرزش هوا افزایش و با افزایش آن‌ها لرزش هوا کاهش می‌یابد.

۲-۳-۳- گل‌گذاری

تاثیر این عامل نیز بر لرزش هوا اغلب به صورت معکوس است به طوری که با افزایش میزان گل‌گذاری، لرزش هوا کاهش می‌یابد. نوع گل‌گذاری نیز تاثیر زیادی در تغییر میزان لرزش هوا دارد. در شرایطی که از مواد با چسبندگی کم یا موادی که تراکم مناسب را برای انسداد چال ایجاد نکنند استفاده شود، میزان لرزش هوا افزایش می‌یابد.

۲-۳-۴- عمق خرج

بسته به عمق خرج، پدیده لرزش هوا نیز به شدت تغییر می‌کند. در انفجارهای با عمق کم، مانند انفجارهای چال کوتاه، ثانویه، تسطیح و انفجارهایی که برای حذف پاشنه‌های به جا مانده انجام می‌شود، به دلیل عمق کم خرج، لرزش هوای زیادی ایجاد می‌شود. با افزایش عمق خرج‌گذاری (چال‌های عمیق) میزان لرزش هوا کاهش می‌یابد.

۲-۳-۵- روش آتشباری

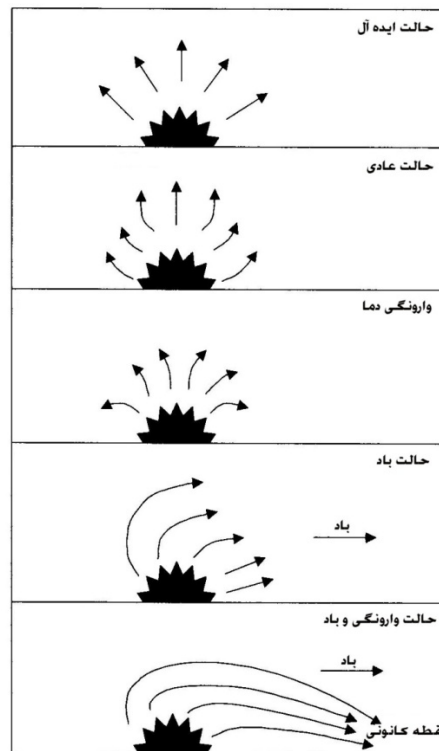
در آتشباری الکتریکی و همچنین روش نائل^۱ میزان لرزش هوا در مقایسه با روش فتیله انفجاری بسیار کمتر است. وجود یک ماده منفجره قوی در داخل فتیله انفجاری باعث می‌شود تا این فتیله در روی سطح زمین منفجر شود که افزایش لرزش هوا را به دنبال دارد. در این حالت اگر فتیله انفجاری بر روی سطح زمین به وسیله ماسه نرم پوشیده شود مقدار لرزش هوا کاهش می‌یابد.

۲-۳-۶- شرایط زمین‌شناسی

وضعیت مقاومت سنگ‌ها از نظر سستی و وجود شکستگی‌ها در توده سنگ تاثیر زیادی بر لرزش هوا دارد. در توده سنگ‌های ضعیف و با شکستگی‌های زیاد به دلیل خروج گاز حاصل از انفجار از داخل آن‌ها، میزان لرزش هوا افزایش می‌یابد.

۲-۳-۷- شرایط آب و هوایی

شرایط آب و هوا نیز تاثیر زیادی بر افزایش یا کاهش لرزش هوا دارد. یکی از موارد مهم در شرایط آب و هوا که تاثیر زیادی بر لرزش هوا دارد پدیده وارونگی دما است. در شرایط عادی، با افزایش ارتفاع در جو، دما کاهش پیدا می‌کند. در شرایطی که این روند معکوس شود یعنی با افزایش ارتفاع، دما افزایش پیدا کند، به آن پدیده وارونگی گفته می‌شود. سرعت صوت در زمانی که هوا گرم‌تر باشد افزایش و با سرد شدن هوا این سرعت کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن شرایط مختلف دما و مطالب ذکر شده در مورد تغییر سرعت امواج در هوا، حالات مختلفی را از انتشار امواج لرزه‌ای در هوا می‌توان در نظر گرفت. بر این اساس، شرایط مختلفی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است که بر روی نحوه انتشار امواج تاثیر می‌گذارند.



شکل ۲-۶- انتشار لرزش هوا تحت شرایط هواشناسی مختلف

۲-۴- عوامل موثر بر پرتاب سنگ

در پرتاب سنگ، امواج لرزه‌ای تاثیر کمتری دارند. پدیده پرتاب سنگ تحت تاثیر عوامل متعددی قرار دارد که در ادامه تشریح شده‌اند.

۲-۴-۱- عوامل زمین‌شناسی

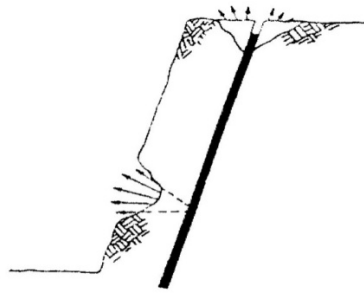
شکستگی‌ها و درزه‌ها در ایجاد و تشدید این پدیده تاثیر زیادی دارند به طوری که در سنگ‌های درزه‌دار و لایه‌ای، پرتاب سنگ نسبت به سنگ‌های توده‌ای و بدون درزه شدیدتر است. وجود فضاهای خالی و زمین‌های کارستی در انفجارها سبب تشدید این پدیده می‌شود. همچنین وجود لایه‌های ضعیف در توده سنگ باعث تشدید میزان پرتاب سنگ می‌شود که باید در این موارد دقت زیادی اعمال شود.

۲-۴-۲- وضعیت سطح انفجار

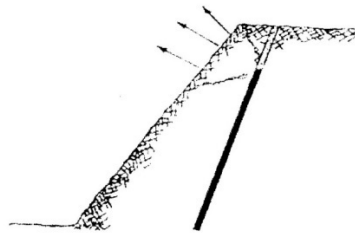
در زمان انفجار یک بلوک، سطح بلوک انفجاری باید کاملاً تمیز باشد و بر روی آن نباید به هیچ وجه قطعات سنگ وجود داشته باشد. وجود قطعات سنگ بر روی بلوک، پدیده پرتاب سنگ را به شدت افزایش می‌دهد.

۲-۴-۳- مواد منفجره و توزیع آن در چال

مواد منفجره با حجم گاز بیشتر (مثل آنفو) پرتاب سنگ بیشتری ایجاد می‌کنند. هندسه چال‌ها و توزیع مواد منفجره در آن‌ها از نقطه نظر پرتاب سنگ بسیار حایز اهمیت است. در حالت توزیع نامناسب خرج و همچنین حالتی که ستون جلوی خرج به صورت غیریکنواخت باشد، پرتاب سنگ افزایش می‌یابد (شکل‌های ۲-۷ و ۲-۸).



شکل ۲-۷- وضعیت توزیع نامناسب خرج در چال



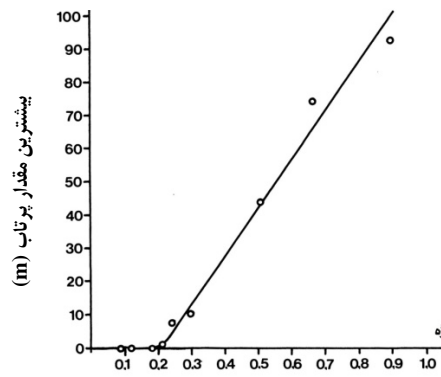
شکل ۲-۸- ستون غیریکنواخت سنگ جلوی خرج درون چال

۲-۴-۴- تاثیر توالی انفجار بر روند پرتاب سنگ

طراحی توالی انفجار از نظر پرتاب سنگ اهمیت زیادی دارد و تاخیرهای میلی‌ثانیه بهترین نتیجه را دارند. به این ترتیب با انفجار اولین ردیف و ردیف‌های بعدی، سنگ خرد شده ردیف اول به صورت یک پرده محافظتی از پرتاب سنگ جلوگیری خواهد کرد. اگر تاخیر بین ردیف‌ها و یا بین چال‌های یک ردیف بیش از اندازه باشد، این اثر محافظتی از بین می‌رود. در هر صورت، تاخیر بین چال‌های مجاور هم در یک ردیف نباید از ۱۰۰ میلی‌ثانیه تجاوز کند.

۲-۴-۵- تاثیر خرج ویژه

اکثر پرتاب‌های سنگ از دهانه چال به موازات محور چال انجام می‌گیرد. با افزایش خرج‌گذاری در چال نیز زاویه پرتاب سنگ افزایش می‌یابد. با اندازه‌گیری فاصله پرتاب سنگ و با داشتن میزان خرج ویژه، نمودار بیشترین پرتاب بر مبنای خرج ویژه قابل ترسیم است (شکل ۲-۹). با توجه به شکل ملاحظه می‌شود در مواردی که خرج ویژه از مقدار بحرانی آن (۰/۲ کیلوگرم بر متر مکعب) کمتر باشد هیچ‌گونه پرتاب سنگی وجود ندارد. اما از طرف دیگر، باید توجه داشت که مقدار خرج ویژه باید از حد بحرانی آن بیشتر باشد تا از شکسته نشدن سنگ‌ها و ایجاد تخته سنگ‌های بزرگ جلوگیری شود.



شکل ۹-۲- رابطه خروج ویژه ($\frac{kg}{m^3}$) ب سنگ و خرج ویژه

فصل ۳

اندازه‌گیری و پیش‌بینی میزان

پیامدهای نامطلوب

۱-۳- روش‌ها و ابزارها

رفتارسنجی لرزش ناشی از انفجار، یکی از روش‌های مناسب به منظور ارزیابی اثرات انفجار بر محیط اطراف است. دو نوع رفتارسنجی لرزش ناشی از انفجار تعریف شده که شامل میدان دور^۱ (دور از نقطه انفجار) و میدان نزدیک^۲ است. مرز میان ناحیه میدان نزدیک و میدان دور باید بر اساس نوع امواج لرزه‌ای مشخص شود. در میدان دور، زمان لازم برای استهلاک انرژی لرزه‌ای وجود دارد و به این ترتیب دامنه، فرکانس و محتوای انرژی آن پایین است. در میدان نزدیک به دلیل فاصله کم تا منبع لرزه، انرژی، دامنه و فرکانس امواج بالا است. هر قدر انفجار بزرگتر باشد منطقه میدان نزدیک گسترش پیدا خواهد کرد. محدوده میدان نزدیک اکثراً به صورت فاصله‌ای حدود یک طول خرج از چال انفجاری تعریف شده است. اما با توجه به کیفیت سنگ، نوع ماده منفجره و روش انفجار، این محدوده گسترش می‌یابد. محدوده میدان دور بر اساس محدوده میدان نزدیک مشخص شده و به محدوده فراتر از ناحیه میدان نزدیک اطلاق می‌شود (جدول ۱-۳).

جدول ۱-۳- نواحی رفتارسنجی انفجار

فاصله مقیاس شده*	فرکانس مورد انتظار (Hz)	حداکثر سرعت ذره مورد انتظار (mm/s)	ناحیه
< 0.5	۴۰۰۰-۲۰۰۰۰۰	۲۵۰۰-۱۰۰۰۰۰	میدان خیلی نزدیک
۰.۵-۲	۱۰۰۰-۴۰۰۰	۱۰۰۰-۲۵۰۰	میدان نزدیک
۲.۱-۱۰	۲۵۰-۱۰۰۰	۲۰۰-۱۰۰۰	میدان متوسط
> 10.1	< 250	< 200	میدان دور

* نسبت فاصله از نقطه انفجار بر حسب متر به ریشه دوم حداکثر خرج منفجر شده در یک تاخیر بر حسب کیلوگرم

۱-۱-۳- رفتارسنجی لرزش میدان دور

رفتارسنجی میدان دور با اهداف مختلفی انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- ارزیابی صدمه محیط از عملیات انفجار

- درجه‌بندی منحنی‌های برآورد دامنه و مقایسه بین سطوح انرژی نسبی ایجاد شده به وسیله روش‌های مختلف آتشیاری

در بعضی مواقع داده‌های میدان دور برای ارزیابی پتانسیل تخریب لرزش ناشی از انفجار بر روی سازه‌های مورد نظر استفاده می‌شود. در شرایطی که تعداد اندازه‌گیری زیادی اطراف نقطه انفجار انجام شده باشد می‌توان نقشه‌های هم‌تراز لرزش تهیه کرد که به منظور بررسی و مطالعه خواص میرایی محیط نیز استفاده می‌شود. در رفتارسنجی میدان دور، مشخصات لرزه دریافتی با توجه به فاصله آن تا نقطه انفجار نسبت به حالت میدان نزدیک تفاوت دارد. بر این اساس، دامنه، فرکانس و انرژی امواج آن کمتر است.

۲-۱-۳- رفتارسنجی میدان نزدیک

میدان نزدیک عموماً به محدوده واقع بین نقطه انفجار تا یک طول خرج اطلاق می‌شود. رفتارسنجی میدان نزدیک معمولاً

برای دو هدف متفاوت انجام می‌شود:

الف- ارزیابی رفتار میدانی انفجار (برای اهداف تشخیصی)

ب- اندازه‌گیری سطوح لرزش خالص (برای درجه‌بندی منحنی‌های برآورد دامنه یا ارزیابی و کنترل خسارت ناشی از انفجار) بعضی موارد تشخیصی برای نشان دادن مشکلات میدانی انفجار نظیر موارد زیر است:

- قطع شدن انفجار یا عدم انفجار خرج
- عملکرد نامناسب خرج یا انفجار ناقص آن
- افزایش‌های دامنه لرزش
- تاخیر نامناسب

۳-۱-۳- حسگرهای لرزه

یکی از موارد مهم رفتارسنجی لرزش، انتخاب حسگرهای لرزه است. این حسگرها در اولین قدم، داده خام را دریافت می‌کنند بنابراین اگر واکنش قابل اطمینانی در مقابل لرزش زمین نداشته باشند رفتارسنجی ناموفق خواهد بود. حسگرهای مختلفی برای این کار در دسترسند که دو نوع اصلی آن‌ها شامل شتاب‌سنج‌ها و لرزه‌سنج‌ها هستند.

الف- ملاحظات عمومی

حسگرهای لرزه به وسیله سه عامل اصلی زیر توصیف می‌شوند:

- حساسیت الکتریکی
- محدوده فرکانس
- محدوده دینامیکی

حساسیت الکتریکی یا به طور خلاصه حساسیت، خروجی الکتریکی یک حسگر را در واحد اندازه‌گیری آن بیان می‌کند (به طور مثال برای یک شتاب‌سنج بر حسب ولت بر متر بر مجذور ثانیه). حساسیت با تغییر فرکانس سیگنال اندازه‌گیری شده تغییر می‌کند. در این حالت، ارتباط بین خروجی الکتریکی و سطح لرزش تغییر می‌کند و عموماً باعث می‌شود تا لرزه‌نگاشت، مقادیر کمتری را نشان دهد. بنابراین، بسیار مهم است که محدوده فرکانس حسگر به صورت خطی عمل کند.

محدوده فرکانس، فاصله بین کمترین و بیشترین فرکانسی را نشان می‌دهد که در آن محدوده، حساسیت الکتریکی حسگر ثابت است.

محدوده دینامیکی که معمولاً بر حسب دسی‌بل عنوان می‌شود برابر است با نسبت دامنه حداکثر به دامنه حداقلی که به وسیله حسگر، قابل اندازه‌گیری است.

ب- شتاب‌سنج

شتاب‌سنج میزان شتاب یک لرزش را اندازه‌گیری می‌کند. در شتاب‌سنج یک جرم کوچک به نام جرم لرزه‌ای به یک جزو پیزوالکتریک متصل شده و خروجی الکتریکی را تحت نیروی اعمالی ایجاد می‌کند. خروجی الکتریکی صادر شده از شتاب‌سنج متناسب با دامنه نیروی اعمالی است. بر اساس جهت پلاریزاسیون پیزوالکتریک می‌توان واکنش نسبت به نیروهای فشاری یا برشی را اندازه‌گیری کرد. به علت این که اجزا پیزوالکتریک دارای خروجی الکتریکی خیلی ضعیفی هستند برای رسیدن به ولتاژ خروجی مناسب باید از یک سیستم تقویت ولتاژ استفاده کرد. حساسیت الکتریکی شتاب‌سنج‌ها بر حسب mV/g یا $mV/m/s^2$ یا پیکو کولمب

بیان می‌شود. محدوده دینامیکی یک شتاب‌سنج گسترده بوده که به معنی خطی بودن خروجی الکتریکی آن در مقابل ورودی لرزشی در یک محدوده وسیعی از دامنه‌ها است.

پ- لرزه‌سنج

لرزه‌سنج نوع دیگری از ابزار رفتارسنجی لرزش است که در مقایسه با شتاب‌سنج‌ها به جای حساسیت به شتاب به سرعت لرزه حساسیت نشان می‌دهد.

۳-۱-۴- انتخاب نوع حسگر مناسب

یکی از نکات مهم قبل از اندازه‌گیری لرزش ناشی از انفجار، نوع حسگر مورد استفاده است. اولین نکته‌ای که باید در نظر گرفته شود این است که اندازه‌گیری‌ها برای کدام یک از میدان‌ها، نزدیک یا دور، انجام می‌شود. بر اساس مطالب ذکر شده در مورد مشخصات لرزش‌ها در این دو ناحیه یا میدان، تجهیزات لازم برای رفتارسنجی نیز تغییر می‌کند.

در میدان دور، دامنه، فرکانس و محتوای انرژی پایین است. در این حالت عموماً لرزه‌سنج‌ها بهترین انتخاب هستند زیرا برای فرکانس‌ها و دامنه‌های پایین تا متوسط طراحی شده‌اند. علاوه بر این، کاربردی ساده و هزینه نسبتاً پایین دارند. در شرایط میدان دور، از شتاب‌سنج‌ها نیز (انواع فرکانس پایین) می‌توان استفاده کرد. در میدان نزدیک، در محدوده نصف تا دوسوم طول خرج، شتاب‌سنج‌ها مناسب‌ترین گزینه هستند زیرا فرکانس‌ها و دامنه‌های بالایی در این محدوده ایجاد می‌شوند. هر چه قدر فاصله تا نقطه انفجار کمتر شود استفاده از شتاب‌سنج‌های با کارایی بالاتر مورد نیاز است که در نتیجه هزینه رفتارسنجی نیز افزایش می‌یابد. در محدوده بین میدان نزدیک و دور، انتخاب صحیح نوع حسگر مشکل است اما پیشنهاد می‌شود تا در این محدوده از شتاب‌سنج‌ها استفاده شود. جدول ۳-۲ بعضی توصیه‌ها برای انتخاب نوع حسگر و شرایط ثبت در نواحی مختلف ارائه شده است. در انتخاب حسگر، شتاب‌سنج یا لرزه‌سنج، باید ویژگی‌های حسگر و امواج لرزه‌ای مورد بررسی مطابقت داشته باشند.

جدول ۳-۲- نوع حسگر، محدوده دینامیکی و آهنگ نمونه‌برداری توصیه شده برای رفتارسنجی لرزش در فواصل مختلف

ناحیه	نوع حسگر توصیه شده	محدوده دامنه توصیه شده	فرکانس توصیه شده (kHz)
میدان خیلی نزدیک	شتاب‌سنج	۱۰۰۰g-۱۰۰۰۰g	۱۰-۵۰
میدان نزدیک	شتاب‌سنج	۵۰۰g-۱۰۰۰g	۴-۱۰
میدان متوسط	ژئوفون	۱۰۰۰ mm/s	۲-۴
میدان دور	ژئوفون	۵۰۰ mm/s	۱-۲

۳-۱-۵- ملاحظات میدانی

الف- موقعیت حسگر

گام بعدی در ثبت داده‌های لرزه‌ای، موقعیت حسگر است. نصب حسگر بر روی سطح توده سنگ یا داخل گمانه و همچنین موقعیت حسگرها نسبت به نقطه انفجار از جمله موارد مهم در این زمینه است.

ب- رفتارسنجی سطحی

یک راه ساده، سریع و اقتصادی برای رفتارسنجی لرزش‌های ناشی از انفجار، نصب حسگر سطحی است. این روش معمولاً برای انفجارهای ساده، ارزیابی رفتار میدانی انفجار اصلی و یا داده‌های محیط میدان دور مناسب است. در این حالت، نیازی به هیچ گونه

حفاری نیست و با ملاحظات کمی قابل انجام است. در این روش، نصب و جمع کردن حسگر بعد از ثبت داده‌ها به سرعت انجام می‌شود. با توجه به همه این مزایا، در شرایطی که داده‌های دقیق از ویژگی‌های انفجار یا درجه‌بندی نمودارهای میرایی مد نظر باشد، به علت اثرات سطحی، روش نصب سطحی پیشنهاد نمی‌شود. در این حالت، سطح توده سنگ در واقع مرز بین دو محیط سنگی و هوا است که ویژگی‌های انتشار لرزه‌ای متفاوتی دارند. نوع امواج مورد بررسی نیز اهمیت قابل توجهی دارد به طوری که اگر نیاز به ثبت و بررسی امواج سطحی مانند رابلی و لاو باشد باید حسگر به صورت سطحی نصب شود.

پ- رفتارسنجی داخل گمانه‌ای

رفتارسنجی داخل گمانه‌ای نسبت به روش سطحی به آماده‌سازی، صرف وقت و هزینه بیشتری نیاز دارد. عموماً نصب حسگر در این روش با دست امکان‌پذیر نیست و باید از تجهیزاتی مانند لوله‌ها، رادها و شیلنگ‌های هیدرولیکی استفاده کرد. در رفتارسنجی داخل گمانه‌ای، تجهیزات اغلب به صورت دائمی نصب می‌شوند و بازایی آن‌ها امکان‌پذیر نیست که این امر باعث بالا رفتن هزینه رفتارسنجی می‌شود. همچنین حسگرها در داخل گمانه با مشکلات متعددی از جمله وجود آب و رطوبت مواجه هستند. با همه این مشکلات، نصب حسگر داخل گمانه‌ای بهترین روش برای حالتی است که نیاز به اندازه‌گیری دقیق حداکثرهای دامنه لرزش، محتوای فرکانسی و سطوح انرژی باشد.

ت- تعداد و موقعیت ایستگاه‌های ثبت

تعداد و موقعیت ایستگاه‌های ثبت لرزش از جمله مسایل مهم رفتارسنجی لرزش هستند. وقتی اطلاعات کمی از توده سنگ در دسترس باشد، حداقل دو ایستگاه ثبت باید مورد استفاده قرار گیرد. در صورت امکان، ایستگاه‌ها باید در راستای ۹۰ درجه نسبت به بلوک انفجاری قرار گیرند تا در صورت وجود ناهمسانگردی در خواص انتشار لرزه‌ای توده سنگ، داده‌های مناسب ثبت شود. همچنین وقتی فضاهای خیلی بزرگی به علت انفجار در توده سنگ ایجاد می‌شوند حداقل دو نقطه ثبت برای اجتناب از اثرات سایه‌ای باید در نظر گرفته شود.

ث- فاصله از نقطه انفجار

فاصله نقطه ثبت تا انفجار به عوامل متعددی وابسته است و با تغییر این عوامل، فاصله مناسب، کم یا زیاد می‌شود. در جدول ۳-۳ عوامل موثر بر فاصله نقطه ثبت و چگونگی تاثیر آن‌ها برای میدان نزدیک ارائه شده است.

جدول ۳-۳- تاثیر عوامل مختلف روی فاصله ایستگاه‌های رفتارسنجی لرزش تا نقطه انفجار

عوامل اصلی	عوامل فرعی	تغییرات پارامتر	تغییر موقعیت ایستگاه ثبت از نقطه انفجار	
زمین‌شناسی	چگالی	افزایش	دورتر	
		سرعت امواج لرزه‌ای در محیط	دورتر	
	ضعف ساختاری	فراوانی	افزایش	نزدیک‌تر
		جهت	راستای ۹۰ درجه با مسیر	نزدیک‌تر
طرح انفجار	قطر چال‌ها	افزایش	دورتر	
		شدگی عدم جفت	افزایش	نزدیک‌تر
		خرج‌گذاری منقطع	افزایش	نزدیک‌تر
	هامحدودکننده	تاخیرهای بین ردیف	افزایش	نزدیک‌تر
		چاشنی‌های مورد استفاده	هم‌پوشانی کمتر	نزدیک‌تر
		گل‌گذاری	افزایش	دورتر
		بارسنگ-فاصله ردیفی	افزایش	دورتر

های رفتارسنجی لرزش تا نقطه انفجار ادامه جدول ۳-۳- تاثیر عوامل مختلف روی فاصله ایستگاه

عوامل اصلی	عوامل فرعی	تغییرات پارامتر	تغییر موقعیت ایستگاه ثبت از نقطه انفجار
نوع ماده منفجره	چگالی	افزایش	دورتر
	سرعت انفجار	افزایش	دورتر
	قدرت ماده منفجره	افزایش	دورتر

۳-۱-۶- نصب حسگر

نصب حسگر در هر دو حالت سطحی و داخل گمانه‌ای به سه روش اصلی زیر انجام می‌شود:

- اتصال به کمک رزین یا سیمان

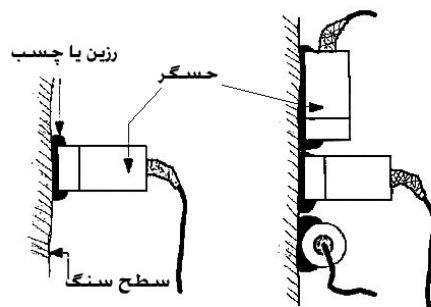
- اتصال مکانیکی (پیچ کردن)

- وزنه‌ای

الف- نصب سطحی

در نصب سطحی، حسگر باید بر روی سنگ سخت نصب شود. بنابراین باید در گام اول، سنگ محل نصب حسگر را آزمایش کرد تا شکستگی یا حفره‌ای نداشته باشد.

- اتصال به کمک رزین یا سیمان: در این روش، حسگر به کمک چسب‌های رزینی قوی یا سیمان بر روی سنگ نصب می‌شود. به منظور اتصال محکم و اجتناب از جدا شدن حسگر در اثر انفجار باید سطح سنگ تمیز و خشک شود. قبل از اندازه‌گیری باید از قدرت کافی اتصال اطمینان حاصل کرد (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱- روش نصب حسگر به کمک رزین بر روی سطح سنگ

مزیت این روش، ثابت بودن کیفیت سیگنال‌های ثبت شده است که فاقد اثرات اعوجاجی خارجی است.

- روش اتصال مکانیکی (پیچ کردن): در این روش یک پیچ‌سنگ در داخل یک چال نصب و سپس حسگر بر روی انتهای پیچ بسته می‌شود. بر روی یک پیچ می‌توان حتی چند حسگر را برای ثبت لرزش به صورت سه مولفه‌ای نصب کرد. این روش دارای ایمنی بالایی نسبت به جدا شدن حسگر در صورت نزدیک بودن به نقطه انفجار است. مهم‌ترین مشکل این روش واکنش سیستم اتصال مکانیکی به لرزش‌های خارجی است. چون این سیستم‌ها خیلی صلب نیستند و امکان ایجاد پدیده تشدید وجود دارد.

- روش وزنه‌ای: در این روش، یک جرم سنگین بر روی حسگر قرار می‌گیرد و مانع از جابه‌جایی و جدا شدن آن از زمین می‌شود. کاربرد اصلی این روش در اندازه‌گیری‌های میدان دور است. عموماً، استفاده از کیسه ماسه به عنوان جرم مورد نیاز در این روش متداول است. یکی از مشکلات این روش، نصب حسگر در سطوح با شیب زیاد است.

ب- نصب داخل گمانه‌ای

این روش نسبت به روش سطحی زمان و هزینه بالاتری را نیاز دارد. در این روش نیاز به حفاری است و حسگر درون لوله‌های پی‌وی‌سی قرار داده شده و داخل گمانه نصب می‌شود.

- اتصال به کمک رزین یا سیمان (روش چسباندن): روش چسباندن بهترین نتایج را برای گرفتن اطلاعات لرزه‌ای ایجاد می‌کند. اگر اتصال به خوبی برقرار شود بدون هیچ اثر تشدید و نوسانی عملیات ثبت انجام می‌شود. در این روش، لوله حامل حسگر به داخل گمانه فرستاده می‌شود و با اتصال لوله‌های دیگر، حسگر به انتها یا نقطه دلخواه از گمانه منتقل خواهد شد. پس از انتقال حسگرها به نقطه تعیین شده در داخل گمانه، به وسیله رزین یا سیمان به دیواره گمانه متصل می‌شوند. در نهایت تمام لوله‌ها نیز از سیمان پر شده و پوشیده می‌شوند. در این روش امکان بازیافت حسگرها وجود ندارد.

- روش اتصال مکانیکی (پیچ کردن): روش مکانیکی دارای این مزیت است که قابلیت بازیابی حسگر وجود دارد. انواع پیچ‌سنگ‌های اصطکاکی و منبسط شونده در این روش کاربرد دارند.

- روش وزنه‌ای: در این روش، حسگر به انتهای گمانه هدایت و بر روی آن مصالح با تراکم کم ریخته می‌شود. به منظور اجتناب از وارد شدن رطوبت به حسگر، در انتهای گمانه مقداری ماسه ریخته می‌شود و سپس حسگر بر روی آن قرار می‌گیرد. در این روش، حسگرها باید ضد آب باشند.

۲-۳- برآورد میزان پیامدها

۱-۲-۳- برآورد لرزش زمین

به منظور کمی کردن پیامدهای نامطلوب انفجار، هر یک از پیامدها با یک سری مشخصه‌ها یا مقادیر بیان‌کننده میزان و شدت آن‌ها معرفی می‌شوند. لرزش زمین ناشی از انفجار اکثراً به وسیله دو فاکتور حداکثر سرعت ذره و فرکانس غالب مطرح می‌شود. فاکتور حداکثر سرعت ذره برای هر نقطه به کمک دستگاه‌های لرزه‌نگار ثبت و محاسبه می‌شود. به این منظور با استفاده از لرزه‌سنج‌های سه مولفه‌ای و بر اساس تحلیل لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در حیطه زمان، سرعت ذره برای هر مولفه و در نتیجه برآیند سرعت ذره با عنوان حداکثر سرعت ذره در هر نقطه محاسبه می‌شود. فاکتور دیگری که تاثیر زیادی بر نتایج تحلیل‌ها دارد و به عنوان مبنای بررسی‌ها در تعیین میزان خسارت شناخته شده است، فاکتور فرکانس غالب است. فرکانسی از یک لرزه‌نگاشت که دارای بیشترین محتوای انرژی باشد را فرکانس غالب گویند. به دلیل این که امواج ثبت شده دارای فرکانس‌های متعددی هستند برای تحلیل مسایل از فرکانس غالب استفاده می‌شود. مقدار فرکانس غالب از تحلیل فوریه لرزه‌نگاشت به دست می‌آید. برآورد لرزش زمین ناشی از انفجار به صورت تعیین حداکثر سرعت ذره در یک نقطه مشخص انجام می‌شود که تعیین این پارامتر به دو صورت ثبت لرزش و یا برآورد از طریق روابط تئوری و تجربی امکان‌پذیر است.

به دلیل ناهمگنی سنگ‌ها، تعیین دقیق میزان لرزش در فاصله مشخص از انفجار بدون ثبت آن امکان‌پذیر نیست. بدیهی است که به دلیل تغییرات موجود در امتداد و شیب لایه‌بندی و تورق در لایه‌ها، به روش‌های مختلف، میرایی امواج لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. همچنین شیستوزیته، فاصله بین صفحات شکستگی موجود و نوسانات موجود در سطح آب‌های زیرزمینی بر روی لرزش تاثیر می‌گذارند. عوامل دیگری مانند هندسه انفجار، اجزای تشکیل دهنده ماده منفجره، میزان تماس بین ماده منفجره و توده سنگ و

فاصله تاخیر بین ردیف چال‌ها بر لرزش ایجاد شده در یک نقطه مشخص موثرند. بر این اساس، تعیین دقیق لرزش یا به عبارتی حداکثر سرعت ذره در یک نقطه بدون ثبت دقیق لرزش امکان‌پذیر نیست.

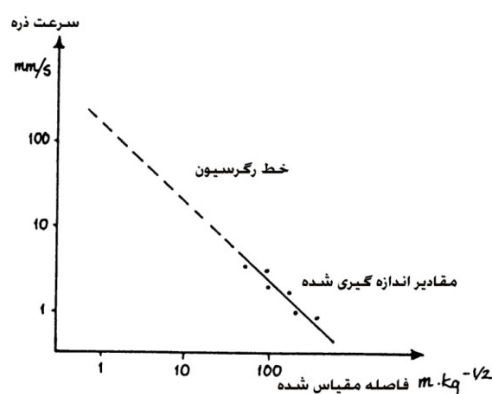
به منظور برآورد حداکثر سرعت ذره در یک نقطه باید عوامل متعددی را در نظر گرفت. روابطی که در برگیرنده اثر تمام عوامل باشند خیلی پیچیده است و کاربرد عملی آن‌ها با مشکل مواجه می‌شود. بنابراین، برای برآورد لرزش، روابط ساده‌ای ارائه شده و سعی شده است تا اثر عوامل دیگر به صورت ضرایب در این روابط اعمال شود. رابطه پیشنهادی که ارتباط بین سرعت ذره (V)، وزن خرج در هر تاخیر (Q) و فاصله از محل انفجار (D) را نشان می‌دهد به صورت زیر است:

$$V = K(D/Q^\gamma)^{-B} \quad (1-3)$$

که در آن K و B ضرایبی برای اعمال عوامل دیگر است. در رابطه ۱-۳ نسبت D/Q^γ به عنوان فاصله مقیاس شده شناخته می‌شود. بسته به شرایط یک‌دوم یا یک‌سوم است.

برای استفاده از رابطه ۱-۳ و به منظور برآورد میزان لرزش باید ضرایب K و B در نزدیکی مکان‌های انفجار تعیین شوند. به منظور تعیین قابلیت انتقال توده سنگ و محاسبه مقدار خرج اصلی در انفجارها، مقدار کمی خرج در یک انفجار آزمایشی منفجر می‌شود. در این حالت، بهتر است که آزمایش انفجار بین مکان مورد نظر و انفجار اصلی انجام شود تا نحوه خسارت‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد. در بعضی موارد، شتاب، سرعت و جابه‌جایی ذره به تنهایی برای تعیین شدت لرزش کافی نیستند بنابراین مدت زمان لرزش نیز باید برای تحلیل‌های بعدی ثبت و ذخیره شود. انفجار آزمایشی در مواردی انجام می‌شود که قبل از انفجارهای اصلی و بزرگ نیاز به برآورد لرزش باشد در غیر این صورت، در اکثر موارد با ثبت تعدادی از انفجارهای اصلی معدن و تحلیل نتایج، روابط تجربی برای ایجاد مدل و برآورد لرزش به دست می‌آیند.

پس از ثبت سرعت‌های لرزش باید بیشترین مقادیر آن‌ها اندازه‌گیری و بر روی نموداری لگاریتمی مطابق آنچه در شکل ۲-۳ نشان داده شده، ترسیم شود. همچنین باید خط رگرسیون به صورت دقیق بین این نقاط ترسیم شود.



شکل ۲-۳. برازش تغییرات سرعت نسبت به فاصله مقیاس شده در یک نمودار لگاریتمی برای برآورد لرزش

با ترسیم نمودار حداکثر سرعت ذره بر اساس فاصله مقیاس شده $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ ، به نظر می‌رسد که در مواردی فاصله زیادی بین نقاط و خط رگرسیون رسم شده به وجود می‌آید. دلیل این فاصله، عوامل متعددی هستند که به طور مستقیم در فاصله مقیاس شده لحاظ

نمی‌شوند. از این میان می‌توان عامل‌هایی نظیر شرایط زمین‌شناسی، شرایط آب و هوایی، نوع خرج، ویژگی‌های توده سنگ، زمان تاخیر، نوع امواج و خطا در اندازه‌گیری و تحلیل‌های مربوط به آن‌ها را نام برد.

۳-۲-۲- مدل‌های عمومی برآورد لرزش زمین ناشی از انفجار

بر اساس عوامل مهم تاثیرگذار بر لرزش، مدل‌های متعددی ارائه شده‌اند. در این روابط، فاصله از محل انفجار با نسبتی از وزن خرج، تقسیم‌بندی می‌شود که به آن فاصله مقیاس شده^۱ می‌گویند. بر اساس هندسه خرج، فاصله مقیاس شده به صورت نسبت فاصله

(D) به ریشه دوم یا سوم وزن خرج (Q) بیان می‌شود $(Q^{1/3}, Q^{1/2})$. در مواردی که نسبت طول به قطر خرج زیاد باشد مانند اکثر خرج‌گذاری‌ها در معادن سطحی، هندسه خرج را استوانه‌ای و فاصله مقیاس شده را با ریشه دوم وزن خرج و در شرایطی که نسبت طول به قطر خرج زیاد نباشد هندسه خرج را کروی و فاصله مقیاس شده را با ریشه سوم وزن خرج در نظر می‌گیرند. شکل عمومی مدل‌های ارائه شده به ترتیب برای هندسه استوانه‌ای (رابطه ۲-۳) و کروی (رابطه ۳-۳) به صورت زیر است:

$$V = K \left(\frac{D}{Q^{1/2}} \right)^{-B} \quad (2-3)$$

$$V = K \left(\frac{D}{Q^{1/3}} \right)^{-B} \quad (3-3)$$

که در آن‌ها V حداکثر سرعت ذره، Q حداکثر وزن خرج در یک تاخیر، D فاصله از محل انفجار، K و B ثابت‌های مکان هستند. امروزه در اکثر موارد، تقارن خاصی برای خرج‌گذاری در نظر گرفته نمی‌شود و از یک معادله عمومی به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$V = K \times D^{-B} \times Q^A \quad (4-3)$$

که در آن A، K و B ثابت‌های تجربی هستند و به وسیله تحلیل رگرسیونی دو متغیر مستقل تعیین می‌شوند.

در صورت استفاده از چاشنی‌های تاخیری (رله‌های میلی‌ثانیه)، وزن خرج (Q) در نظر گرفته شده در روابط ۲-۳ تا ۴-۳، برابر حداکثر خرج منفجر شده در هر تاخیر در یک نوبت انفجار است. در اکثر مدل‌های ارائه شده برای برآورد لرزش زمین، عوامل معدودی تاثیر داده شده‌اند اما بعضی عوامل دیگر نیز تاثیر بسزایی در میزان لرزش دارند که تاثیر آن‌ها به صورت ضرایب مشخص می‌شود. اثر مربوط به بعضی از این عوامل به صورت میرایی غیرالاستیک در کاهش شدت لرزش ظاهر می‌شود. در بعضی از این روابط ضریبی مربوط به این اثر (میرایی) در نظر گرفته شده است.

الف- فاکتور میرایی غیرالاستیک

اثرات محیط‌های غیرالاستیک در طی انتشار امواج باعث اتلاف انرژی می‌شوند. برای میرایی غیرالاستیک عوامل متعددی وجود دارد. تمام این اثرات را نمی‌توان در قالب یک فرم بسته همراه با جزییات ارائه کرد. به منظور اعمال اثر میرایی ماده غیرالاستیک به عنوان یک عامل غالب در برآورد لرزش، استفاده از یک تابع نزولی نمایی توصیه می‌شود. بر این اساس، معادلات مربوط به ریشه دوم و سوم خرج با تلفیق فاکتور میرایی غیرالاستیک $(e^{-\alpha D})$ به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$V = K(D/Q^{0.5})^{-B} e^{-\alpha D} \quad (5-3)$$

$$V = K(D/Q^3)^{-B} e^{-\alpha D} \quad (3-6)$$

که در آن‌ها K , B و α ثابت‌های تجربی هستند و α فاکتور میرایی غیرالاستیک است.

ب- مقادیر ثابت‌های تجربی برای توده سنگ‌های مختلف

مقادیر ثابت مدل‌های برآورد لرزش به شرایط متعددی وابسته‌اند و برای هر مکان به طور مستقل تعیین می‌شوند. تاثیر عوامل دیگر به غیر از فاصله و خرج در این ضرایب نهفته است. بنابراین، این ضرایب برای استفاده در شرایط و مکان‌های مختلف نیاز به تصحیح دارند. به منظور استفاده اولیه از این مدل‌ها، ضرایب مربوط به انواع مختلفی از توده سنگ‌ها شامل سنگ آهک (درزه‌دار و خیلی درزه‌دار)، گرانیت، سنگ آهن، زغال‌سنگ، دولومیت، بازالت، ماسه‌سنگ (هوازده) و ماسه‌سنگ-آبرفت مربوط به معادلات ۳-۲ تا ۳-۶ در جداول ۳-۴ تا ۳-۱۱ ارایه شده است. این مقادیر ثابت به هیچ وجه قابل تعمیم به تمام محیط‌ها نیستند و اعتبار آن‌ها به مکانی که این ضرایب برای آن‌ها به دست آمده است محدود می‌شود. برای استفاده از مدل‌های برآورد، باید بر اساس تحلیل داده‌های انفجاری و لرزه‌ای مکان مورد نظر، مقادیر ثابت تجربی را به دست آورد. بنابراین مقادیر درج شده در جدول‌های ۳-۴ تا ۳-۱۱ فقط به عنوان مثال و مقدار پیشنهادی اولیه ارایه می‌شود و نمی‌توان از آن‌ها به عنوان مقادیر بهینه و نهایی در توده سنگ مشابه استفاده کرد.

جدول ۳-۴- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای سنگ آهک

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۱,۹۵۴۸۱	۳۳۵۲,۶۳	-	-
۳-۳	۱,۸۳۰۹۵	۱۰۵۲۰,۳۰	-	-
۴-۳	۱,۸۹۶۵۰	۷۸۹۰,۲۲	۰,۷۳۸۷۰۵	-
۵-۳	۱,۰۱۰۷۷	۵۴۳,۷۳	-	۰,۰۰۳۳۳۰
۶-۳	۱,۰۵۵۳۰۱	۱۲۶۸,۵۳	-	۰,۰۰۲۷۸۵

جدول ۳-۵- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای گرانیت

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۱,۵۳۳۱۱	۵۷۴,۱۹	-	-
۳-۳	۱,۶۹۱۳۱	۱۲۶۵,۰۹	-	-
۴-۳	۱,۳۸۳۵۱	۱۸۶,۷۵	۰,۹۴۵۹۲۴	-
۶-۳	۲,۴۹۴۴۴	۶۰۶۸,۲۰	-	۰,۰۲۵۷۵۳

جدول ۳-۶- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای سنگ آهن

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۱,۸۰۱۳۸	۳۰۳,۷۳۶	-	-
۳-۳	۱,۷۲۱۱۶	۲۴۷۱,۱۳۰	-	-
۴-۳	۱,۵۸۸۱۸	۴۹۵,۲۲۱	۰,۰۹۱۳۰۵	-
۵-۳	۱,۱۸۰۶۷	۱۵۱,۵۳۸	-	۰,۰۰۷۷۸
۶-۳	۱,۱۹۹۸۸	۷۰۱,۲۶۵	-	۰,۰۰۰۶۷۲

جدول ۳-۷- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای زغال‌سنگ

شماره رابطه	B	K	A	α
-------------	---	---	---	----------

-	-	۲۶۶,۵۲۳	۱,۴۰,۷۶۱	۲-۳
-	-	۸۶۴,۰۶۶	۱,۴۹,۳۳۵	۳-۳
-	۱,۰۳۶۵۹	۳۰,۴۷۷	۱,۲۱,۱۲۲	۴-۳

جدول ۸-۳- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای دولومیت

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۱,۵۰,۸۴۸	۱۷۴,۲۴۴	-	-
۳-۳	۱,۴۸,۹۹۴	۲۵۲,۸۱۱	-	-
۴-۳	۱,۵۰,۸۵۱	۱۷۰,۵۲۳	۱,۰۳۴۲	-
۵-۳	۱,۰۰,۷۴۵	۱۱۱,۲۰۳	-	۰,۲۴۳۵۶۵
۶-۳	۱,۰۰,۹۵۵	۱۴۲,۱۷۳	-	۰,۰۲۳۷۰۶

جدول ۹-۳- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای بازالت

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۲,۱۵۲	۸۹۵,۶۴۴	-	-
۳-۳	۲,۲۶۰	۴۷۶۵,۴۷۰	-	-
۴-۳	۲,۱۷۱	۱۱۳۷,۶۶۰	۱,۰۳۴۲	-
۵-۳	۱,۷۳۹	۵۸۷,۶۷۹	-	۰,۰۰۷۳۳
۶-۳	۲,۴۵۶	۶۷۴۵,۲۱۰	-	۰,۰۰۳۱۸

جدول ۱۰-۳- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای ماسه‌سنگ

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۰,۸۲۵۸۸	۵۰,۴۲۳۴	-	-
۳-۳	۰,۸۸۶۰۳	۱۴۴,۴۰۴۰	-	-
۴-۳	۰,۷۰۸۵۷	۸,۳۴۲۵	۰,۶۰۳۱۶۹	-

جدول ۱۱-۳- ثابت‌های تجربی برای معادلات مختلف موجود برای ماسه‌سنگ سست

شماره رابطه	B	K	A	α
۲-۳	۱,۹۸۰,۱۷	۱۴۸۳,۴۸	-	-
۳-۳	۲,۰۳۱۴۹	۷۲۴۳,۸۰	-	-
۴-۳	۲,۰۴۱۷۸	۳۵۰,۱۴۶۰	۰,۳۲۵۲۷۷	-
۵-۳	۱,۲۳۲۰۰	۶۹۷,۴۱	-	۰,۰۰۳۰۴۸
۶-۳	۱,۸۰۰۱۴	۴۷۹۶,۴۱	-	۰,۰۱۰۲۷۴

پ- مدل تحلیلی - تجربی

در بعضی مدل‌های برآورد، عوامل متعددی در نظر گرفته می‌شود. یک نمونه از این مدل‌ها به صورت تحلیلی- تجربی است که در ادامه ارائه شده است. این مدل در دو قسمت توسعه داده شده است که قسمت اول آن به طور تحلیلی، سرعت قائم ذره در روی

سطح را در هر فاصله‌ای از چال انفجاری ارزیابی می‌کند. قسمت دوم مدل مربوط به محاسبه حداکثر فشار خرج روی دیواره چال است. در این مدل ویژگی‌های مواد منفجره، خصوصیات توده سنگ و مشخصات بارگذاری خرج در نظر گرفته شده است:

(۷-۳)

$$V_v = \frac{2K_1 P_D r_1^2 (r_1/r_2)^{-\Gamma\alpha}}{\rho_1 C_p (Q^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

(۸-۳)

$$K_1 = \frac{V_D \rho_2}{\rho_1 C_p}$$

(۹-۳)

$$P_D = \frac{1}{2} \delta_1 \left[\frac{10^3 \left(\frac{Q}{K_2} \right)^{\frac{1}{3}}}{K_3 r_2} \right]^2$$

هنگامی که چال انفجاری حاوی بیش از یک نوع ماده منفجره باشد مقادیر V_D و ρ_2 به عنوان میانگین ساده مقادیر مربوط به آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

نمادهای به کار رفته در روابط اشاره شده به شرح زیر است:

V_v : حداکثر سرعت قائم ذره (mm/S)

K_1 : امیدانس ماده منفجره تقسیم بر امیدانس سنگ

K_2 : ثابت تناسب برابر ۱ برای اکثر سنگ‌ها

K_3 : فاکتور خرج ویژه (kg/cm^3)

ρ_1 : چگالی سنگ (g/cm^3)

C_p : سرعت موج طولی (فشاری) در سنگ (m/s)

ρ_2 : چگالی ماده منفجره (g/cm^3)

V_D : سرعت انفجار ماده منفجره (m/s)

P_D : حداکثر فشار خرج (MPa)

r_1 : شعاع خرج (mm)

r_2 : شعاع چال (mm)

l : عمق مرکز ستون ماده منفجره از سطح (m)

x : فاصله محل اندازه‌گیری از چال انفجاری (m)

Q : وزن ماده منفجره در یک چال انفجاری (Kg)

δ_1 : مقاومت کششی سنگ (MPa)

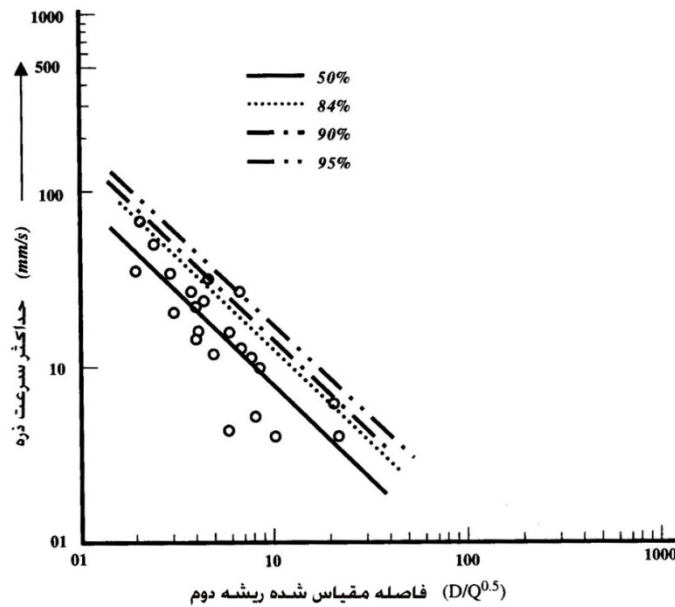
Γ : پارامتر تقارن خرج (۲ برای خرج استوانه‌ای و ۳ برای خرج کروی)

α : یک ثابت ماده منفجره بین ۱٫۲ و ۱٫۵

ت- سطوح اطمینان مدل‌ها

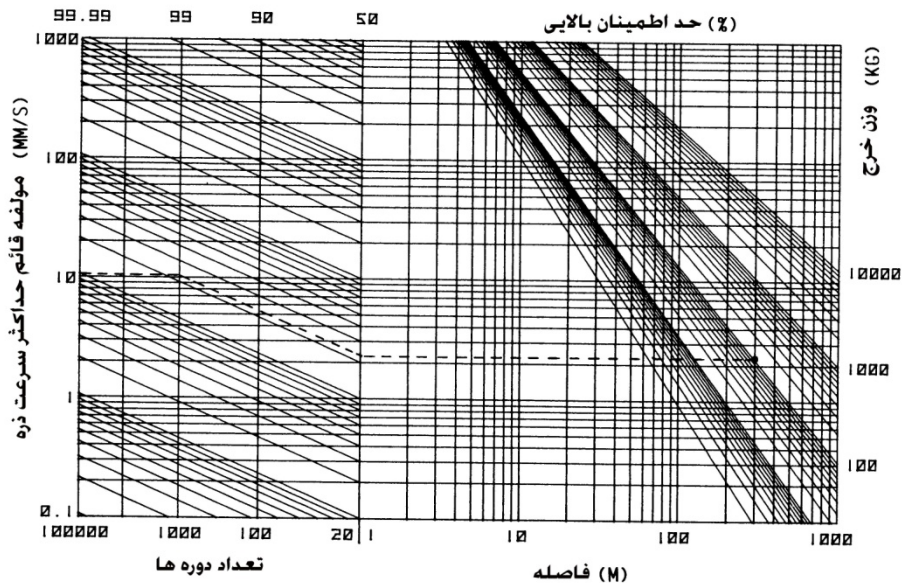
به منظور ایجاد مدل‌های برآورد حداکثر سرعت ذره در اکثر موارد از روش رگرسیون چند متغیره استفاده می‌شود. هر معادله رگرسیون که با روش کمترین مربعات به دست آمده باشد نشان دهنده این است که مقدار حداکثر سرعت ذره واقعی با احتمال ۵۰ درصد، بالاتر از مقدار پیش‌بینی شده است. به منظور بهبود سطح اطمینان، می‌توان خط رگرسیون را در مقیاس لگاریتمی- لگاریتمی

به موازات خود به سمت بالا حرکت داد. اگر خط به اندازه خطای استاندارد به سمت بالا جابه‌جا شود، ۸۴ درصد مقادیر واقعی زیر خط قرار می‌گیرند. به طور مشابه اگر حرکت به سمت بالا به اندازه ۱٫۶۵ برابر انحراف استاندارد باشد، سطح اطمینان به ۹۵ درصد افزایش خواهد یافت (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳- نمودار لگاریتمی حداکثر سرعت ذره نسبت به فاصله مقیاس شده در سطوح اطمینان مختلف

اگر به جای استفاده از رگرسیون میانه (رگرسیونی که ۵۰٪ از نقاط را در برمی‌گیرد) از رگرسیونی استفاده شود که سطح اطمینان بالاتری نسبت به بقیه خطوط رگرسیون داشته باشد، می‌توان تحلیل‌های مناسب‌تری انجام داد. شکل ۳-۴ نمودار چند بعدی نشان دهنده رابطه بین مسافت، وزن خرج و حداکثر سرعت ذره را برای خطوط با ضریب اطمینان متفاوت نشان می‌دهد. از این نمودار به عنوان یک راهنمای اولیه برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذره استفاده می‌شود.



شکل ۳-۴- نمودار تعیین رابطه بین فاصله، وزن خرج، خطوط اطمینان، سرعت و تعداد دوره‌های انفجار

۳-۲-۳- برآورد لرزش هوا

به منظور تعیین میزان لرزش هوا، مانند لرزش زمین، از روش‌های ثبت لرزش به کمک یک حسگر فشار صوت یا برآورد آن به کمک روابط و مدل‌های تجربی، استفاده می‌شود. امواج فشاری در هنگام انتشار در اتمسفر لرزش هوا را ایجاد می‌کنند. این امواج دارای محدوده فرکانس وسیعی هستند ولی عمدتاً لرزش هوا در محدوده امواج با فرکانس پایین قرار دارد. محدوده فرکانس شنوایی برای انسان بین ۲۵ تا ۱۶۰۰۰ هرتز است. لرزش هوا به صورت فشار ایجاد شده در اثر انتشار امواج، در هوا اندازه‌گیری می‌شود و واحد آن نیز معادل واحد فشار است اما برای تعیین میزان لرزش هوا برای مقاصد عملی، واحد دسی‌بل مورد استفاده قرار می‌گیرد. واحد دسی‌بل با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$(۱۰-۳) \quad \text{dB} = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right)$$

که در آن dB سطح صوت بر حسب دسی‌بل، P فشار هوای ناشی از انفجار و P_0 فشار پایین‌ترین شدت صوتی که قابل شنیدن است.

به منظور برآورد لرزش هوا مانند لرزش زمین از فاکتور فاصله مقیاس شده استفاده می‌شود. روش ریشه سوم برای حالتی که یک خرج با اندازه‌های متفاوت ولی با هندسه یکسان در یک محیط انفجار شود ارایه شده است.

برای تعیین فاصله مقیاس شده (r) از رابطه زیر استفاده می‌شود که در آن Q میزان خرج و D فاصله از محل انفجار است.

$$(۱۱-۳) \quad r = \frac{D}{Q^{\frac{1}{3}}}$$

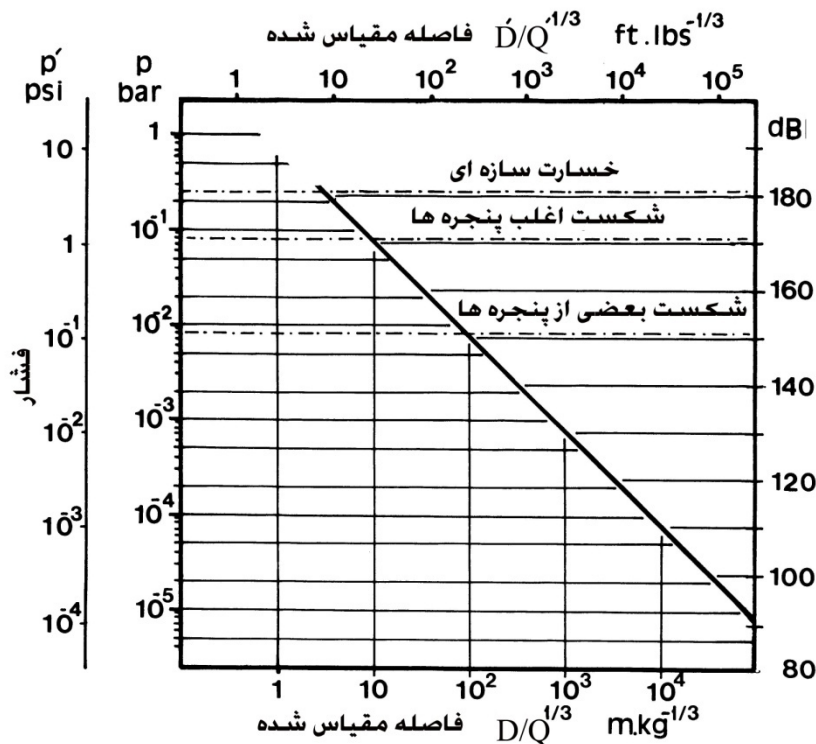
شکل عمومی روابط برآورد لرزش هوا در زیر ارایه شده است:

$$(۱۲-۳) \quad P = K(r)^B$$

که در آن P فشار هوا، r فاصله مقیاس شده و K و B ضرایب ثابت هستند. به عنوان نمونه، برای فشارهای خیلی کم، مقدار فشار (P) برای خرج نامحسوس از رابطه زیر به دست می‌آید. در مدل ارایه شده، مقدار پیشنهادی برای K برابر ۰/۷ و برای B برابر ۱- است.

$$P = 0.7 \frac{Q^{1/3}}{D} \quad (۱۳-۳)$$

رابطه ۱۳-۳ برای مقادیر فاصله مقیاس شده بیشتر از ۵۰ استفاده می‌شود. مقادیر پایین شدت لرزش هوا بر اساس مقیاس لگاریتمی دسی بل یا بر حسب میلی بار بیان می‌شوند. شکل ۳-۵ رابطه بین دسی بل، فشار القایی بر حسب پوند بر اینچ مربع و بار را نشان می‌دهد. خط ترسیم شده در این نمودار در واقع رابطه ۱۳-۳ را نشان می‌دهد که در آن فشار امواج بر حسب فاصله مقیاس شده تعیین می‌شود.



شکل ۳-۵- نمودار محاسبه شدت لرزش هوا (psi، bar و dB) بر اساس فاصله مقیاس شده (خط مورب، نشان دهنده رابطه

$$P = 0.7 \frac{Q^{1/3}}{D} \text{ (است).}$$

۳-۲-۴- اندازه گیری و برآورد پرتاب سنگ

الف- روابط تجربی بین پرتاب سنگ و قطر چال

به منظور بررسی پرتاب سنگ از دوربین‌های با سرعت بالا برای اندازه‌گیری سرعت پرتاب سنگ استفاده می‌شود. با این روش، حداکثر مسافت پرتاب و قطر سنگ پرتاب شده قابل اندازه‌گیری است. بر اساس تئوری برآورد پرتاب سنگ حاصل از عملیات آتشباری در سنگ‌های سخت، رابطه زیر به دست آمده است:

$$\frac{\phi \rho V}{2600} = 10d \quad (14-3)$$

که در آن ρ جرم مخصوص سنگ بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب (۲۶۰۰ جرم مخصوص متوسط گرانیت است)، ϕ قطر متوسط قطعه سنگ بر حسب متر، V سرعت بر حسب متر در ثانیه و d قطر چال حفاری شده بر حسب اینچ است.

ب- محاسبات پرتاب سنگ

به منظور محاسبه طول پرتاب سنگ، مدل‌های متعددی ارایه شده است. از میان این مدل‌ها، دو مدل زیر کاربرد بیشتری دارند: - مدل الف: بر اساس معادله ۱۴-۳ و با مشخص بودن جرم مخصوص توده سنگ، برای یک مقدار مشخص جرم مخصوص (ρ)، سرعت پرتاب سنگ (V) تعیین می‌شود. به این ترتیب، حداکثر پرتاب به صورت یک معادله بر حسب قطر چال مشخص می‌شود. نتیجه این عمل در شکل ۳-۶ ارایه شده است. با توجه به محاسبات انجام شده، بیشترین مقدار پرتاب سنگ از رابطه زیر به دست می‌آید:

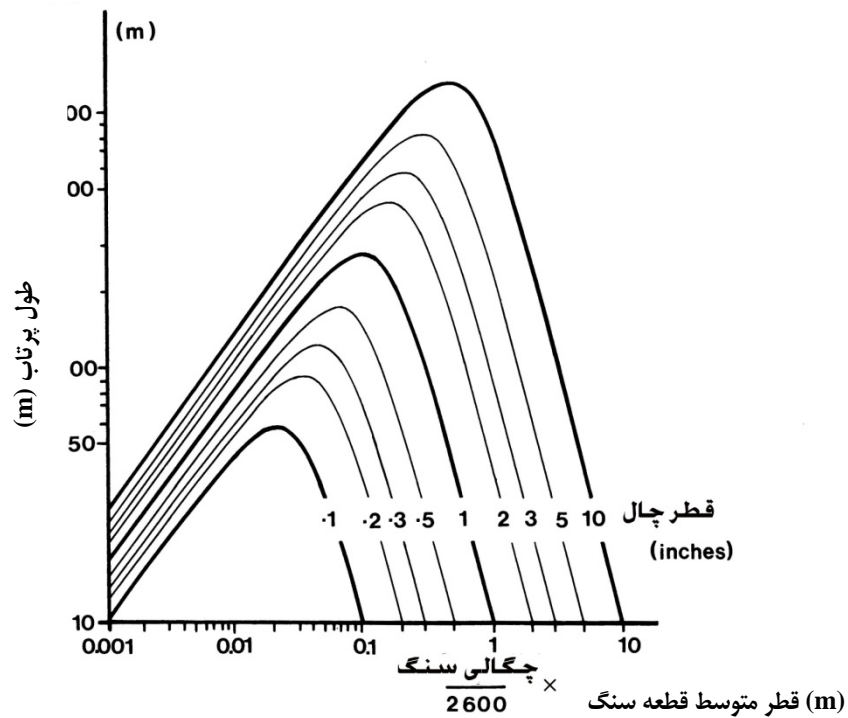
$$R_{max} = 260d^{\frac{2}{3}} \quad (15-3)$$

که در آن d قطر چال بر حسب اینچ و R_{max} حداکثر طول پرتاب سنگ بر حسب متر است. قطر متوسط این قطعه سنگ‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

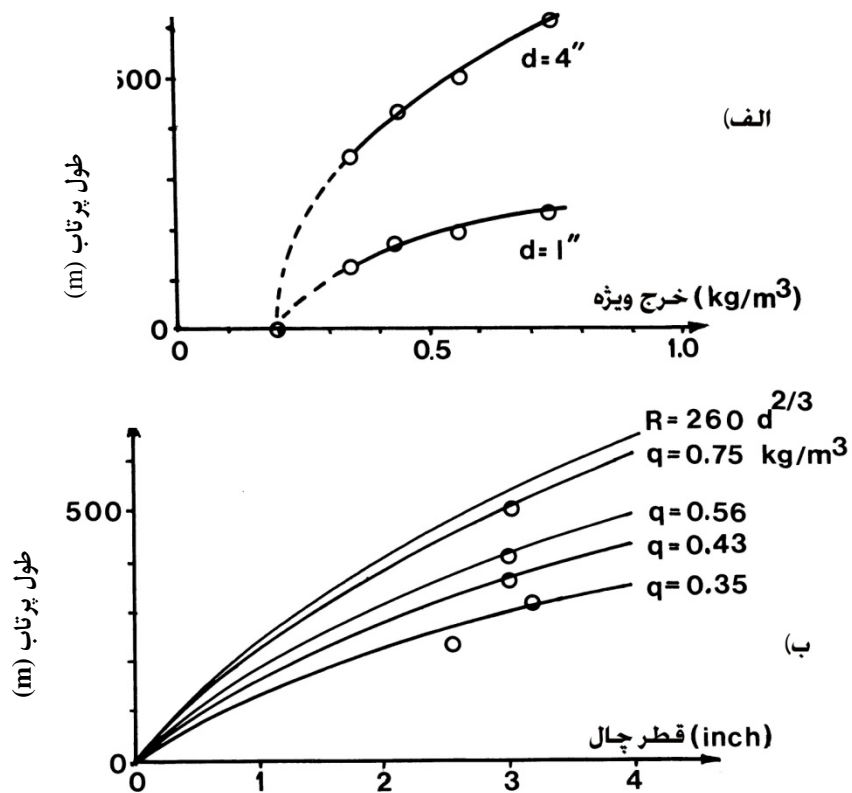
$$\phi = 0.1d^{\frac{2}{3}} \quad (16-3)$$

که در آن ϕ قطر متوسط قطعات سنگ بر حسب متر و d قطر چال بر حسب اینچ است. این فرمول برای انفجار در توده سنگ‌های سخت مانند گنایس، گرانیت، پگماتیت‌ها، سنگ آهک بلوری، سنگ آهن محکم و نظایر آن معتبر است. در سنگ‌های ضعیف به دلیل استفاده از خرج ویژه کم، حداکثر مقدار پرتاب سنگ نیز کاهش می‌یابد (شکل ۳-۷ الف و ب).

با توجه به شکل ۳-۶ و معادلات ارایه شده، امکان پرتاب قطعات بزرگ سنگ تا فاصله زیادی وجود دارد. بنابراین، برای جلوگیری از خسارت احتمالی باید منطقه بزرگی را تخلیه کرد.



شکل ۶-۳- محاسبه طول پرتاب سنگ بر اساس قطر چال و قطر متوسط قطعه سنگ



شکل ۷-۳- الف) رابطه بین طول پرتاب و خرج ویژه ب) رابطه بین طول پرتاب و قطر چال

- مدل ب: در این مدل، سرعت اولیه قطعات خرد شده سنگ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(۱۷-۳) \quad V_0 = \sqrt{2E} \times f\left(\frac{q_1}{m_1}\right)$$

که در آن V_0 سرعت اولیه بر حسب متر بر ثانیه، $\sqrt{2E}$ ثابت گرنی که تابعی از مواد منفجره است، q_1 تمرکز خرج در واحد طول بر حسب کیلوگرم بر متر و m_1 جرم کلی مواد سنگی در واحد طول بر حسب کیلوگرم است. برای محاسبه سرعت پرتاب سنگ‌هایی که از سطوح قائم (سطوح قائم پله) پرتاب می‌شوند رابطه ۱۷-۳ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(۱۸-۳) \quad V_0 = \sqrt{2E} \times \frac{q_1}{m_1}$$

در این رابطه مقدار $\sqrt{2E}$ از $\sqrt{2E}$ کمتر است و عموماً مقدار آن برای اکثر مواد منفجره معادل $V_0/3$ در نظر گرفته می‌شود که در آن، مقدار V_0 برابر سرعت انفجار ماده منفجره است.

فصل ۴

عناصر تاثیرپذیر از پیامدهای

نامطلوب و واکنش آنها

۴-۱- تاثیر لرزش زمین ناشی از انفجار بر سازه‌های سطحی

به منظور برقراری ارتباط بین عوامل تعیین کننده حرکت ارتعاشی ذره با خسارات سازه‌ای، معیارهایی برای تخمین خسارت به صورت تجربی ارائه شده‌اند که حرکت ذره را بسته به حداکثر شتاب، حداکثر سرعت، جابه‌جایی و فرکانس ذره ارائه می‌کنند. سطوح خسارت با توجه به ساختمان، نوع سازه و وضعیت تعمیر و نگهداری، تغییر می‌کند.

وقتی در معادن روباز یا زیرزمینی انفجار انجام می‌شود، لرزش‌های ناشی از آن از میان زمین عبور کرده و در سازه‌ها یک واکنش دینامیکی ایجاد می‌کند. این واکنش به عوامل مختلفی وابسته است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- نوع و مشخصات لرزش‌ها، مدت زمان ضربان لرزه‌ای، فرکانس امواج منتشر شده و انرژی انتقال یافته

- نوع و مشخصات محیط انتقال دهنده‌ای که سازه روی آن قرار گرفته است.

- نوع سازه و ویژگی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای ساختمان

خسارت ناشی از لرزش‌های انفجار به هر سازه را می‌توان بر حسب مقادیر مشخص کننده واکنش آن به لرزش‌های عبوری تعیین کرد. یکی از ویژگی‌های واکنش بحرانی، مقدار جابه‌جایی تفاضلی بین اجزای سازه است که در اثر این فرآیند، ترک‌ها در سازه ایجاد می‌شوند. سرعت ذره مهم‌ترین معیار برای طبقه‌بندی خسارت است. در عملیات انفجار روباز در واکنش به لرزش‌های زمین با فرکانس پایین، تشدید به صورت جابه‌جایی و کرنش اتفاق می‌افتد. همچنین، وابستگی خسارت به فرکانس نیز مشخص شده است. بر این اساس، تحلیل فرکانس لرزش و همچنین واکنش فرکانسی سازه‌ها اهمیت بالایی دارد.

مشخصه‌های یک سازه که رفتار آن را تحت بارگذاری لرزه‌ای کنترل می‌کند عبارتند از:

- جرم‌های اجزای اصلی سازه

- سختی اجزای اصلی سازه

- مقدار انرژی منتشر شده از طریق تغییر مکان تفاضلی در ترک‌ها، مفاصل و اتصالات

اگر طول موج یک موج انتقالی در مقایسه با ابعاد سازه به قدر کافی بزرگ باشد، تمام سازه به صورت یک مجموعه یکپارچه تکان می‌خورد. در این حالت، نمایش این مجموعه به صورت مدل و با یک درجه آزادی مناسب است. اگر طول موج فقط ۲ برابر عرض سازه باشد و جوانب سازه در جهت معکوس حرکت کند، استفاده از مدل با یک درجه آزادی مناسب نیست.

۴-۱-۱- معیارهای خسارت برای سازه‌ها

یک روش ساده برای پیش‌بینی واکنش سازه‌ای یک ساختمان به لرزش، استفاده از تبدیل فوریه است. تبدیل فوریه در عمل، اطلاعات مربوط به باند فرکانس و طول موج واکنشی که باید به منظور اجتناب از خسارت و اغتشاش حذف شود را ارائه می‌دهد. این روش، ساده‌ترین راه عملی تحلیل مسایل تقویت‌شدگی و تشدید برای هر سازه‌ای است. در اثر واکنش اجزای سازه‌ای در ساختمان‌ها لرزش تشدید می‌شود.

به منظور تعیین لرزش زمین و عکس‌العمل سازه‌ای، جانمایی مبداها روی زمین مترکم نزدیک سازه و به طور هم‌زمان در ارتفاع‌های مختلف روی سازه از نکات مهم است. به علت عکس‌العمل سازه‌ای، مقادیر حداکثر و اطلاعات ثبت شده در مکان‌های مختلف، متفاوت هستند. در مورد یک سازه اگر جرم، سختی و میرایی آن شناخته شده باشد می‌توان واکنش آن به لرزش را محاسبه یا حداقل تخمین زد. فرکانس یک ساختمان برابر تعداد دفعاتی است که سازه در یک ثانیه در اثر تحریک به اطراف حرکت می‌کند و

میرایی آن با سرعتی که لرزش با زمان در طی لرزش آزاد افت می‌کند متناسب است. دیوارهای سبک‌تر و انعطاف‌پذیرتر در ساختمان‌ها دارای فرکانس‌های طبیعی کوچکتر و حرکات نسبتاً بزرگتری هستند.

۴-۱-۲- طیف واکنش

طیف واکنش، روشی برای تعیین محدوده فرکانسی است که در آن محدوده، سازه بیشترین تاثیرپذیری را از لرزش زمین ناشی از انفجار دارد. عموماً، برای تشریح این روش از مدل با یک درجه آزادی^۱ استفاده می‌شود. تمام سازه‌ها دارای یک فرکانس طبیعی هستند که این فرکانس تابع ابعاد و جنس اجزای سازه است. فرکانس طبیعی برای هر سازه‌ای قابل اندازه‌گیری است و می‌توان با نصب ابزار بر روی سازه، آن را اندازه‌گیری کرد.

ترسیم نمودار واکنش یا به عبارتی طیف واکنش نیاز به اندازه‌گیری‌های متعدد و استفاده از معادله حرکت برای مدل با یک درجه آزادی دارد، اما با استفاده از روابط زیر و نمودار سه جزیی، می‌توان به صورت تقریبی طیف واکنش را برای یک انفجار خاص محاسبه و ترسیم کرد.

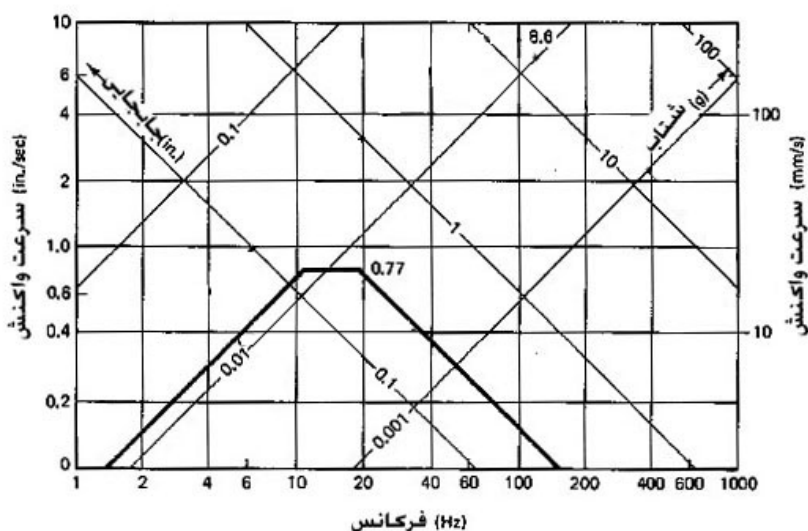
$$u = 0.072mm \times \left(\frac{30.5m}{R}\right)^{1.1} \times \left(\frac{3050m/s}{c}\right)^{1.4} \times \left(\frac{W}{4.54kg}\right)^{0.7} \times \left(\frac{2.4}{\rho}\right)^{0.7} \quad (1-4)$$

$$\dot{u} = \frac{18.3mm}{s} \times \left(\frac{30.5m}{R}\right)^{1.46} \times \left(\frac{W}{4.54kg}\right)^{0.48} \times \left(\frac{2.4}{\rho}\right)^{0.48} \quad (2-4)$$

$$\ddot{u} = 0.81g \times \left(\frac{30.5m}{R}\right)^{1.84} \times \left(\frac{c}{3050m/s}\right)^{1.45} \times \left(\frac{W}{4.54kg}\right)^{0.28} \times \left(\frac{2.4}{\rho}\right)^{0.28} \quad (3-4)$$

که در این روابط u جابه‌جایی بر حسب میلی‌متر، \dot{u} سرعت ذره بر حسب میلی‌متر در ثانیه، \ddot{u} شتاب ذره بر حسب g ، R فاصله از انفجار بر حسب متر، c سرعت انتشار موج بر حسب متر در ثانیه، W وزن خرج در هر تاخیر و ρ جرم مخصوص است. بر اساس این روابط، مقادیر جابه‌جایی، سرعت و شتاب واکنش محاسبه می‌شود. سپس، در نمودار سه جزیی، یک خط معادل هر کدام از مقادیر به دست آمده، ترسیم می‌شود. با اتصال این سه خط، وضعیت لرزش زمین ناشی از انفجار به دست می‌آید. پس از ترسیم این نمودار و با داشتن فرکانس طبیعی سازه می‌توان میزان تاثیرپذیری سازه از انفجار را مشخص کرد. به عنوان مثال، یک نمونه از این نمودارها برای انفجار در یک معدن سطحی در شکل ۴-۱ ارائه شده است. شکل نشان می‌دهد که اگر محدوده فرکانس سازه بین ۱۰ تا ۲۰ هرتز باشد امکان ایجاد پدیده تشدید و خسارت وجود دارد.

بر این اساس، ملاحظه می‌شود که روش طیف واکنش برای پیش‌بینی خسارت، نسبت به معیار سرعت ذره ساده، روش منطقی‌تری است.



شکل ۴-۱ - یک نمونه از طیف واکنش ترسیم شده برای انفجار در یک معدن سطحی

۴-۱-۳- تخمین فرکانس طبیعی سازه‌ها

هنگامی که امواج لرزه‌ای از میان یک سازه عبور می‌کند، انرژی آن به نیرویی تبدیل می‌شود که سازه را با فرکانس ضریبان لرزه دچار لرزش می‌کند که به این پدیده، لرزش القایی گفته می‌شود. پس از گذر موج و پایان این لرزش القایی، سازه با فرکانس خودش می‌لرزد که به آن فرکانس طبیعی سازه گفته می‌شود. فرکانس طبیعی هر سازه به طور مستقیم از ثبت اثر لرزش آزاد آن پس از عبور موج، اندازه‌گیری می‌شود. رابطه زیر برای تخمین فرکانس طبیعی سازه (N) در حالت کلی پیشنهاد می‌شود:

$$N = 2\pi \sqrt{\frac{L}{0.05h}} \quad (۴-۴)$$

که در آن N فرکانس طبیعی بر حسب هرتز، L عرض سازه بر حسب متر و h ارتفاع سازه بر حسب متر است.

دوره تناوب سازه‌های خاص را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

- ساختمان‌های با دیوارهای بتن مسلح

$$T_s = 0.06 \times \frac{h_v}{L_p} \times \frac{H_v}{2L_p + H_v} \quad (۵-۴)$$

- ساختمان‌های با اسکلت بتنی

$$T_s = 0.06 \times \frac{H_v}{L_p} \quad (۶-۴)$$

- ساختمان‌های با اسکلت فلزی

$$T_s = 0.10 \times \frac{H_v}{L_p} \quad (۷-۴)$$

در این روابط، T_s دوره تناوب سازه بر حسب ثانیه، H_v ارتفاع کل سازه بر حسب متر، h_v ارتفاع هر طبقه بر حسب متر و L_p اندازه بعد کف سازه در جهت لرزش بر حسب متر است. فرکانس غالب هر موج لرزه‌ای یا باند فرکانس غالب (باندی که از محاسبه تبدیل فوریه به دست می‌آید) در کنترل خسارت ناشی از انفجار اهمیت زیادی دارد.

فرکانس طبیعی سازه‌ها بین ۵ تا ۱۵ هرتز است و این فرکانس با افزایش طبقات کاهش می‌یابد. در هنگام لرزش یک ساختمان، سقف و دیوارها به طور مستقل از بنای فوقانی می‌لرزند و معمولاً دارای فرکانس طبیعی بین ۱۲ تا ۲۰ هرتز هستند. امواج با فرکانس پایین، برای سازه‌ها مضرند زیرا سازه‌ها عمده انرژی را جذب می‌کنند و به‌طور فزاینده‌ای با زمان تغییر شکل می‌دهند. در بعضی موارد، این شرایط تا تغییر شکل پلاستیک یا گسیختگی ادامه می‌یابد.

۴-۲- تاثیر لرزش زمین ناشی از انفجار بر سازه‌های زیرزمینی

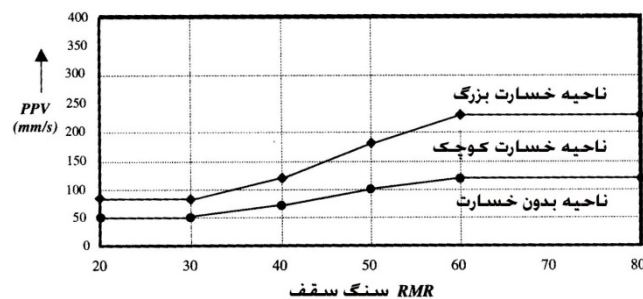
برای بررسی خسارات سازه‌های زیرزمینی در اثر انفجارهای سطحی موارد زیر باید مورد بررسی قرار گیرند:

۴-۲-۱- لرزش‌های انفجاری

هنگامی که لرزش حاصل از انفجار در یک معدن روباز به سمت یک فضای زیرزمینی هدایت می‌شود انتقال انرژی، بیشتر توسط امواج درونی، مخصوصاً امواج اولیه انجام می‌گیرد. به این ترتیب، ذرات سنگ در مسیر طول خط حرکت این امواج به سمت جلو و عقب حرکت می‌کنند.

۴-۲-۲- اثر کیفیت سنگ

کیفیت توده سنگ در یک فضای زیرزمینی بر میزان خسارت ناشی از انفجار معدن روباز مجاور آن، موثر است. به منظور بررسی اثر کیفیت سنگ از سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ استفاده می‌شود. از میان سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ، استفاده از رده‌بندی شاخص کیفیت توده سنگ (Q) و رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) توصیه می‌شود. در شکل ۲-۴ سطوح خسارت مختلف بر اساس مقدار RMR و حداکثر سرعت ذره ارایه شده است.



شکل ۲-۴- سطوح خسارت مختلف بر اساس حداکثر سرعت ذره (PPV) و RMR سنگ سقف

۴-۲-۳- شاخص آسیب انفجار^۱

شاخص آسیب انفجار (D_{ib}) به صورت نسبت تنش القایی در اثر انفجار به مقاومت کششی دینامیکی توده سنگ منفجر شده تعریف می‌شود. این شاخص، بدون بعد و مشابه فاکتور ایمنی است و مقدار آن بین ۰ تا ۳٫۵ تغییر می‌کند. این ویژگی به عنوان یک شاخص برای تعیین کیفیت خسارت پایه‌ها و سقف در اثر انفجار برای ایمنی افراد و تجهیزات استفاده می‌شود. شاخص آسیب ناشی از انفجار (D_{ib}) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D_{ib} = \frac{3.6 \times 10^{-3} \times V_p \times \rho_p \times V_p}{\sigma \times \sum c} \quad (۸-۴)$$

که در آن:

V_r : جمع برداری حداکثر سرعت ذره در سه جهت عمود بر هم (mm/s)

ρ_r : جرم مخصوص توده سنگ (g/cm^3)

V_p : سرعت موج فشاری (m/s)

K : ثابت کیفیت مکان برابر با مقدار $RMR (20-100)$

$\Sigma \sigma_c$: مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (MPa)

جدول ۴-۱ مقادیر مختلف شاخص خسارت انفجار و آسیب مورد انتظار را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱- شاخص آسیب انفجار D_{ib} و رابطه آن با آسیب در فضاهای زیرزمینی

نوع آسیب	D_{ib}
هیچ آسیبی به حفاریات زیرزمینی وارد نمی‌شود. این مقدار بیشترین حد مجاز برای فعالیت‌های زیرزمینی نظیر چاه‌ها، کارگاه‌های استخراج و بونکرهای ذخیره‌سازی در معدن است.	کمتر از ۰/۱۲۵
آسیب مهمی ایجاد نمی‌شود. حداکثر مقدار قابل قبول برای سازه‌های با طول عمر زیاد نظیر چاه‌های دسترسی، راه‌های خروج اضطراری و مکان‌های استراحت است.	۰/۱۲۵-۰/۲۵
ترک‌های خیلی کوچک و فرعی ایجاد می‌شود. حداکثر مقدار مجاز برای حفاریات با عمر متوسط نظیر تونل‌های اصلی و تونل‌های ترابری است.	۰/۲۵-۰/۵۰
ترک‌های متوسط و غیرممتد ایجاد می‌شود. حداکثر مقدار مجاز برای حفاریات موقت نظیر دستک‌ها و کارگاه‌های استخراج است.	۰/۵-۰/۷۵
ترک‌های اصلی و ممتد. در این حالت به تعمیرات اساسی نیاز است.	۰/۷۵-۱/۰۰
آسیب جدی و شکاف‌های بزرگ. در این حالت غیرقابل تعمیر است.	۱-۱/۵۰
ایجاد حفره‌های بزرگ که در این حالت باید فضا را ترک کرد.	بیشتر از ۲/۰۰

۴-۲-۴- اثر عمق

در فواصل دورتر از ناحیه انفجارهای متوسط، (حدود ۱۵ تا ۷۵ متر) قوی‌ترین امواج لرزشی امواج سطحی هستند. یکی از ویژگی‌های اصلی امواج سطحی این است که با فاصله گرفتن از سطح زمین، دامنه آنها به سرعت کاهش می‌یابد. در مورد انفجارهای معادن سطحی، لرزش‌ها به طور سریع با عمق کاهش می‌یابند، اما در عمق‌های زیاد عموماً امواج درونی با دامنه نسبتاً پایین حاکم هستند.

۴-۳- تاثیر لرزش بر توده سنگ

لرزش زمین ناشی از انفجار دارای دو میدان فعالیت بر توده سنگ است. از یک طرف، بر یکپارچگی سنگ‌ها یا ویژگی‌های مقاومتی آنها اثر می‌کند و از طرف دیگر، در حضور فعالیت‌های ناپایدارکننده، سبب تحریک دیواره‌ها و ریزش شیب می‌شود. یکی از اقدامات اولیه در بررسی اثرات لرزش بر توده سنگ، تعیین سرعت لرزش بحرانی است. در اولین قدم، پس از به دست آوردن مقادیر سرعت انتشار موج طولی در توده سنگ، جرم مخصوص و مقاومت کششی آن، سرعت لرزش بحرانی تعیین می‌شود که روابط آن به شرح زیر است:

$$RT = \rho_r \times V_{crit} \times C_p \quad (9-4)$$

$$V_{crit} = \frac{RT}{\rho_r \times C_p} \quad (10-4)$$

که در آن:

V_{crit} : سرعت لرزش بحرانی (mm/s)

RT : مقاومت کششی (MPa)

ρ_r : جرم مخصوص متوسط (t/m^3)

C_p : سرعت انتشار موج طولی در توده سنگ (m/s)

بنابراین، برای سنگی با جرم مخصوص ۲/۶ تن بر متر مکعب و سرعت انتشار موج طولی برابر ۴۵۰۰ متر در ثانیه مقدار V_{crit} برابر است با:

$$V_{crit} \left(\frac{mm}{s} \right) = \frac{RT(MPa)}{\rho_r} \cdot 117 \quad (11-4)$$

شکل ۳-۴، آسیب‌های قابل پیش‌بینی ناشی از تاثیر لرزش را بر اساس حداکثر وزن خرج بر تاخیر و فاصله از مرکز ثقل انفجار تا نقطه اندازه‌گیری ارایه می‌دهد.

شکل ۴-۴، کاهش کیفیت توده سنگ را در اثر لرزش‌های انفجار نشان می‌دهد. پایداری یک دیواره را می‌توان به وسیله روابط بین نیروهای موثر که تمایل به ایجاد ریزش دارند و نیروهای مقاومی که در برابر جابه‌جایی توده‌های سنگی مقاومت می‌کنند، بررسی کرد. یکی از روش‌های ساده برای محاسبه ضریب ایمنی، شامل این فرض است که شتاب یا سرعت ناشی از لرزش انفجار به نیروهای استاتیکی در جهت معین تبدیل می‌شود و مقدار آن متناسب با وزن توده سنگ لغزیده شده است.

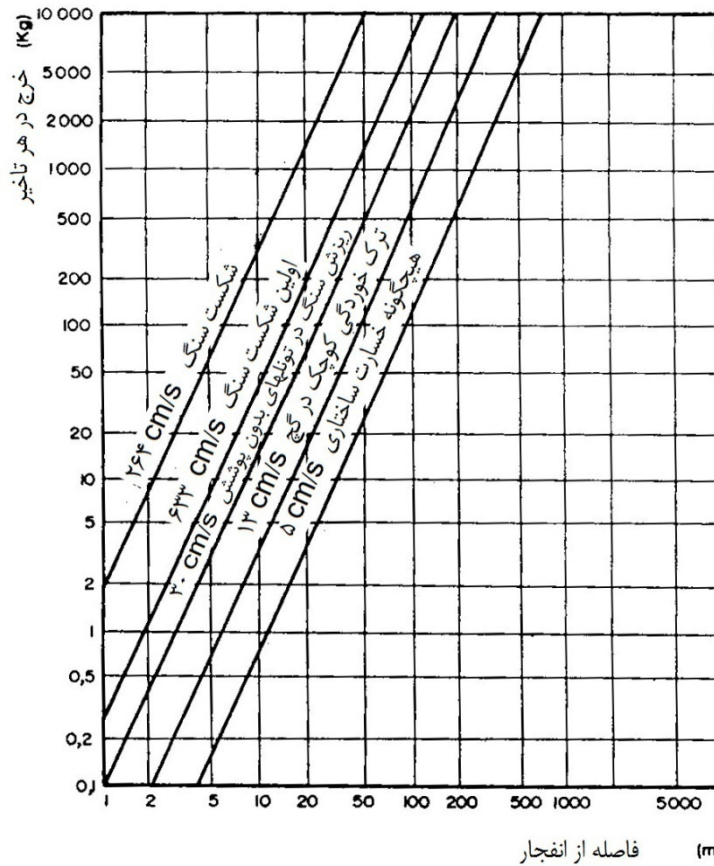
در مورد بلوک واقع بر روی یک صفحه مایل (شکل ۴-۵)، با فرض کوچک بودن اثر مولفه قائم جابه‌جایی ارتعاشی، ضریب ایمنی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$FS = \frac{C_h \times S_p + W_A \times \cos(\beta + \theta_A) \times \tan \phi}{W_A \times \sin(\beta + \theta_A)} \quad (12-4)$$

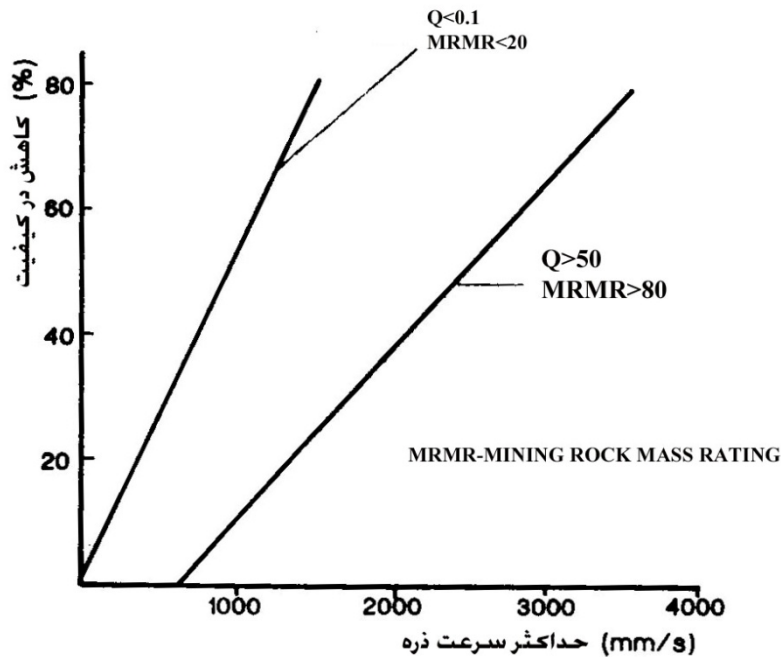
که در آن FS فاکتور ایمنی، C_h چسبندگی بر حسب پاسکال، S_p سطح تماس بلوک بر حسب متر مربع، W_A وزن بلوک بر حسب نیوتن، β زاویه شیب، ϕ زاویه اصطکاک و θ_A زاویه ایجاد شده به وسیله مولفه طولی لرزش‌ها است.

به عنوان مثال، بدون در نظر گرفتن لرزش، در یک مورد خاص با وجود چسبندگی صفر و با مقادیر $\beta=32^\circ$ و $\phi=37^\circ$ ، ضریب ایمنی ۱/۲ به دست می‌آید. اما اگر لرزش با مولفه طولی افقی $v_{lh}=6 \text{ mm/s}$ و فرکانس ۲۵ هرتز تاثیر داده شود ضریب ایمنی به ۰/۹۸ تبدیل می‌شود و در نتیجه بلوک می‌لغزد.

بر اساس نوع گسیختگی می‌توان روش‌های محاسبه برای تعیین ضریب ایمنی در ترازهای مختلف لرزش را توسعه داد (شکل ۴-۶).

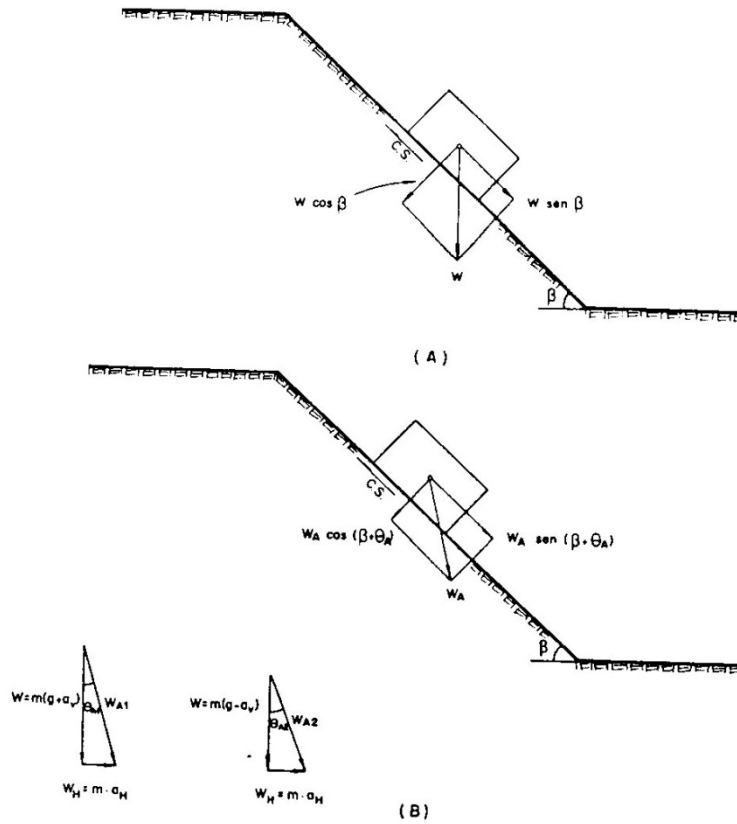


شکل ۴-۳- آسیب‌های قابل پیش‌بینی بر اساس حداکثر خرج در هر تاخیر و فاصله از محل انفجار

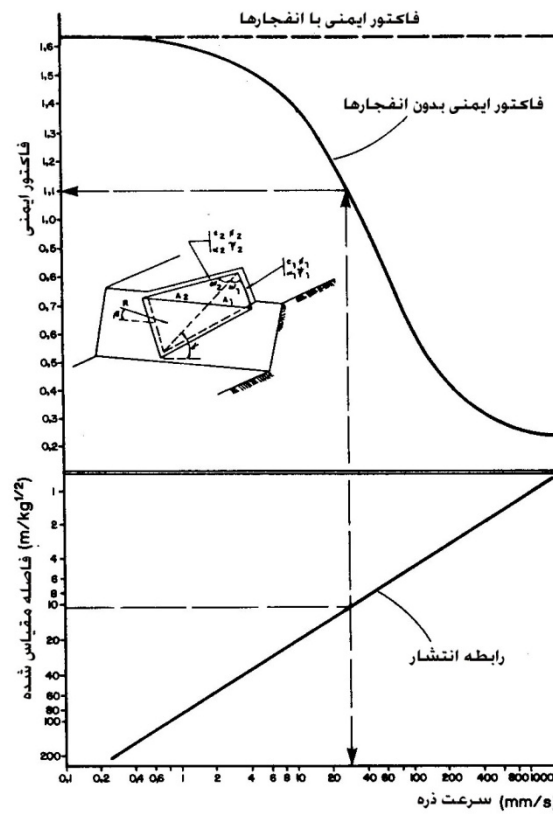


شکل ۴-۴- کاهش کیفیت توده سنگ نسبت به حداکثر سرعت ذره (سطح لرزش) بر اساس رده‌بندی معدنی توده سنگ (RMRM) و شاخص

Q



شکل ۴-۵- اثر ناپایداری لرزشی در یک بلوک واقع بر روی یک شیب



شکل ۴-۶- تغییرات ضریب ایمنی برای یک بلوک با یک برش گوه‌ای نسبت به فاصله مقیاس شده و حداکثر سرعت ذره (سطح لرزش)

۴-۴- تاثیر لرزش زمین ناشی از انفجار بر بتن

با توجه به فعالیت‌های معدنی و عمرانی، موارد متعددی وجود دارد که در آنها ساخت سازه‌های بتنی (عملیات اجرای بتن‌ریزی) با انجام انفجار در عملیات استخراج هم‌زمان شده باشد. برای مثال، می‌توان به اجرای پوشش بتنی در حفاری تونل، احداث پی‌هایی برای ساختن سنگ‌شکن اولیه نزدیک معادن روباز و نظایر این موارد اشاره کرد.

شکل ۴-۷ محدوده‌های مجاز لرزش را در مقابل زمان گیرش بتن نشان می‌دهد. این پیشنهاد را نمی‌توان برای انواع مختلف بتن تعمیم داد. در مدت دوره گیرش صفر تا ۴ ساعت، بتن هنوز سخت نشده و ترازهای مجاز، نسبتاً بالا هستند. از مدت ۴ تا ۲۴ ساعت، بتن آهسته شروع به گیرش می‌کند و بعد از ۷ روز به مقاومتی می‌رسد که تقریباً ۶۷ درصد مقاومت محصول نهایی (۲۸ روزه) است. در این شرایط، اجازه افزایش تدریجی لرزش داده می‌شود.

بر اساس عمر بتن و فاصله از محل انفجار می‌توان از رابطه تجربی زیر برای محاسبه حداکثر خرج منفجر شده در یک تاخیر استفاده کرد.

- بتن پرکننده^۱

$$Q = 38.20 \times 10^{-3} \times D^{1.86} \times K \quad (۴-۱۳)$$

که در این رابطه، Q مقدار خرج به کیلوگرم و D فاصله به متر است. مقادیر K برای زمان‌های مختلف گیرش بتن در جدول ۴-۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۴-۳- مقادیر ضریب K برای زمان‌های مختلف گیرش بتن (بتن پرکننده)

K	زمان گیرش بتن
۱	صفر تا ۴ ساعت
۰٫۱۶	۴ تا ۲۴ ساعت
۰٫۳	۱ تا ۳ روز
۰٫۷	۳ تا ۷ روز
۲٫۳	۷ تا ۱۰ روز
۵٫۵	بیشتر از ۱۰ روز

- بتن سازه‌ای

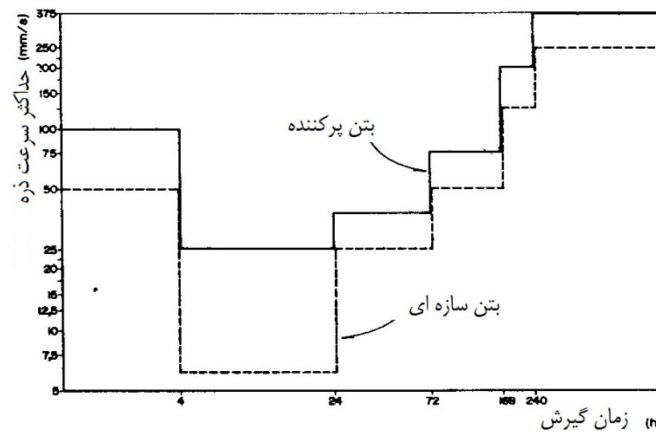
$$Q = 14.55 \times 10^{-3} \times D^{1.86} \times K \quad (۴-۱۴)$$

که در این رابطه، Q مقدار خرج به کیلوگرم و D فاصله به متر است. مقادیر K برای زمان‌های مختلف گیرش بتن در جدول ۴-۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴- مقادیر ضریب K برای زمان‌های مختلف گیرش بتن (بتن سازه‌ای)

K	زمان گیرش بتن
۱	۰ تا ۴ ساعت
۰,۰۸	۴ تا ۲۴ ساعت
۰,۳۷	۱ تا ۳ روز
۱	۳ تا ۷ روز
۳	۷ تا ۱۰ روز
۷,۵۸	بیشتر از ۱۰ روز

عوامل مهم دیگری که باید در نظر گرفته شوند شامل خصوصیات فرکانس‌های لرزش، شرایط گیرش خارجی، مساحت سطح تماس بتن و حداکثر تراز لرزش هستند.



شکل ۴-۷- حداکثر سرعت ذره نسبت به زمان گیرش بتن

۴-۵- تاثیر لرزش زمین بر انسان

سیستم ادراک انسان نسبت به لرزش زمین، مانند حساسیت بالای گوش انسان نسبت به امواج صوتی، دارای حساسیت بالایی است. هر چند تمام امواج خطرناک نیستند ولی فکر تخریب ناشی از آن حتی در مقادیر کم نیز باعث آزار و اذیت انسان می‌شود به طوری که یک موج صوتی حاصل از لرزش زمین نیز ترس زیادی را ایجاد می‌کند. بنابراین، باید اطلاعاتی در مورد تاثیرات لرزش زمین بر روی ساختمان‌ها و دیگر اجزا آن‌ها به افراد داده شود تا اثرات منفی و همچنین آسیب‌ها را تا حد امکان کاهش دهد. موارد زیر به عنوان میزان تاثیر این لرزش‌ها بر روی انسان ارایه شده است.

لرزشی که دارای حداکثر سرعت ذره تا $0,۰۲$ میلی‌متر در ثانیه و فرکانس ۳ تا ۲۵ هرتز باشد در انسان ایجاد ناراحتی نمی‌کند. لرزشی که دارای سرعت ذره $0,۵$ میلی‌متر در ثانیه و فرکانس ۳۰ هرتز یا حداکثر سرعت ذره ۵۰ میلی‌متر در ثانیه و فرکانس ۵ هرتز باشد برای انسان به صورت ناراحت کننده است. همچنین، مقدار میانگین لرزش برای درک آن‌ها به صورت جدی نزدیک ۲۵ میلی‌متر در ثانیه و فرکانس ۲,۵ تا ۲۵ هرتز است. باید توجه داشت که با کاهش زمان تولید امواج، میزان درک امواج به وسیله انسان نیز کاهش می‌یابد. زمانی که سرعت ذره حدود ۵ میلی‌متر در ثانیه باشد افراد دچار ترس از تخریب می‌شوند. یک روش تحلیلی برای

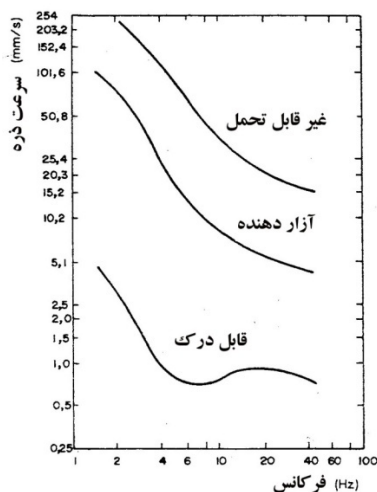
تخمین میزان تاثیر لرزش بر روی افراد به صورت زیر تعریف شده است. در این روش، مقدار پارامتر K بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{0.0054 \times f^2}{(100 + f^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{0.8v \times f}{(100 + f^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{0.125a}{(100 + f^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (۱۵-۴)$$

که در آن، فرکانس بر حسب هرتز، سرعت ذره بر حسب میلی‌متر در ثانیه، دامنه بر حسب میکرومتر و a شتاب بر حسب میلی‌متر بر مجذور ثانیه است. بر اساس مقدار پارامتر K که از رابطه ۴-۱۵ به دست می‌آید، سطوح ادراک افراد طبقه‌بندی می‌شود که نتایج آن در جدول ۴-۵ ارایه شده است. نتایج بعضی بررسی‌ها در مورد سطح ادراک افراد بر اساس شدت لرزش و فرکانس آن به صورت گرافیکی ارایه شده است. شکل ۴-۸ نمونه‌ای از این نتایج را ارایه می‌دهد. به طور کلی، نمی‌توان یک سطح لرزش خاصی را بیان کرد که در آن هیچ فردی شکایت نداشته باشد. بنابراین، همیشه گروهی از افراد به علت وجود احتمال خطر لرزش شکایت دارند. به طور کلی، اگر مدت زمان لرزش یا مدت زمان کار تولیدکننده لرزش کم باشد (ساختمان‌سازی، معدنکاری و نظایر آن‌ها) و یا این که مردم از تاثیر لرزش بر روی آن‌ها اطلاع پیدا کنند و از محدوده خطر آگاهی یابند میزان صبر آن‌ها در مقابل لرزش نیز بالاتر می‌رود.

جدول ۴-۵- طبقه‌بندی سطوح ادراک افراد نسبت به لرزش زمین بر اساس فاکتور K

سطح ادراک	مقدار K
غیرقابل درک	< ۰٫۱
نسبتاً قابل درک	۰٫۱
کمی قابل درک	۰٫۲۵
قابل درک	۰٫۶۳
قابل درک به سادگی	۱٫۶
آزار دهنده	۴٫۰
غیرقابل تحمل	۱۰٫۰



شکل ۴-۸- سطح ادراک افراد نسبت به شدت لرزش و فرکانس آن

۴-۶- خستگی ناشی از تکرار انفجار

در مواردی که سرعت ذره اندازه‌گیری شده در یک سازه کمتر از حد عادی باشد، در صورت بارگذاری مکرر، امکان ترک خوردگی ناشی از انفجار ایجاد می‌شود که به کاهش مقاومت در اثر بارگذاری مکرر، خستگی گفته می‌شود. به این ترتیب، زمانی که یک سازه تضعیف شود، برای تخریب در شدت‌های پایین لرزش یا شتاب مستعد می‌شود.

لرزش ناشی از عملیات انفجار در معادن روباز عموماً یک پدیده گذرای کوتاه مدت با دوام یک یا دو ثانیه است. یکی از ملاحظات مهم در این رابطه، مساله اثر لرزش مکرر است. عموماً، سطوح لرزش نسبتاً پایین دارای پتانسیل تخریب کمی هستند ولی با این وجود، اثرات انفجار مکرر معادن روباز به ویژه در محدوده فرکانس پایین ممکن است خطرناک باشد. دیوارها، سقف‌ها و پوشش‌های داخلی، دارای سطوح فرکانس طبیعی مختلفی هستند. بنابراین، واکنش آن‌ها تحت تاثیر ضربات انفجار مکرر، متفاوت خواهد بود.

با توجه به شرایط سازه و میزان سطح لرزش، حداقل تعدادی تکرار برای ایجاد خسارت به سازه لازم است. در سطوح لرزش خیلی پایین، برای ایجاد خسارت، تعداد تکرار خیلی زیادی لازم است. به طور مثال، در یک آزمایش، مشخص شده است که در یک خانه با چارچوب چوبی، اولین ترک پس از ۲۸ سال، روزی ۲ بار انفجار و با سطح لرزش ۱۲٫۵ میلی‌متر در ثانیه ظاهر شده است.

فصل ۵

استانداردها و معیارهای موجود

۵-۱- آشنایی

ارتباط بین تنش‌ها و کرنش‌های وارده به یک سازه و مقاومت آن، شرایط پایدار ماندن سازه را تعیین می‌کند. اگر تنش القایی لرزش بیشتر از مقاومت نهایی سازه مورد نظر شود به آن خسارت وارد خواهد شد. تنش‌های اعمالی به صورت ترکیب تنش استاتیکی و دینامیکی هستند که حاصل جمع این دو تنش بسیار مهم است. تنش دینامیکی مستقیماً از لرزش حاصل می‌شود و عموماً مدت زمان تاثیر آن کوتاه است در حالی که تنش استاتیکی در اثر بارهای اعمالی و تغییر شکل‌های قبلی سازه ایجاد می‌شود و در یک مدت زمان طولانی تاثیر می‌کند. به منظور بررسی خسارت‌های وارده به سازه‌ها و همچنین طراحی مناسب برای جلوگیری از ایجاد این خسارت‌ها باید تنش‌ها محاسبه شوند که در این صورت نیاز به اندازه‌گیری لرزش و کرنش حاصل از آن است. این اندازه‌گیری‌ها تا حدودی پیچیده و پرهزینه‌اند. بنابراین در اکثر موارد می‌توان، به جای اندازه‌گیری‌ها و محاسبات لرزش و کرنش، از مقادیر استاندارد لرزش که بر اساس تجربیات مختلف به دست آمده است استفاده کرد. بر اساس تجربیات متعدد، می‌توان گفت که با رعایت این استانداردها فقط در تعداد محدودی از حالت‌ها خسارت وارد می‌شود.

محدوده‌ای از استانداردهای قابل دسترس جهانی بر اساس نموده‌های مختلف لرزش زمین مانند دامنه، حداکثر سرعت ذره، فرکانس و شتاب وجود دارد. این پارامترها گاه به صورت تک معیار و گاه به صورت ترکیبی، مانند ترکیب دامنه و سرعت، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این بخش استانداردهای مختلف ارایه و سعی شده است تا بر اساس معیارهای موجود در طبقه‌بندی استانداردها، معرفی مقادیر و محدوده‌های استاندارد برای معادن انجام شود. به این منظور، در ادامه، استانداردهای موجود فقط بر اساس مشخصات مختلف لرزش طبقه‌بندی و ارایه شده‌اند.

۵-۲- استانداردهای لرزش برای سازه‌ها و تاسیسات

عملیات انفجار در نزدیکی مناطق مسکونی و سازه‌ها باید به نحوی انجام گیرد که سطح لرزش آن حتماً پایین‌تر از محدوده ایمنی باشد تا از خسارت وارده به سازه‌ها جلوگیری شود. بر اساس اندازه‌گیری لرزش و رفتارنگاری خسارت‌های ناشی از آن در نزدیکی سازه‌ها، بین حداکثر سرعت ذره و امکان خطر خسارت، روابطی ارایه شده است. بنابراین، برای جلوگیری از خطر خسارت، نیاز به اندازه‌گیری صحیح لرزش و بررسی کامل محیط انفجاری افزایش یافته است. همچنین، کنترل میزان حداکثر سرعت ذره نیز ضروری است زیرا این فاکتور با تنش‌های وارده مستقیماً رابطه دارد و بر روی مواد تشکیل دهنده سازه نیز تاثیر می‌گذارد. به طور ایده‌آل رابطه بین سرعت ذره و تنش القایی وقتی که یک موج صفحه‌ای از میان یک محیط الاستیک نامحدود عبور می‌کند، به صورت زیر است:

$$\sigma = \rho \cdot E_s \quad (1-5)$$

$$\rho = \frac{V}{C} \quad (2-5)$$

$$\sigma = \frac{V \cdot E}{C} \quad (3-5)$$

که در این روابط، α میزان تنش القایی، β مقدار کرنش، E مدول الاستیسیته، v سرعت ذره و C سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در محیط است.

روابط مذکور نشان می‌دهد که سرعت انتشار امواج، یک عامل فوق‌العاده مهم است. در توده سنگ موجود در زیر سازه، این فاکتور مانند مدول الاستیسیته برای مواد تشکیل دهنده سازه، ثابت است. بنابراین، برای یک سازه، اندازه تنش به سرعت ذره بستگی دارد.

برای به دست آوردن محدوده قابل اطمینان لرزش برای سازه‌ها، تجربیات حاصل از انفجار و اندازه‌گیری لرزش ضروری است. بنابراین، نکته حایز اهمیت این است که در شروع و طی طراحی یک انفجار ابتدا باید یک بررسی و تحلیل اولیه انجام شود و سپس با توجه به نتایج حاصل، درباره حساسیت سازه‌ها در مقابل لرزش قضاوت شود. در این راستا، عوامل متعددی بر روی مقادیر لرزش تأثیر می‌گذارند. که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- مقاومت لرزه‌ای مصالح تشکیل دهنده سازه

- شرایط عمومی سازه

- مدت زمان لرزش و شاخصه‌های آن

- وجود تجهیزات حساس به لرزش

- پی سازه

- شاخص‌های انتشار امواج در سنگ، زمین و مواد تشکیل دهنده سازه

- هزینه‌های تعمیر سازه

در جدول ۵-۱، خطر خسارت ایجاد شده در اثر لرزش زمین بر روی مناطق مسکونی معمولی درج شده است. منظور از مناطق مسکونی معمولی، خانه‌هایی با پی و تیرهای بتنی، دیوارهای بیرونی آجری و دیوارهای جداکننده گچی و بتن سبک فشرده است. جدول ۵-۲ محدوده‌های برآیند حداکثر سرعت ذره پیشنهادی را برای انفجارها، مطابق با استاندارد DIN 4150 در سال ۱۹۷۵ نشان می‌دهد. برای سازه‌های قدیمی و با کیفیت پایین‌تر که بر روی پی سنگی بنا شده‌اند عموماً سطح سرعت ذره ارائه شده در جدول ۵-۳ از ۱ تا ۷۰ میلی‌متر در ثانیه به ۵۰ میلی‌متر در ثانیه و برای سازه‌های بتن سبک به ۳۵ میلی‌متر در ثانیه کاهش می‌یابد. این مقدار تصحیح برای دیگر پی‌ها به طور تقریبی مناسب است. در بعضی موارد که سازه‌ها استحکام خوبی دارند ممکن است حتی در مقابل سرعت ذره بیش از ۱۱۰ میلی‌متر در ثانیه نیز خسارتی وارد نشود. حتی بعضی از سازه‌های ساخته شده از سیمان‌های سنگین در مقابل لرزش‌های با سرعت بیش از ۱۵۰ میلی‌متر در ثانیه نیز مقاومت می‌کنند. مقادیر مندرج در جدول ۵-۱ به صورت تجربی بوده و بر اساس بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ اندازه‌گیری به دست آمده است.

جدول ۵-۱ - محدوده لرزش برای سازه‌ها بر اساس مولفه قائم سرعت ذره بر حسب میلی‌متر بر ثانیه

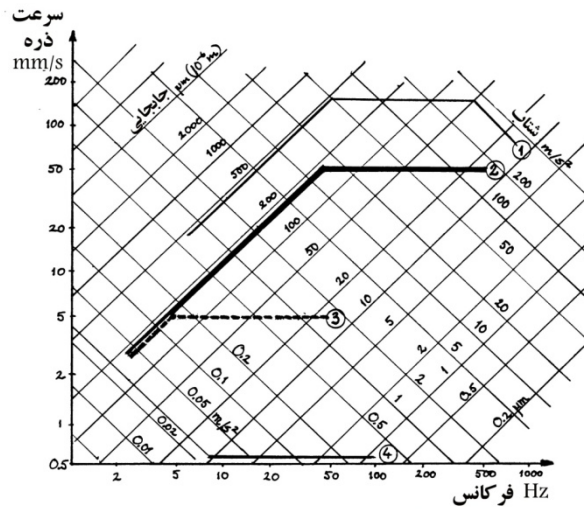
جس زمین‌درزیر سازه‌ها		رس، ماسه، شن	یخرفت، اسلیت، سنگ	گرانیت، گنایس، سنگ آهک سخت، ماسه
نتایج در مناطق مسکونی معمولی		۱۸	آهک نرم	سنگ کوارتزیتی، دیاباز
بدون ترک خوردگی			۳۵	۷۰

۱۱۰	۵۵	۳۰	ترک‌های ریز و ریزش گچ (مقدار آستانه)
۱۶۰	۸۰	۴۰	ترک‌خوردگی
۲۳۰	۱۱۵	۶۰	ترک‌خوردگی جدی و خطرناک

جدول ۵-۲. حداکثر سرعت ذره پیشنهاد شده بر اساس استاندارد DIN 4150

مولفه قائم حداکثر سرعت ذره تخمینی (mm/s)	برآیند حداکثر سرعت‌های ذره (mm/s)	طبقه‌بندی سازه‌ها
۴٫۸-۸	۸	نواحی مسکونی، اداری و راه‌های ارتباطی در شرایط معمولی
۱۸-۳۰	۳۰	سازه‌های محکم و پایدار
۲٫۴-۴	۴	سایر سازه‌ها و بناهای تاریخی

اگر مقادیر به دست آمده از جدول ۵-۱ مربوط به محدوده «بدون ترک‌خوردگی» به یک دیاگرام سه مولفه‌ای (سه جزیی) انتقال داده شوند، ملاحظه می‌شود که بر روی یک منحنی مطابق منحنی شماره ۲ در شکل ۵-۱ قرار می‌گیرند. در این منحنی، محدوده ۷۰ میلی‌متر در ثانیه برای سازه‌ها به محدوده ۵۰ میلی‌متر در ثانیه کاهش می‌یابد. منحنی شماره ۲ در شکل ۵-۱، محدوده تغییرات حداکثر سرعت ذره را برای مناطق مسکونی معمولی نشان می‌دهد. بنابراین، طبق نمودار برای فرکانس بالاتر از ۴۰ هرتز، حداکثر سرعت ذره و برای فرکانس‌های کمتر از این مقدار، جابه‌جایی به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته می‌شود. فرکانس غالب ناشی از لرزش انتقال یافته در سنگ‌های نرم، خرده سنگ‌ها، رس، ماسه و شن بسیار کمتر از فرکانس غالب در سنگ‌های سخت نظیر گرانیت است. با توجه به جدول ۵-۱ و منحنی ۲ در شکل ۵-۱ ملاحظه می‌شود که در فرکانس‌های پایین، جابه‌جایی به عنوان معیار خسارت نسبت به سرعت ذره ترجیح دارد. منحنی شماره ۱ در شکل ۵-۱، مقادیری است که در آن‌ها قطعا سازه خسارت می‌بیند. در حالت کلی محدوده مشخصی برای سطح لرزش سازه‌ها وجود ندارد. بنابراین، توصیه‌های ارائه شده یک راهنما برای جلوگیری از خسارات وارده به سازه‌ها است. در مورد انفجارهای نزدیک به دفاتر ارتباطی، ایستگاه‌های تقویت و یا دیگر تجهیزات حساس درون سازه نظیر کامپیوتر، میکروسکوپ الکترونی، آسیابها، مولدهای برق و نظایر آن باید میزان شتاب تولید شده نیز اندازه‌گیری شود.



- ۱- خسارات مستقیم لرزش بر ساختمان‌ها
- ۲- حد بالای پیشنهادی برای انفجار
- ۳- حد بالای پیشنهادی برای شمع کوبی و کوبنده‌های متحرک
- ۴- لرزش‌های وحشت‌آور برای انسان‌ها. منحنی‌های ۱ و ۳ لرزش‌های وارده به فونداسیون را نشان می‌دهد. استانداردهای فوق (۲ و ۳) محدوده پیشنهادی در شرایط ایده‌آل را نشان می‌دهند.

شکل ۵-۱- معیارها و پیشنهادها برای خسارات

یکی از معیارهای لرزش برای سازه‌ها، سطح راهنمای لرزش است که به صورت محاسباتی، محدوده مجاز لرزش را ارائه می‌دهد. سطح راهنمای لرزش، بر اساس اطلاعات دقیق ثبت شده و رابطه بین مولفه قائم حداکثر سرعت ذره و خسارات وارده بر سازه با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه مشخص می‌شود. سطح راهنمای سرعت ذره (V) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V = V_0 \cdot F_k \cdot F_d \cdot F_t \quad (4-5)$$

که در آن V_0 مولفه قائم سرعت ذره به صورت تصحیح نشده بر حسب میلی‌متر در ثانیه، F_k ضریب کیفیت سازه، F_d فاکتور فاصله و F_t ضریب تشریح‌کننده زمان برای عملیات انفجاری است. برای مثال، این ضریب برای فعالیت‌های معدنی به صورت بلندمدت و برای فعالیت‌های عمرانی به صورت کوتاه مدت در نظر گرفته می‌شود. شاخص‌های مهم به شرح زیر است:

- مولفه قائم سرعت ذره به صورت تصحیح نشده

- مقادیر مولفه قائم حداکثر سرعت ذره (V_0) در جدول ۳-۵ ارائه شده است. مقدار دقیق‌تر V_0 از طریق اندازه‌گیری سرعت امواج

فشاری (C_p) در زمینی که سازه بر روی آن قرار گرفته است و با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_0 = \frac{C_p}{65} \quad (5-5)$$

که در آن V_0 بر حسب میلی‌متر در ثانیه و C_p بر حسب متر در ثانیه است.

جدول ۳-۵- مقادیر مولفه قائم سرعت ذره تصحیح نشده (V_0)

v_0 (mm/s)	جنس زمین
۱۸	یخرفت‌های سست، رس، ماسه، شن
۳۵	یخرفت‌های محکم، شیل، آهک‌های نرم
۷۰	گرانیت، گنایس، آهک‌های محکم، کوارتزیت، ماسه سنگ، دیاباز

- ضریب کیفیت سازه (F_k) از طریق ضریب سازه (F_b) و ضریب مواد تشکیل دهنده سازه (F_m) به دست می‌آید.

$$F_k = F_b \times F_m \quad (۶-۵)$$

با توجه به جدول ۴-۵، سازه‌ها در ۵ گروه طبقه‌بندی می‌شوند. ضریب مواد تشکیل دهنده سازه در جدول ۵-۵ ارایه شده است. به هنگام انتخاب ضریب مصالح تشکیل دهنده سازه (F_m) باید دقت شود تا مصالحی که کمترین ضریب F_m را در سازه دارند مد نظر قرار گیرند.

جدول ۴-۵ - مقادیر کیفیت ضریب سازه (F_b)

F_b	نوع سازه یا سازه	رده‌بندی
۱/۷۰	سازه‌های سنگین نظیر پل‌ها، بندرها و سازه‌های دفاعی نظامی	۱
۱/۲	سازه‌های اداری و صنعتی	۲
۱/۱۰۰	خانه‌های مسکونی استاندارد	۳
۰/۶۵	سازه‌های طراحی شده حساس به ویژه با طاق‌های زیاد نظیر موزه‌ها و کلیساها	۴
۰/۵۰	بناهای تاریخی در حالت خسارت‌پذیر و خرابی معین	۵

جدول ۵-۵ - ضریب مصالح تشکیل دهنده سازه (F_m)

F_m	نوع مصالح تشکیل دهنده سازه	رده‌بندی
۱/۲۰	سیمان تقویت شده، فولاد، چوب	۱
۱/۱۰۰	سیمان تقویت نشده، آجر	۲
۰/۷۵	بتن متخلخل	۳
۰/۶۵	آجرها	۴

- ضریب فاصله: ضریب فاصله را می‌توان با استفاده از شکل ۳-۵ محاسبه کرد. این ضریب در واقع نشان دهنده رابطه بین کوتاه‌ترین فاصله بین مکان انفجار و سازه است. روابط زیر به منظور رسم منحنی‌های شکل ۳-۵ ارایه شده‌اند (که در آن d فاصله بر حسب متر است).

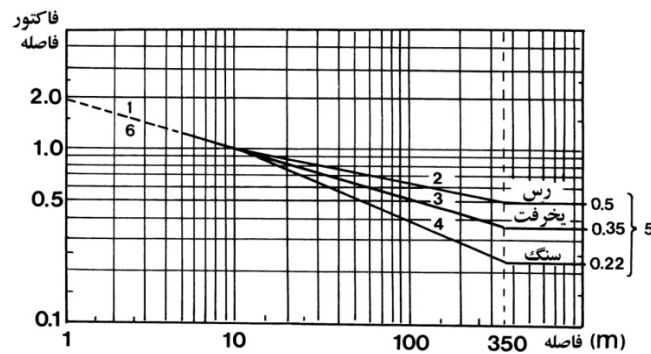
$$F_d = 1.91d^{-0.28}$$

$$F_d = 1.56d^{-0.19}$$

$$F_d = 1.91d^{-0.29}$$

$$F_d = 2.57d^{-0.42}$$

در فواصل بیشتر از ۳۵۰ متر مقادیر $F_d=۰/۲۲$ ، $F_d=۰/۳۵$ و $F_d=۰/۵۰$ استفاده می‌شود. همچنین زمانی که مولفه قائم سرعت ذره برابر ۷۰، ۳۵ و یا ۱۸ میلی‌متر در ثانیه باشد مقدار ضریب فاصله برای توده سنگ‌ها ۱۸، برای خرده سنگ‌ها ۱۵ و برای رس ۹ است.



شکل ۵-۲- نمودار تعیین ضریب فاصله (F_d)

- ضریب زمان اجرای پروژه: ضریب زمان اجرای پروژه (F_t) به مدت زمان فعالیت‌های آتشباری در منطقه بستگی دارد و مقادیر آن در جدول ۵-۶ ارایه شده است.

جدول ۵-۶- مقادیر ضریب زمان انجام پروژه (F_t)

F_t	نوع فعالیت انفجاری
۱/۰۰	فعالیت‌های سازه‌ای نظیر تونل‌ها، مغارها، جاده‌ها و گودبرداری
۰/۷۵ - ۱/۰۰	معدنکاری و استخراج مواد معدنی (برای استخراج بیش از یک سال از مقدار ۱ و برای استخراج بیش از پنج سال از مقدار ۰/۷۵ استفاده می‌شود).

۵-۳- معیارها و استانداردهای لرزش موجود برای جلوگیری از خسارت

به منظور اندازه‌گیری خسارات وارد به سازه‌ها در اثر لرزش انفجار، اکثراً از معیار حداکثر سرعت ذره استفاده می‌شود. بر این اساس، استانداردها و معیارهایی بر پایه حداکثر سرعت ذره ارایه شده است. بررسی دقیق نحوه تاثیر امواج لرزه‌ای و ایجاد خسارت آن‌ها بر سازه‌ها و موارد دریافت کننده لرزش مختلف، نشان می‌دهد که عوامل دیگری مانند فرکانس، طول موج، طول مدت لرزش و نظایر آن نیز اهمیت زیادی دارند. بر این اساس، ارایه معیار خسارت بر اساس یک عامل حداکثر سرعت ذره در همه موارد کارایی ندارد. بنابراین، با توجه به اهمیت تاثیر فرکانس بر خسارات ناشی از لرزش انفجار، استانداردهایی بر پایه حداکثر سرعت ذره و فرکانس ارایه شده‌اند.

۵-۳-۱- حداکثر سرعت ذره (PPV) به عنوان معیار خسارت

رده‌بندی خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذرات در جدول ۵-۷ ارایه شده است.

جدول ۵-۷- رده‌بندی خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذرات

میزان خسارت	سرعت ذره
بدون خسارت	< ۵۰ mm/s
ترک‌های ریز	۱۰۰ mm/s
ایجاد شکاف	۱۵۰ mm/s
شکاف‌های بزرگ	۲۲۲ mm/s

۵-۳-۲- حداکثر سرعت ذره و فرکانس به عنوان معیارهای خسارت

فرکانس لرزش را می‌توان به دو روش طیف واکنش و فوریه محاسبه کرد. از فرکانس همراه با حداکثر سرعت ذره برای تعیین معیار خسارت استفاده می‌شود. در جدول ۵-۸ معیارهای خسارت پیشنهادی بر اساس حداکثر سرعت ذره برای فرکانس‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۵-۸- معیار خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذره و فرکانس

فرکانس (Hz)	حداکثر سرعت ذره ناشی از انفجار (mm/s)	نوع سازه
۱۰-۶۰	۳۰	سازه‌های فولادی یا ساخته شده از بتن مسلح نظیر کارخانه‌ها، دیوارهای نگهدارنده، پل‌ها، برج‌های فولادی، کانال‌های باز تونل‌های زیرزمینی و اتاقک‌های آن
۶۰-۹۰	۳۰-۴۰	
۱۰-۳۰	-	
۳۰-۶۰	-	
۱۰-۶۰	۱۸	
۶۰-۹۰	۱۸-۲۵	سازه‌هایی که پی، دیوارها و کف آن از سیمان ساخته شده‌اند، دیوارها از سیمان و ماسه ساخته شده‌اند، حفاریات و تونل‌های احداث شده در سنگ‌های مقاوم
۱۰-۳۰	-	
۳۰-۶۰	-	
۱۰-۶۰	۱۲	
۶۰-۹۰	۱۲-۱۸	
۱۰-۳۰	-	

ادامه جدول ۵-۸- معیار خسارت بر اساس حداکثر سرعت ذره و فرکانس

فرکانس (Hz)	حداکثر سرعت ذره ناشی از انفجار (mm/s)	نوع سازه
۳۰-۶۰	-	سازه‌ها با دیوارهای بتنی و سقف چوبی
۱۰-۶۰	۸	
۶۰-۹۰	۸-۱۲	
۱۰-۳۰	-	
۳۰-۶۰	-	سازه‌های تاریخی و یا دیگر سازه‌های حساس

فصل ۶

روش‌های پیشگیری، کنترل

و کاهش پیامدهای نامطلوب

۶-۱- آشنایی

به منظور کاهش خسارات ناشی از لرزش زمین در انفجارها، باید یا میزان تولید لرزش و یا میزان انرژی لرزه‌ای انتقال یافته را کاهش داد. برای کاهش لرزش مهم‌ترین عامل تاثیرگذار، طراحی انفجار است. بنابراین، با تغییر در عامل طراحی انفجار می‌توان تا حدود زیادی لرزش زمین را کاهش داد که از موثرترین پارامترهای آن، زمان تاخیر است. برای کاهش خسارات ناشی از لرزش، کاهش لرزش انتقال یافته در محیط انتقال امواج انجام می‌شود. مهم‌ترین و عملی‌ترین روش مورد استفاده، ایجاد ناپیوستگی یا شکاف در مسیر حرکت امواج لرزه‌ای در محیط انتقال دهنده امواج است.

۶-۲- روش‌های کاهش لرزش

به منظور کنترل میزان تولید لرزش زمین می‌توان از روش انفجار، الگوی حفاری، شکل خرج‌گذاری و الگوی شروع انفجار با شرایط موجود استفاده کرد. مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده شدت لرزش به صورت زیر است:

- حداکثر خرج منفجر شده در هر تاخیر

- شرایط گل‌گذاری

- شرایط زمین‌شناسی نظیر ویژگی‌های سنگ‌ها و روباره

- فاصله از محل انفجار

روش‌های تجربی کاهش لرزش با در نظر گرفتن میزان خرج در هر تاخیر به شرح زیر است:

- استفاده از الگوی انفجار، تعداد، قطر و زاویه چال‌ها و فاصله‌های زمانی مناسب

- استفاده از روش خرج‌گذاری منقطع

- استفاده از خرج با قطر کمتر از قطر چال

- تقسیم کردن یک پله انفجاری به چند زیر پله

از طریق کاهش زمان حبس ماده منفجره در لحظه انفجار نیز می‌توان لرزش زمین را کاهش داد. این کار به روش‌های زیر انجام

می‌شود:

- انتخاب مناسب الگوی انفجار

- افزایش شیب چال‌ها

در انفجارهای با مسافت کمتر از ۱۰۰ متر، امکان تداخل امواج لرزه‌ای در اثر عکس‌العمل‌های بین فواصل تاخیری متفاوت بسیار کم است. بنابراین خطر همراه‌شدگی^۱ انفجار در بین فواصل تاخیری در انفجارهای بزرگ معادن روباز به دلیل تاثیر در فواصل دورتر احتمال بیشتری دارد.

برای جدایش خرج چال‌ها حداقل زمان حدود ۱۰ تا ۲۵ میلی‌ثانیه توصیه می‌شود. افزایش زمان تاخیر در کاهش لرزش تا حد معینی موثر است. بر این اساس یکی از ساده‌ترین روش‌های کاهش سطح لرزش زمین ناشی از انفجار، استفاده از تاخیرهای مناسب است.

۶-۳- روش‌های عمومی برای کنترل لرزش انتقالی

یکی از روش‌های کاهش لرزش انتقال یافته به سازه‌ها، افزایش عمق پی سازه است. با افزایش عمق پی، به ویژه زمانی که امواج سطحی رایلی انتشار یافته‌اند، ضریب انتقال کاهش می‌یابد. علت این اثر در مورد امواج رایلی این است که دامنه مولفه قائم امواج رایلی در زیر سطح زمین بیشترین مقدار را دارد که با افزایش عمق به سرعت کاهش می‌یابد. در حالتی که لرزش به طور قائم از درون زمین به سمت ساختمان حرکت کند به تدریج میرا می‌شود و این میرایی همراه با عمیق شدن پی، افزایش می‌یابد. همچنین، ضریب انتقال با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد. به طور کلی، در انتقال لرزش از زمین به سازه، سرعت ذره در پی ساختمان کمتر از سرعت ذره در زمین است. البته، ممکن است شدت لرزش در ساختمان با ایجاد پدیده تشدید، افزایش یابد.

۶-۳-۱- ایجاد شکاف برای کنترل لرزش

- با استفاده از شکاف بین نقطه انفجار و سازه مورد نظر می‌توان لرزش انتقالی را به روش‌های زیر کاهش داد:
 - جداسازی فعال که در آن لرزش با ایجاد یک شکاف در نزدیکی منبع ایجاد لرزش، کاهش می‌یابد.
 - جداسازی غیرفعال که طی آن یک شکاف در فاصله دور از منبع تولید لرزش و در نزدیکی مکان مورد نظر احداث می‌شود. موارد زیر در مورد جداسازی فعال اهمیت دارند:
 - اگر نسبت عمق شکاف به طول موج برابر 0.6 باشد ضریب میرایی 0.25 خواهد بود.
 - ایجاد یک شکاف در پیرامون خرج مانند این است که فاصله به اندازه 10 برابر طول موج افزایش یابد.
 - زمانی که شکاف، منبع لرزش را به طور کامل احاطه نمی‌کند، میرایی فقط در مکان‌هایی رخ می‌دهد که در هر جهت با زاویه 45 درجه از انتهای هر شکاف واقع شده‌اند.
 - در روش جداسازی غیرفعال، منطقه ایمن به صورت یک منطقه شبه‌دایره در پشت شکاف است. این فضا دارای محدوده مشخصی نیست. در جداسازی غیرفعال موارد زیر اهمیت دارد:
 - با افزایش قدرت انفجار شکاف بزرگتری مورد نیاز است.
 - شدت لرزش‌های قائم به سمت جلو و جوانب شکاف
 - استفاده از دیوارهای حایل تاثیر کمتری نسبت به شکاف‌های باز دارند.
- یکی از روش‌های کاهش میزان انتقال لرزش زمین ناشی از انفجار، حفر شکاف در سنگ در فاصله بین منبع انفجار و مکان دریافت‌کننده لرزش است. اگر شکاف در جهت پی حفر و به آن ختم شود ساختمان نه تنها در مقابل لرزش حمایت نمی‌شود بلکه باعث شکستن سنگ‌های پشت پی نیز می‌شود. با حفر شکاف در مقابل ساختمان و یا در یک صفحه حساس به لرزش می‌توان حدود 80 درصد از امواج لرزشی را میرا کرد.
 - در فواصل بیش از دو برابر عمق، شکاف موثر نیست. در فواصل کوتاه‌تر، شکاف‌ها برای کاهش لرزش خیلی موثرترند. برای دستیابی به بالاترین سطح ایمنی، یک شکاف باید دارای خصوصیات زیر باشد:
 - شکاف باید کاملاً از خرده‌های حفاری و آب خالی باشد.
 - باید عمق شکاف پایین‌تر از نقطه تاثیر انفجار باشد.
 - فاصله شکاف تا مناطق مورد حفاظت باید کمتر از عمق شکاف باشد.

۶-۳-۲- استفاده از ترانشه‌های باز در معادن سطحی

یکی از روش‌های کنترل لرزش زمین به سازه‌ها یا مکان مورد نظر، استفاده از ترانشه‌های باز است. ایجاد شکاف و به طور خاص، ترانشه، میزان لرزش‌های انتقال یافته را کاهش می‌دهد. در این حالت، لرزش حتی تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. هر اندازه فاصله ترانشه از محل انفجار کمتر باشد تاثیر ترانشه در میرایی بیشتر می‌شود و با افزایش عمق ترانشه (افزایش نسبت عمق ترانشه به عمق چال) میزان کاهش لرزش نیز بیشتر خواهد شد.

۶-۴- روش‌های کاهش لرزش هوا

نحوه تاثیر پارامترهای مختلف بر لرزش هوا و زمین یکسان نیست و در اکثر موارد حتی تاثیر این عوامل بر لرزش هوا در مقایسه با لرزش زمین به صورت معکوس است. بنابراین، اگر خرج درون توده سنگ به نحو مطلوب‌تری محبوس شود، بیشترین کاهش را در ایجاد فشار و حرکت هوا ایجاد می‌کند. مهم‌ترین دلایل ایجاد لرزش هوا عبارتند از:

- انتشار امواج فشاری در هوا

- انتشار امواج فشاری در سنگ

- انتشار امواج ناشی از رها شدن گازها

- انتشار امواج ناشی از گل‌گذاری نامناسب

امواج فشاری هوا نسبت به دیگر امواج دامنه بزرگتری دارند. هر چه عمق خرج و یا مقدار محبوس شدن آن بیشتر باشد امواج فشاری کمتری تولید می‌شود. فرکانس این امواج بسیار کمتر از فرکانس امواج فشاری در محیط سنگ، امواج ناشی از رها شدن گازها و گل‌گذاری نامناسب است. این امواج پس از امواج فشاری محیط سنگی به حسگرها می‌رسند.

امواج ناشی از رها شدن گازها، زمانی تولید می‌شوند که گازهای تولید شده ناشی از انفجار، سنگ‌های خرد شده را به بیرون پرتاب می‌کنند. این امواج پس از امواج فشاری هوا به حسگرها می‌رسند. امواج ناشی از رها شدن سنگ‌ها به همراه امواج ناشی از خروج گل‌گذاری، بسیار مهیب هستند و باعث ناراحتی افراد در محدوده آتشیاری می‌شوند.

امواج ناشی از خروج گل‌گذاری زمانی ایجاد می‌شوند که گازها مواد گل‌گذاری را به بیرون پرتاب کنند. این امواج، فرکانس بالایی دارند. برای جلوگیری از انتشار این امواج باید از گل‌گذاری با طول مناسب استفاده شود.

استفاده از فتیله انفجاری برای انفجار خرج‌های داخل چال باعث افزایش لرزش هوا می‌شود. توصیه می‌شود به جای فتیله انفجاری از روش‌های جایگزین دیگری مانند روش الکتریکی یا نائل استفاده شود.

برای کاهش ضربه لرزش هوا و صدای ناشی از عملیات انفجار معادن روباز، تدابیر کنترلی زیر پیشنهاد می‌شود:

- افزایش طول گل‌گذاری در چال‌های انفجاری

- استفاده از لوله‌های نائل به جای استفاده از فتیله انفجاری به عنوان خط آتش

- انجام انفجار در روز

- اجتناب از انفجار، وقتی که باد تند به سمت مناطق مسکونی می‌وزد.

۶-۵- جلوه‌گیری از پرتاب سنگ

برای انفجار چال‌های با قطر کم در مناطق حساس که پرتاب سنگ به افراد و اشیاء صدمه وارد می‌کند باید اقدامات ویژه‌ای برای جلوه‌گیری از پرتاب سنگ انجام شود. در این راستا، موارد متعددی به شرح زیر باید مد نظر قرار گیرند:

۶-۵-۱- تاثیر ساختار توده سنگ

در یک منطقه، حتی با وجود شرایط زمین‌شناسی کاملاً مشابه ممکن است ساختار سنگ متفاوت باشد. ترک‌ها، درزه‌ها و صفحات ضعف در هیچ دو نقطه‌ای کاملاً یکسان نیستند. با توجه به هوازگی، سنگ‌های سطحی معمولاً نسبت به سنگ‌های عمقی، ناهمسان‌ترند. بنابراین، برای اجتناب از برخورد با مشکل در طی عملیات حفاری و انفجار، باید نقشه درزه‌ها و شکستگی‌های بسیار مهم تهیه شود. قبل از طراحی باید سطح زمین کاملاً تمیز شود و بازرسی قابل اطمینان از منطقه انجام گیرد. نتایج بازرسی باید به طور کامل ثبت شوند تا در زمان حفاری و طراحی انفجار در نظر گرفته شوند. حفاری‌های قبلی، اطلاعات خوبی از ساختمان سنگ را در اختیار طراح قرار می‌دهند. به عنوان مثال، درزه‌های افقی در سطح زمین دیده نمی‌شوند و باید آن‌ها را از انفجارهای قبلی تشخیص داد. بنابراین، اطلاعات لازم برای پیش‌گیری از هر گونه پرتاب سنگ باید جمع‌آوری شود.

۶-۵-۲- حفاری

هنگام طراحی انفجار، باید به این نکته توجه کرد که استفاده از قطر چال بزرگ، خرج بیشتری را نیاز دارد. این شرایط باعث می‌شود تا خطر پرتاب سنگ افزایش یابد. برای کاهش خطر پرتاب سنگ باید چال‌ها به دقت حفر شوند و از ابزارهای خاص شیب‌سنجی برای حفر آن‌ها استفاده شود. در شرایطی که بلوک انفجاری در یک منطقه با شیب متغیر، مثل یک تپه قرار دارد مقدار بارسنگ نیز متغیر خواهد بود. در این شرایط، باید دقت شود تا بارسنگ از حد مجاز کمتر نشود که در غیر این صورت پدیده پرتاب سنگ تشدید خواهد شد. در انفجار ترانشه‌ای و انفجارهای معمولی در جاهایی که ارتفاع پله در مقایسه با اندازه بارسنگ کوتاه است و در اصطلاح به آن انفجار خیلی سخت اطلاق می‌شود ایجاد پرتاب سنگ قابل ملاحظه می‌شود زیرا در این حالت خرج ویژه بالا است و اغلب، خرج نزدیک به سطح قرار می‌گیرد.

۶-۵-۳- خرج‌گذاری و شروع انفجار

در زمان خرج‌گذاری، ضروری است تا مواد منفجره طبق طراحی در داخل چال قرار گیرند. خرج ته چال و خرج میان چال باید اندازه مشخص و مناسبی داشته باشند. همچنین، باید از مقدار گل‌گذاری مناسبی استفاده شود. در گل‌گذاری، دو نکته اساسی وجود دارد یکی، طراحی طول گل‌گذاری متناسب با شرایط انفجار و دیگری، دانه‌بندی مواد مصرفی در گل‌گذاری است. با افزایش طول گل‌گذاری مقدار پرتاب سنگ کاهش می‌یابد. حداکثر مقدار پرتاب سنگ به دست آمده در حالتی است که در آن نسبت طول خرج‌گذاری نشده به قطر چال، حدود ۱۰ باشد و با افزایش این نسبت تا یک عمق بحرانی، طول پرتاب سنگ کاهش می‌یابد. در طراحی الگوی شروع انفجار باید از تاخیرهای بیش از ۱۰۰ میلی‌ثانیه بین چال‌های موازی استفاده نشود. در تاخیرهای بزرگتر، سنگ‌های حاصل از انفجار چال‌های ردیف اول پس از پرتاب، نسبت به ردیف‌های دیگر فاصله می‌گیرند و در این صورت عمل پوشش برای ردیف‌های بعدی را انجام نمی‌دهند. به این ترتیب، سنگ‌های ناشی از انفجار ردیف‌های بعدی پرتاب می‌شوند و پدیده پرتاب سنگ را تشدید می‌کنند.

در هنگام انفجار چال‌ها باید از شروع انفجار در بالای چال خودداری شود. زمانی که انفجار از بالای چال شروع شود مقدار پرتاب سنگ نیز افزایش می‌یابد. الگوی شروع انفجار باید به درستی طراحی شود تا هر چال دارای بارسنگ مشخص باشد.

۶-۵-۴- کنترل پرتاب سنگ

برای کاهش پرتاب سنگ راه کارهای زیر توصیه می‌شود:

- در توده سنگ‌های خرد شده و سست، مواد منفجره با افزودنی‌های خاص برای کاهش قدرت انفجار مورد استفاده قرار گیرد.
- بارسنگ و فاصله ردیفی مناسب باید مطابق با ارتفاع پله انتخاب شود.
- طول ستون گل‌گذاری باید بزرگتر از ۰٫۶ برابر بارسنگ باشد.
- چال شیب‌دار مطابق با شیب پله حفاری شود.
- چال‌ها باید تا حد ممکن از نواحی ضعیف دورتر حفر شوند.
- بارسنگ و فاصله ردیفی چال‌ها باید با دقت تعیین شود.
- مسوولین انفجار باید قبل از انفجار عمق چال‌ها را کنترل کنند تا مطابق طرح انفجار باشد.
- تمام چال‌ها باید به طور مناسب با استفاده از خرده‌های حفاری با اندازه ۶ تا ۸ میلی‌متر همراه با ذرات ریزتر گل‌گذاری شوند.

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر پانصد عنوان نشریه تخصصی-فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در پایگاه اطلاع‌رسانی nezamfanni.ir قابل دستیابی می‌باشد.

امور نظام فنی

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision

Guidelines for Evaluation and Control of Consequences of Blasting in Surface Mining

No.616

Office of Deputy for Strategic Supervision
Department of Technical Affairs

Nezamfanni.ir

Ministry of Industry, Mine and Trade
Deputy of Mine Affairs and Mineral
Industries
Office for Mining Supervision and
Exploitation

<http://mimt.gov.ir>

2013

این نشریه

پدیده پرتاب سنگ و لرزش زمین ناشی از انفجار در معادن
سطحی را بررسی کرده و روش‌های مختلف کنترل آن را ارایه
می‌کند.