

بررسی تاثیر شکاف بر میرایی لرزش زمین ناشی از انفجار به روش عددی

مهدی پورقاسمی ساغند^۱، محمد فاروق حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mpourghasemi@ut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، mfarogh@ut.ac.ir

(دریافت ۲۵ دی ۱۳۹۳، پذیرش ۲۶ اسفند ۱۳۹۴)

چکیده

یکی از روشهای کاهش لرزش انتقالی ناشی از انفجار، استفاده از ناپیوستگی‌های باز است. در این تحقیق، تاثیر شکاف بر میرایی امواج ناشی از انفجار به کمک روش عددی بررسی شده است. مدلسازی محیط انفجار با ایجاد یک چال انفجاری و ثبت سرعت ذرات در نقاط چهار ناحیه مختلف در فواصل مختلف از انفجار انجام شده است. همچنین با ایجاد شکاف و تغییر عمق آن تاثیر حضور، موقعیت و عمق شکاف بدست آمده است. میزان کارایی موقعیت شکاف در دو حالت ایزوله کردن فعال و غیر فعال هم بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با ایجاد شکاف می‌توان لرزش زمین را تا ۸۵ درصد کاهش داد. البته تاثیر این میرایی در سطح به مراتب از نقاط واقع در عمق، بیشتر است. همچنین بیشترین تغییر میرایی در اولین گام ایجاد شکاف (معادل نصف طول چال) ایجاد می‌شود که مقدار آن در مناطق نزدیک به انفجار حدود ۴۰ درصد و در نواحی دارای فاصله بیشتر از انفجار حدود ۱۰ درصد است. در این تحقیق مشخص شد که بین نسبت عمق شکاف به طول چال و مقدار میرایی حاصل ارتباط مناسبی با ضریب تصمیم‌گیری (R^2) حدود ۰/۹ برقرار است ولی بین پارامتر فاصله شکاف از چال و مقدار میرایی رابطه کلی مناسبی در همه حالات بدست نمی‌آید. این بررسی نشان می‌دهد که تاثیر روش غیر فعال در میرایی لرزش‌های سطحی از روش فعال بیشتر است و در مقابل اگر ملاک، نقاط واقع در عمق باشد روش فعال مناسب‌تر است. با این وجود، اگر عمق شکاف زیاد شود تاثیر هر دو روش به هم نزدیک می‌شود.

کلمات کلیدی

لرزش زمین ناشی از انفجار، Autodyn 2D، ایزوله کردن فعال و غیر فعال، میرایی.

۱- مقدمه

در اکثر تحقیقات انجام شده، ایجاد یک ناپیوستگی باز در محیط بین منبع تولید و نقطه دریافت کننده امواج به عنوان بهترین راه حل شناخته شده است. این ناپیوستگی را می‌توان به صورت‌های مختلف ایجاد کرد که مواردی مانند شکاف حاصل از انفجار پیش شکافی، شکاف توسط تجهیزات برش زمین و ایجاد ترانشه از این قبیل هستند. با توجه به شرایط خاص انفجار و موارد مربوط به برداشت اطلاعات از یک طرف و نیاز به تکرار در شرایط کاملاً یکسان به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای خاص، روش عددی در این نوع تحقیقات جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. به همین دلیل برای بررسی تاثیر تغییرات یک عامل خاص در شرایط آزمایش یکسان بهترین انتخاب روش عددی است.

در تحقیق حاضر، اثر وجود یک شکاف، موقعیت آن و عمق در نواحی مختلف با کمک روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. این تحلیل در نرم افزار اتوداین و به صورت دو بعدی انجام شده است. در این راستا، در مدل ایجاد شده، مقدار سرعت ذرات دریافت شده در چند ناحیه با فواصل مختلف از منبع تولید امواج در شرایط بدون شکاف و با وجود شکاف بررسی شده است. همچنین تاثیر موقعیت و عمق شکاف بر روی میرایی امواج لرزش مورد تحقیق قرار گرفته است.

۲- تاثیر ناپیوستگی باز بر میرایی امواج

نتایج حاصل از تحقیقات مختلف نشان داده است که با استفاده از یک ناپیوستگی باز مانند یک ترانشه یا یک سطح آزاد، لرزش زمین انتقالی تا بالای ۷۰ درصد کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، پراکاش و همکاران [۱۳] کاهش بالای ۶۵ درصد لرزش زمین در اثر وجود ترانشه و حسینی و سن [۱۴] کاهش تا ۸۹ درصد را با ایجاد سطح آزاد اعلام کرده‌اند.

برای ایزوله کردن امواج ناشی از انفجار می‌توان از دو روش زیر استفاده کرد.

- ایزوله کردن فعال

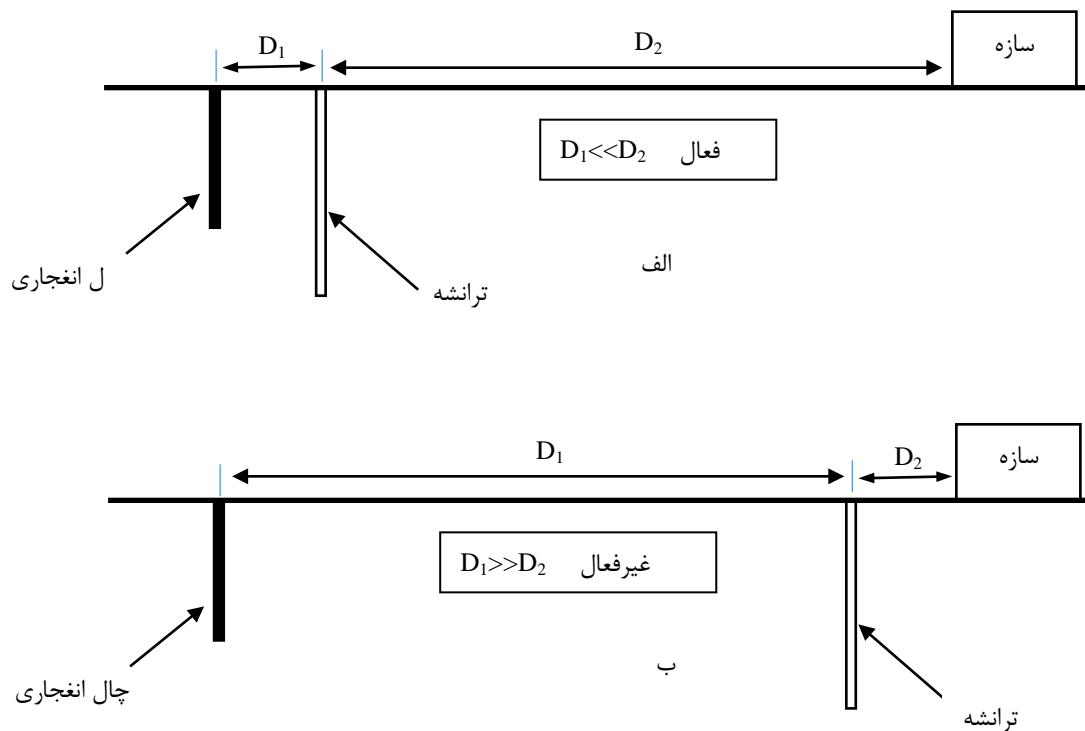
- ایزوله کردن غیر فعال

در روش فعال، ایزوله کردن امواج در نزدیکی منبع تولید صورت می‌گیرد ولی در روش غیر فعال، این کار در فاصله بیشتری از منبع و در نزدیکی نقطه دریافت کننده امواج انجام می‌شود. عبارت دیگر در روش فعال میرا کننده که می‌تواند یک شکاف یا ناپیوستگی باشد در نزدیکی نقطه انفجار قرار ایجاد می‌شود ولی در حالت غیر فعال این میراکننده در نزدیکی سازه و دور از انفجار قرار می‌گیرد. در شکل ۲ وضعیت ایزوله کردن فعال و غیر فعال نشان داده شده است.

توجه‌پذیری اقتصادی و همچنین کارایی بالا، باعث شده تا از مواد منفجره در فعالیتهای معدنکاری و عمرانی به طور گسترده استفاده شود به طوری که یکی از اولین انتخاب‌ها در فرآیند شکست سنگ استفاده از مواد منفجره است. سینگ و سینگ [۱] مشخص کرده‌اند که فقط ۲۰ تا ۳۰ درصد از انرژی ماده منفجره صرف کارهای مفید مانند خردایش و جابجایی توده سنگ می‌شود و مابقی انرژی آن باعث بروز پدیده‌های مخربی مانند لرزش زمین، لرزش هوا و پرتاب سنگ می‌شود. از میان این پیامدها، پدیده لرزش زمین یکی از مهمترین اثرات نامطلوب انفجار به شمار می‌آید که درصد بالایی از انرژی ماده منفجره را به خود اختصاص می‌دهد. مواردی مانند درصد بالای انرژی مصرفی، تاثیر گذاری وسیع بر محیط پیرامون (افراد، سازه‌ها و ..) و در مجموع، ابعاد اقتصادی ناشی از صدمات آن باعث شده است تا لرزش زمین به عنوان مهمترین پیامد انفجار مطرح و مورد بررسی قرار گیرد. البته به جز انفجار، منابع متعدد دیگری مانند ضربه ماشین‌آلات عمرانی و حرکت ماشین‌آلات ریلی نیز لرزش زمین را ایجاد می‌کنند.

فعالیت‌های محققین بر روی این پدیده به دو دسته تقسیم می‌شود. گروهی از آنها بر روی منبع تولید موج تمرکز کرده و در مورد کاهش میزان تولید لرزش تحقیق و بررسی کرده‌اند. این گروه ابتدا فاکتورهای موثر در تولید لرزش را مشخص و سپس درصد مطالعه چگونگی تاثیر آنها برآمده و راهکارهای کاهش تولید لرزش را با توجه به این فاکتورها بررسی و اعلام کرده‌اند. محققانی مانند ویلر [۲]، بلیر و جیانگ [۳]، لویز جمینو و همکاران [۴]، باندی [۵]، پال روی [۶]، هاشینو و همکاران [۷]، والدیوا و همکاران [۸]، رزمانیس و همکاران [۹] و یوسال و همکاران [۱۰]، عوامل موثر بر تولید لرزش مانند خرج در هر تاخیر، نوع خرج مصرفی، وضعیت طول خرج، نوع تاخیر و بعضی عوامل غیر قابل کنترل را مورد بررسی قرار داده‌اند و راهکارهای مناسبی برای کاهش تولید لرزش ارائه کرده‌اند.

موارد متعددی وجود دارد که نمی‌توان تغییر زیادی در فاکتورهای موثر بر تولید لرزش ایجاد کرد و باید تولید لرزش زمین را حتی در سطوح بالا پذیرفت. لذا راه حل دوم، کاهش میزان انتقال لرزش زمین به مکان خاص مورد حفاظت است. این موضوع نیز توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان از برازل [۱۱]، گوپتا و همکاران [۱۲]، پراکاش و همکاران [۱۳]، حسینی و سن [۱۴]، یوسال و همکاران [۱۵]، ونکاتش و همکاران [۱۶]، پارک و همکاران [۱۷] و الزاوی و ال نگر [۱۸] نام برد.



شکل ۱- ایزوله کردن فعال و غیر فعال لرزش توسط یک شکاف (الف فعال ب) غیر فعال [۱۷].

فرآیند انفجار وجود دارد و مدلسازی و اعمال شرایط مختلف بر روی مدل در این نرم افزار به سهولت قابل انجام است این موضوع باعث شده تا این نرم افزار کاربرد روزن افزونی در حل مسائل دینامیکی داشته باشد. از طرفی مدتی است که این نرم افزار همراه با مجموعه Ansys ارائه شده و همراهی با این مجموعه باعث قویتر شدن این نرم افزار گردیده است.

۳-۱- مدل مواد زمین

در این بررسی، از بتن با مقاومت ۳۵ مگاپاسکال به عنوان مدل زمین استفاده شده است. برای مدلسازی و حل مساله باید یک مدل رفتاری برای آن انتخاب شود. مدل مقاومتی در نظر گرفته شده برای آن، مدل RHT^1 می باشد. این مدل در مدلسازی های مشابه بیشترین کاربرد را داشته که بر این اساس در اینجا نیز از آن استفاده شده است.

۳-۲- مدل مواد منفجره

نظرات متعددی در خصوص میزان تاثیر و کارایی این دو روش وجود دارد که اکثر آنها روش فعال را موثرتر از روش غیر فعال می دانند. دلیل ذکر شده نیز این است که در روش غیر فعال اغتشاشات قبل از رسیدن به نقطه ای که باعث فیلتر شدن آنها شود در محیط پخش می شوند و این باعث می شود قبل از رسیدن امواج به ناپیوستگی باز، محیط گسترده ای تحت تاثیر این امواج قرار گیرد. از طرفی مباحث بازسازی و ترمیم فضای ایجاد شده بعد از رفع منبع تولید کننده امواج نیز از نکات دیگر است.

۳- مدلسازی عددی با نرم افزار Autodyn

نرم افزار Autodyn برای تحلیل مسائل غیرخطی دینامیکی به کار می رود. این نرم افزار که بر اساس ترکیبی از روشهای المان محدود، حجم محدود و بدون مش تحلیل می کند در مدلسازی فرآیندهایی مانند انفجار و ضربه که تغییر شکل های بزرگ در گام زمانی کوچک اتفاق می افتد مورد استفاده قرار می گیرد. در این نرم افزار بر اساس روابط غیرخطی و با در نظر گرفتن مدل های رفتاری و همچنین مدل های پردازشی مختلف، مسائل دینامیکی قابل حل است. در این نرم افزار امکان مدل کردن

¹- Riedel, Hiermaier and Thoma

بود. بر این اساس در مدل دو بعدی نیز همین ابعاد در نظر گرفته شد.

همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود دو ژئوفون g_3 و g_4 به هم نزدیکترند. دلیل این است که این دو، دو طرف لبه شکافی قرار دارند که در مدل ایجاد خواهد شد. تا تاثیر آن بررسی شود. مابقی ژئوفونها فاصله مساوی با شکاف دارند تا اثر شکاف بر لرزش نقاط با فواصل مختلف نیز بررسی شود.

در این تحلیل موارد مختلفی به شرح زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- بررسی و مقایسه چگونگی میرایی امواج در نواحی مختلف نزدیک و دور از نقطه انفجار در مدل بدون شکاف

- بررسی تاثیر عمق و موقعیت شکاف در میرایی امواج در مدل دارای شکاف

- بررسی میرایی امواج در مدل بدون شکاف و مدل دارای شکاف در پایین‌تر از سطح زمین

در تمامی موارد فوق، مقایسه‌ها به صورت نقطه به نقطه، میانگین در طول یک خط عمقی و میانگین ناحیه‌ای بوده است. به طور کلی چهار ناحیه در فواصل مختلف از نقطه انفجار در نظر گرفته شده که با حروف A تا D مشخص شده‌اند.

نزدیکترین ناحیه A و دورترین آنها ناحیه D است. موقعیت این نواحی به صورت فاصله از نقطه انفجار و به صورت نسبی از طول چال در نظر گرفته شده است. مرکز ناحیه A در فاصله $2/5$ برابر، B در فاصله $3/75$ برابر، C در فاصله 5 برابر و D در فاصله $6/25$ برابر طول چال از نقطه انفجار قرار گرفته است. در تمام نمودارها، طول چال به صورت پارامتریک با نماد L نشان داده شده است. شکل ۳، وضعیت قرارگیری نواحی مورد بررسی را ارائه می‌دهد. در این تحقیق موقعیت حسگرها در هر ناحیه ثابت بوده است تا بتوان مقایسه بهتری انجام داد.

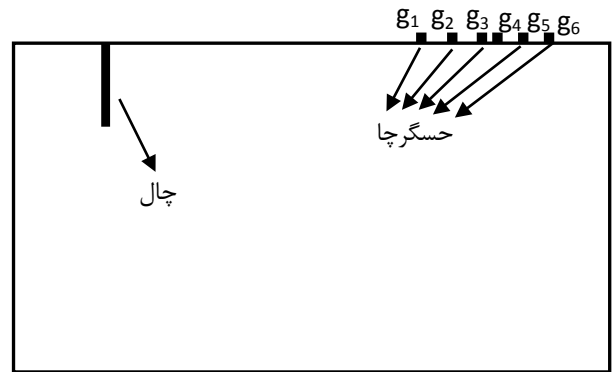
این چهار ناحیه شامل ۶ سنسور اندازه‌گیری لرزش مطابق شکل ۲ در سطح مدل هستند که با همین آرایش در زیر سطح نیز از سنسورها به منظور ثبت لرزش در نقاط عمیق تر استفاده شده است. این چهار ناحیه مقدار کمی پوشش دارند.

معیار فاصله نزدیک و دور برای یک منطقه را می‌توان بر اساس میزان لرزش ثبت شده در آن ناحیه عنوان کرد. بر این اساس ناحیه A و B به صورت نواحی نزدیک و ناحیه C و D به عنوان نواحی متوسط قابل تعریف هستند. این تقسیم بندی بر پایه تعاریف موجود برای میدان دور یا نزدیک است. در این مطالعه به دلیل واقع شدن ناحیه D در دورترین منطقه نسبت به دیگران، لفظ دور به آن اطلاق شده است.

از TNT به عنوان ماده منفجره در این تحلیل استفاده شده است. مواد منفجره عموماً با مدل رفتاری JWL^2 مدل‌سازی می‌شوند که در این تحقیق نیز از این مدل رفتاری استفاده شده است.

۳-۳- ساخت مدل عددی

به منظور انجام تحلیل عددی اثر شکاف بر روی میرایی امواج ناشی از انفجار، مدل‌سازی دو بعدی در نرم افزار Autodyn انجام شده است. بر این اساس، مدلی با ابعاد 1000×400 میلیمتر ساخته شده که جنس این مدل از نوع بتن با مقاومت 35 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. یک چال انفجاری با قطر 10 و عمق 80 میلیمتر با ماده منفجره TNT در نظر گرفته شده که موقعیت آن بر روی مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور جلوگیری از انعکاس امواج در مرزها، حالت مرز غیر انعکاسی در نظر گرفته شده است. برای ثبت میزان لرزش، تعدادی حسگر بر روی مدل در نظر گرفته شده تا مقدار سرعت ذره را در آن نقاط ثبت کنند. نمونه‌ای از موقعیت این حسگرها بر روی مدل ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



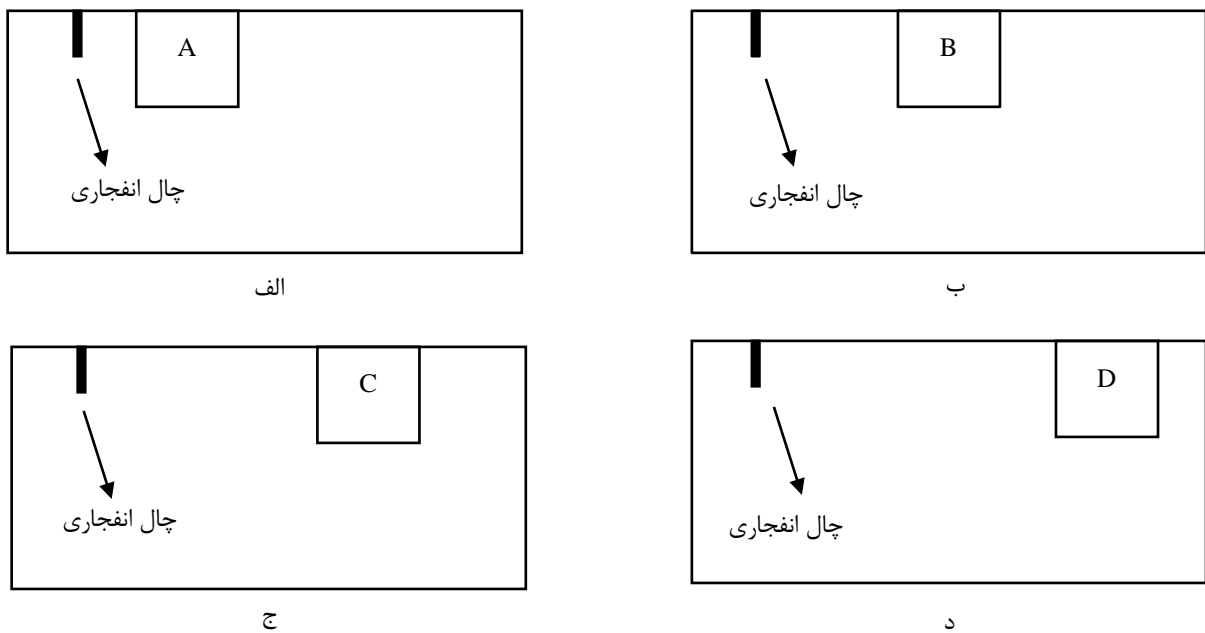
شکل ۲- نمونه‌ای از مدل ساخته شده در نرم‌افزار Autodyn.

این مدل دو بعدی براساس یک مدل تجربی با همین طول و ارتفاع از جنس بتن ساخته شده است. دلیلی استفاده از مدل دو بعدی سهولت ساخت و همچنین سرعت حل آن بود زیرا تعداد آزمایشهای انجام شده زیاد بودند. در مدل تجربی به منظور انجام انفجار با چاشنی و برای جلوگیری از تخریب دیواره چال از یک چال با قطر 10 و طول 80 میلیمتر استفاده شده

²- Jones-Wilkins-Lee

یکی از نکات مهم در مدلسازی عددی اعتبار سنجی آن است. هر چند مقادیر لرزش به دلیل دو بعدی بودن مدل کمی اغراق آمیز و زیاد است ولی نتایج نشان داده است که مقدار میرایی ناشی از شکاف بدست آمده از مدلسازی با نتایج حاصل از تحقیقات تجربی انجام شده توسط محققین دیگر مطابقت خوبی دارد. این موارد در متن مقاله در بخشهای مختلف مورد اشاره قرار گرفته است.

در این بررسی بیش از ۱۰۰ مرتبه مدل اجرا شده و در هر مرتبه مقادیر ثبت شده توسط سنسورها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۳- نمایش موقعیت چهار ناحیه مورد تحلیل الف) ناحیه A ب) ناحیه B ج) ناحیه C د) ناحیه D.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- بررسی میرایی امواج در نواحی مختلف در مدل بدون شکاف

همان گونه که ذکر شد سعی شده است تا تمام تحلیلها به دو صورت بررسی در سطح و عمق انجام شود. در تمام تحلیلها، مقدار سرعت ذره به عنوان ملاک لرزش در نظر گرفته شده و برای نمایش میزان میرایی از فاکتور تاثیر میرایی استفاده شده است. فاکتور تاثیر میرایی به صورت رابطه شماره ۱ قابل محاسبه است [۱۸]. لازم به ذکر است که در محاسبه میرایی، یک حسگر به عنوان مبنا قرار گرفته است.

$$AEF = \left(1 - \frac{PPV_S}{PPV}\right) \times 100 \quad (1)$$

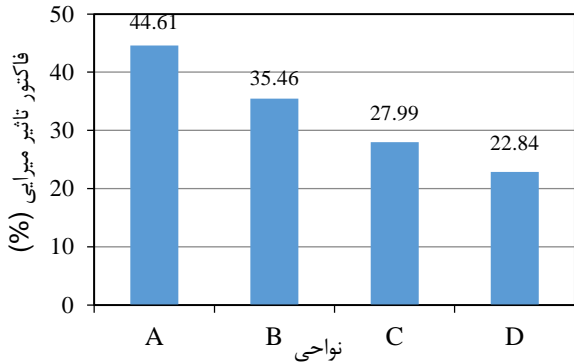
که در آن: AEF فاکتور تاثیر میرایی به درصد، PPV حداکثر سرعت ذره در حالت بدون شکاف یا قبل از شکاف به متر بر

ثانیه و PPV_S حداکثر سرعت ذره در حالت با شکاف یا بعد از شکاف به متر بر ثانیه است.

۴-۱-۱- بررسی در سطح زمین

در مدل ایجاد شده، با در نظر گرفتن چند حسگر در نقاط مختلف در چهار ناحیه مذکور وضعیت میرایی امواج در محدوده‌های نزدیک و دور از انفجار مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش حسگرها فقط بر روی سطح مدل قرار گرفتند و بدون ایجاد شکاف در مدل، سرعت ذره در روی سطح، برداشت شد. لازم به ذکر است که، فاصله حسگرها نسبت به هم در چهار ناحیه A تا D مساوی بودند.

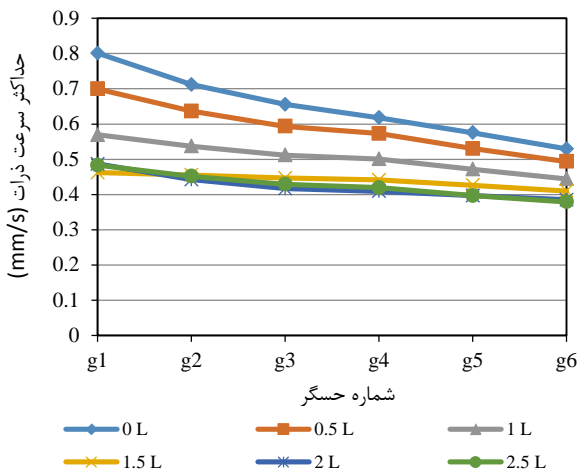
وضعیت تغییرات لرزش ثبت شده توسط حسگرها در هر منطقه به صورت مقایسه‌ای در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس



شکل ۶- میانگین تاثیر میرایی در چهار ناحیه.

۴-۱-۲- بررسی در عمق

میرایی امواج در نواحی مختلف در نقاط زیر سطح نیز بررسی شد. حسگرها از سطح به عمق با فواصل مساوی قرار داده شد تا مقدار لرزش در این نقاط نیز ثبت شود. فاصله عمقی بین حسگرها در هر مرحله به اندازه نصف طول چال در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این مدل سازی نشان داد که در هر منطقه، با افزایش عمق، میزان لرزش کمتر می شود و این اختلاف سرعت ذرات در نقاط نزدیک به سطح بیشتر و در نقاط عمیق کمتر است. تغییرات لرزش ثبت شده در ناحیه D در سطح و عمق در شکل ۷ ارائه شده است. در این نمودار، عمق حسگرها بر حسب طول چال مشخص شده است.

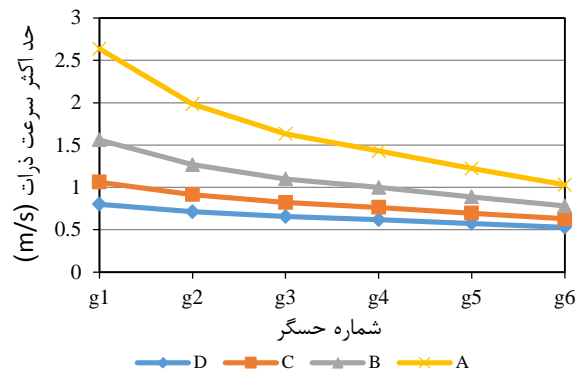


شکل ۷- تغییرات لرزش ثبت شده از سطح تا عمق در ناحیه D.

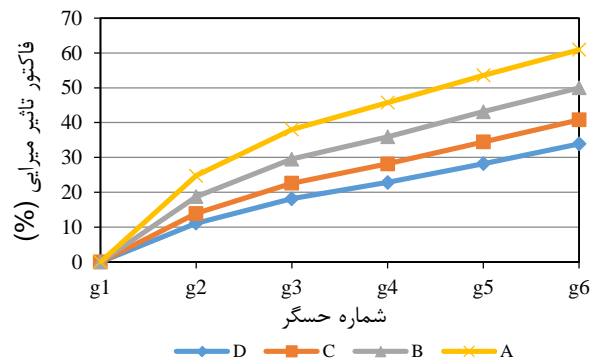
برای مقایسه وضعیت تغییرات لرزش در عمق در نواحی مختلف از میانگین تاثیر میرایی در هر افق نسبت به سطح هر ناحیه استفاده شد که نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان داد که با دور شدن از نقطه انفجار، تاثیرات عمقی کمتر می شود. مطابق شکل ۸، کاهش های ۱۰ تا ۱۵ درصد در هر مرحله در قسمت های عمیق به صفر نزدیک می شود. بیشترین تغییرات میرایی در فاصله ای معادل نصف طول چال از

این نمودار ملاحظه می شود که فاصله و شیب تغییرات از منطقه A به D کم می شود. بنابراین با دور شدن از نقطه انفجار، در فواصل مساوی، میرایی کمتر می شود و مقادیر نواحی مختلف نیز

به یکدیگر نزدیک می شوند. این روند به صورت نمودار فاکتور تاثیر میرایی نیز در شکل ۵ قابل مشاهده است. در این حالت، میزان لرزش حسگرهای هر منطقه نسبت به اولین حسگر در همان منطقه سنجیده شده است. وضعیت میرایی در شکل مذکور مطابق با تئوری ها و روابط تجربی میرایی است که عموماً به صورت نمایی تعریف می شوند.

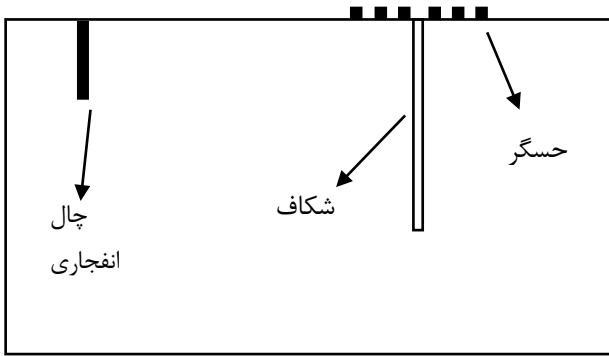


شکل ۴- تغییرات سرعت ذرات در ۴ ناحیه مورد بررسی در مدل بدون شکاف.



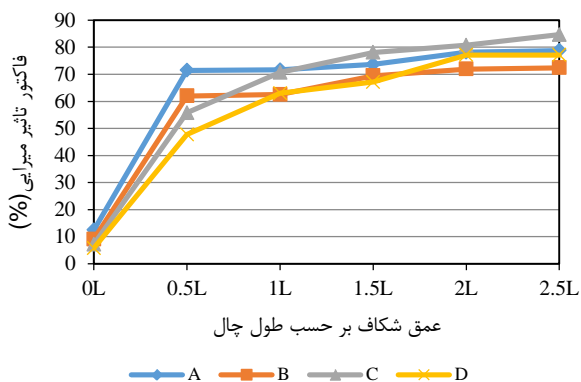
شکل ۵- تغییرات فاکتور تاثیر میرایی (AEF) نسبت به اولین حسگر در ۴ ناحیه در مدل بدون شکاف.

بررسی نمودارهای ترسیم شده نشان می دهد که متوسط میرایی در چهار ناحیه مذکور از A به D کم می شود. این متوسط میرایی بر اساس میانگین حسگرهای هر ناحیه نسبت به اولین حسگر در همان ناحیه بدست آمده و بیانگر میرایی در هر ناحیه است. نتیجه این موضوع در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به مقادیر درصد تاثیر میرایی ملاحظه می شود که این مقدار در ناحیه A تقریباً ۲ برابر ناحیه D است. موارد مذکور با مباحث تئوری میرایی کاملاً مطابقت دارد.



شکل ۹- موقعیت شکاف و حسگرهای سطحی اطراف آن در ناحیه C.

در گام نخست، دو حسگر با فاصله مساوی و نزدیک در دو طرف شکاف مورد تحلیل قرار گرفت که نتیجه آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج حاصل، نشان داد که بیشترین تغییر در تاثیر میرایی در اولین گام ایجاد شکاف اتفاق می‌افتد و پس از آن با عمیق شدن شکاف، این اثر با شیب خیلی کمی افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان داد که با عمیق شدن شکاف، اختلاف بین نواحی مورد بررسی کم می‌شود ولی در مقایسه بین آنها، منطقه C، تاثیر میرایی بیشتری نسبت به دیگر نواحی دارد. مطابق شکل ۱۰، اختلاف تاثیر میرایی بین مدل بدون شکاف و با وجود شکافی با عمق معادل نصف طول چال حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد است. حداکثر میرایی بدست آمده در این بخش حدود ۸۵ درصد است که با نتایج تحقیقات تجربی انجام شده توسط حسینی و سن [۱۴] مطابقت دارد.

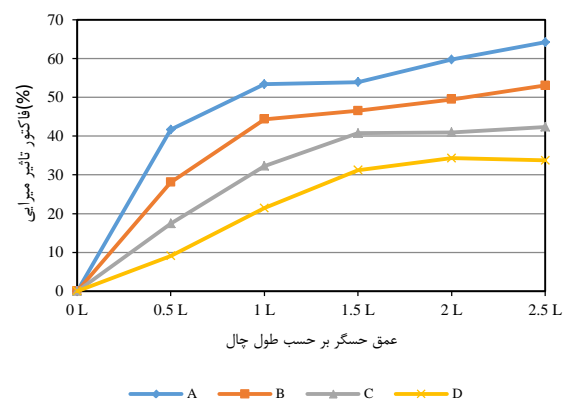


شکل ۱۰- تغییرات میرایی در نواحی مورد بررسی در اثر شکاف با عمق‌های مختلف.

به منظور ایجاد رابطه‌ای بین عمق شکاف و میرایی حاصل از آن در هر ناحیه باید در ابتدا پارامتر عمق شکاف را نرمال کرد. بر این اساس نسبت عمق شکاف به طول چال به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. به این ترتیب، تغییرات میرایی در هر ناحیه بر اساس این نسبت ترسیم شد و رابطه بین آنها بدست آمد. در شکل ۱۱ نمودار مربوط به ناحیه D ارائه شده است.

سطح زمین اتفاق می‌افتد و پس از آن تغییرات کم می‌شود اما این روند در ناحیه نزدیک و دور با هم متفاوت است. به این ترتیب تاثیر عمق در ناحیه نزدیک بیشتر از ناحیه دور است. روند کاهش لرزش با شیب زیاد در منطقه نزدیک، فیلتر شدن سریع امواج با فرکانس بالا و با محتوای زیاد انرژی را نشان می‌دهد. در مناطق دورتر، روند تغییرات لرزش، شیب کمتری دارد و این موضوع بر طی مسافت بیشتر امواج با فرکانس و محتوای انرژی پایین دلالت دارد. نتایج نشان داد که تاثیر میرایی سطحی در فواصل نزدیک به مراتب بیشتر از نقاط دور از انفجار است. با فاصله گرفتن از سطح زمین به سمت عمق، میزان میرایی افزایش می‌یابد و این میزان در فواصل نزدیک شدت بیشتری دارد. مطابق شکل ۸، تغییرات در اولین گام در ناحیه نزدیک حدود ۴۰ درصد و در ناحیه دور حدود ۱۰ درصد است. میزان بالای لرزش در سطح نسبت به عمق از یک طرف بیانگر تاثیر زمین در فیلتر کردن امواج و از طرف دیگر نشانگر از بین رفتن سریع امواج سطحی در زیر زمین است.

بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که حتی در مناطق نزدیک به انفجار، نقاط واقع در زیر سطح زمین لرزش کمی دریافت می‌کنند و این موضوع می‌تواند در مباحث پایداری فضاهای زیرزمینی و تاثیرپذیری آنها از انفجارهای سطحی مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۸- میانگین میرایی لرزش در افق‌های مختلف نسبت به سطح زمین در چهار ناحیه مورد بررسی.

۲-۴- بررسی میرایی امواج در اثر ایجاد شکاف

۴-۱-۲- بررسی در سطح زمین

به منظور بررسی اثر شکاف بر میرایی امواج، شکافی در مدل در هر ناحیه ایجاد و اثر آن بر سرعت ذرات مشخص شد. در هر بار مدل‌سازی، به اندازه نصف طول چال به عمق شکاف اضافه شد و تا عمق ۲/۵ برابر طول چال ادامه پیدا کرد. در شکل ۹ وضعیت شکاف مدل‌سازی شده، ارائه شده است.

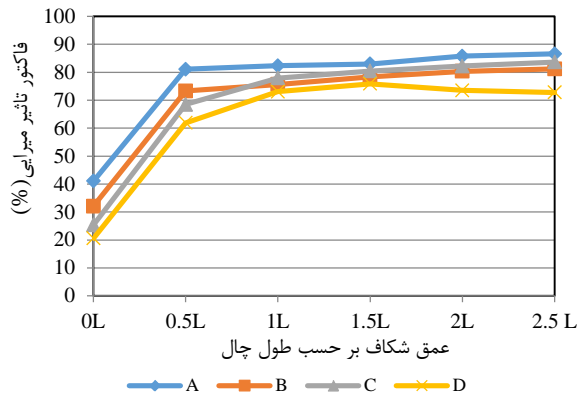
(Y) نسبت عمق شکاف به طول چال برابر ۰/۵

$$A_t = 107.16 \left(\frac{d_s}{d_h}\right)^{-0.425} \quad R^2 = 0.97$$

که در آن‌ها $\frac{d_s}{d_h}$ نسبت عمق شکاف به طول چال و A_t میزان میرایی بر حسب درصد است.

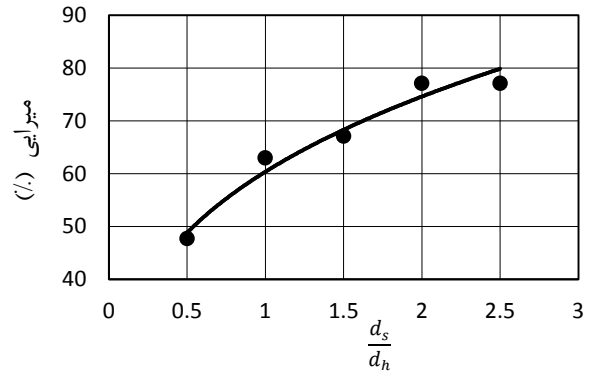
با عمیق شدن شکاف و افزایش نسبت فاصله شکاف به عمق چال از مقدار ۰/۵، ارتباط مناسبی بین این نسبت و مقدار میرایی بدست نمی‌آید. این موضوع، در تحقیقات مشابه توسط پارک و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است که این نتیجه را تایید می‌کند.

در حالت کلی‌تر، میانگین تاثیر میرایی ناحیه پشت شکاف در هر منطقه بررسی شد که نتیجه آن در شکل ۱۲ ارائه شده است. چنانچه این شکل نشان می‌دهد با فاصله گرفتن از نقطه انفجار، تاثیر عمق شکاف عموماً کمتر می‌شود.



شکل ۱۲- میانگین تاثیر میرایی ناحیه پشت شکاف نسبت به ناحیه قبل از شکاف در چهار ناحیه.

بررسی کل منطقه تحت تاثیر انفجار نشان داد که افزایش عمق شکاف از حدود یک طول چال به بعد تاثیر چندانی در میرایی لرزش ندارد. در شکل ۱۳ این مطلب به صورت ترسیم نمودار میانگین تاثیر میرایی چهار منطقه نسبت به عمق شکاف ارائه شده است. حداکثر تاثیر میرایی برای میانگین چهار ناحیه حدود ۷۳ درصد بدست آمده است. در تحقیق مشابه که توسط پراکاش و همکاران [۱۳] انجام شده همین میزان میرایی گزارش شده است.



شکل ۱۱- ارتباط بین نسبت عمق شکاف (d_s) به طول چال (d_h) با

مقدار میرایی در ناحیه D.

رابطه بدست آمده از این نمودارها در هر ۴ ناحیه، ارتباط خوبی را بین نسبت عمق شکاف به طول چال و مقدار میرایی ایجاد شده در دو طرف شکاف نشان داد. روابط بدست آمده برای نواحی مورد بررسی در زیر ارائه شده‌اند.

(۲) ناحیه A

$$A_t = 68.62 \exp\left(0.056 \left(\frac{d_s}{d_h}\right)\right) \quad R^2 = 0.91$$

(۳) ناحیه B

$$A_t = 58.95 \exp\left(0.090 \left(\frac{d_s}{d_h}\right)\right) \quad R^2 = 0.89$$

(۴) ناحیه C

$$A_t = 68.40 \left(\frac{d_s}{d_h}\right)^{0.257} \quad R^2 = 0.97$$

(۵) ناحیه D

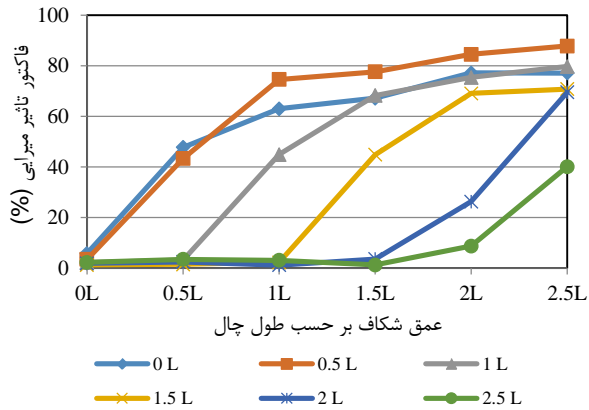
$$A_t = 60.38 \left(\frac{d_s}{d_h}\right)^{0.306} \quad R^2 = 0.97$$

که در آن‌ها $\frac{d_s}{d_h}$ نسبت عمق شکاف به طول چال و A_t میزان میرایی بر حسب درصد است.

از طرف دیگر ارتباط فاصله شکاف از چال انفجاری با مقدار میرایی نیز مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی نسبت فاصله شکاف تا چال انفجاری به طول چال به عنوان متغیر در نظر گرفته و ارتباط آن با میرایی بررسی شد. از نمودارهای حاصل مشخص شد در حالی که عمق شکاف ۰ یا ۰/۵ برابر عمق چال باشد ارتباط مناسبی بین این نسبت (فاصله شکاف از چال به طول چال) و مقدار میرایی برقرار است. روابط بدست آمده برای دو حالت فوق در زیر ارائه شده‌اند.

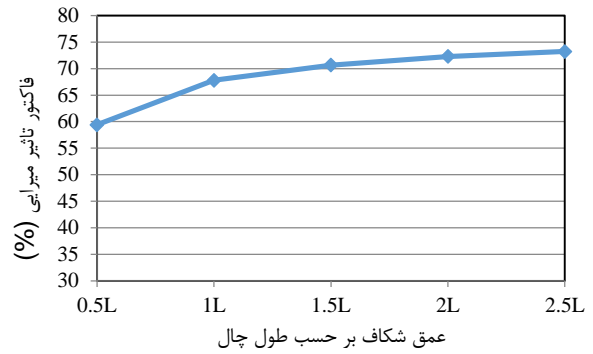
(۶) نسبت عمق شکاف به طول چال برابر صفر

$$A_t = 26.84 \left(\frac{d_s}{d_h}\right)^{-0.829} \quad R^2 = 0.99$$



شکل ۱۵- تغییرات میرایی در افق‌های مختلف زیر سطح در اثر تغییر عمق شکاف در ناحیه D.

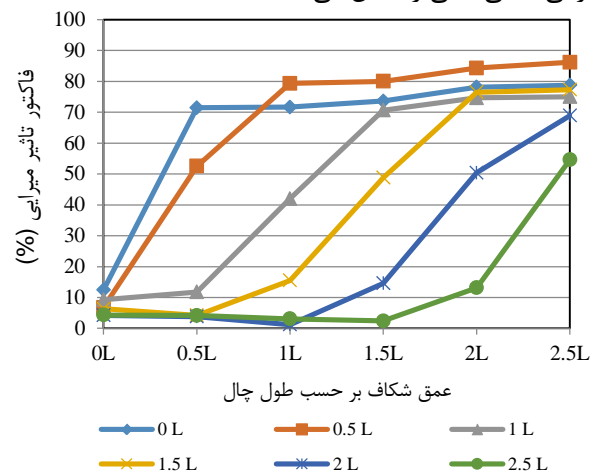
یکی از نکات قابل توجه در نمودارهای شکل‌های ۱۴ و ۱۵ این است که با عمیق شدن شکاف، نقاط واقع در عمق معادل نصف طول چال بیشترین تاثیرپذیری را دارند و این موضوع در فاصله‌های نزدیک و دور از انفجار صدق می‌کند. برای بررسی وضعیت میرایی در عمق نواحی مختلف، میانگین تاثیر میرایی از سطح تا عمق به صورت خطی محاسبه شده که نتایج آن در شکل ۱۶ ارائه شده است. این نمودار نشان می‌دهد که روند تاثیر میرایی با افزایش عمق شکاف، افزایشی است. دلیل آن این است که میزان میرایی در نقاط عمیق در شرایطی که عمق شکاف به سطح آن نقاط نرسیده، خیلی کم است و با افزایش عمق شکاف، میزان میرایی در نقاط عمیق نیز بالا می‌رود و باعث می‌شود تا میانگین میرایی از سطح تا عمق زیاد شود. اگر تاثیر عمق حسگر بر میزان تاثیر میرایی نقاط در نظر بگیریم نمودار ترسیم شده در شکل ۱۷ بدست می‌آید. در این نمودار مقادیر میانگین میرایی حسگرها در هر سطح در حالات مختلف عمق شکاف بر اساس عمق حسگر نشان داده شده است. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که بیشترین میرایی، صرفنظر از عمق شکاف مربوط به نقطه واقع در عمقی معادل نصف طول چال است. موارد مذکور در تمام نواحی مورد بررسی صدق می‌کند همچنین مشخص شد که موقعیت نواحی در این خصوص تاثیر چندانی ندارد.



شکل ۱۳- تغییرات میرایی میانگین چهار ناحیه در عمق‌های مختلف شکاف.

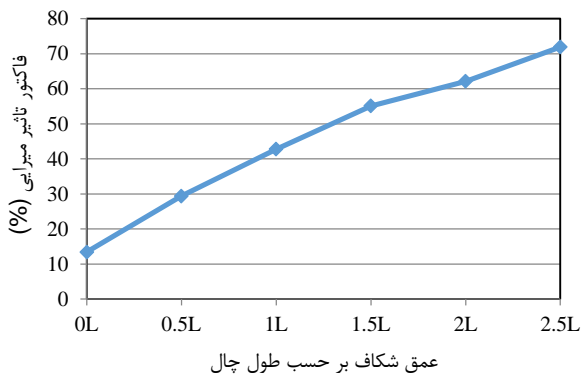
۴-۲-۲- بررسی در عمق

تغییرات مقدار میرایی نقاط واقع در زیر سطح زمین در اثر ایجاد و تغییر عمق شکاف بررسی شد. این بررسی داد که در زیر سطح، میزان میرایی به موقعیت نقطه دریافت کننده و همچنین عمق شکاف ارتباط دارد. بررسی نتایج ثبت شده توسط حسگرهای دو طرف شکاف از سطح به عمق نشان داد که نقاط پایین‌تر از عمق شکاف خیلی تحت تاثیر شکاف قرار نمی‌گیرند و همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است میرایی خیلی کمی را نشان می‌دهند.



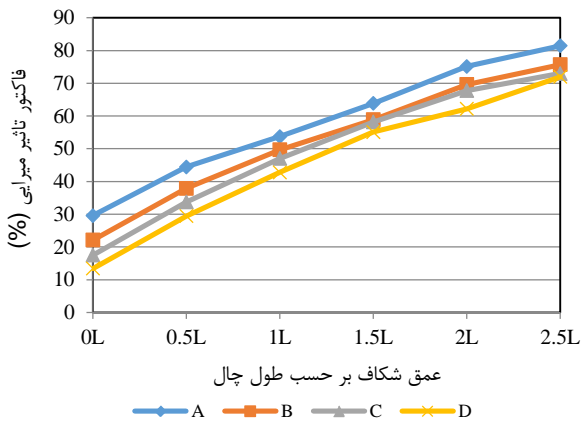
شکل ۱۴- تغییرات میرایی در افق‌های مختلف زیر سطح در اثر تغییر عمق شکاف در ناحیه A.

در اولین گام ایجاد شکاف که به عمق نصف طول چال است نقطه سطحی و نقطه‌ای که در عمق معادل نصف طول چال قرار دارد مقدار میرایی بالایی را نشان می‌دهند. با اضافه شدن عمق، حسگرهای پایین‌تر نیز تاثیر عمقی شکاف را مشخص می‌کنند. این موضوع در تمامی نواحی چهار گانه مورد بررسی، تایید گردید (شکل ۱۵).



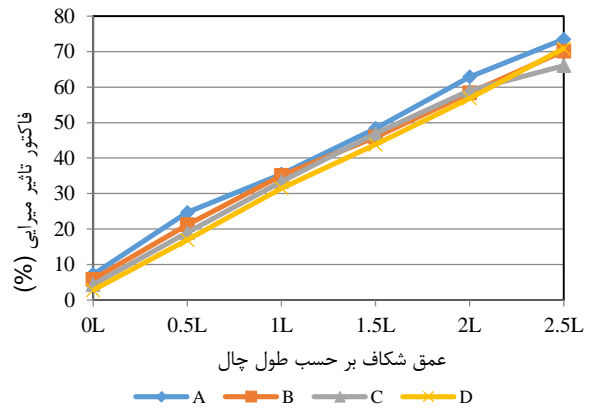
شکل ۱۸- میانگین کل میرایی ناحیه D از سطح تا عمق در اثر تغییر عمق شکاف.

در شکل ۱۹ وضعیت میرایی منطقه‌ای برای هر چهار ناحیه در کنار هم ترسیم شده است. با توجه به شکل مذکور ملاحظه می‌شود که میانگین کلی میرایی در عمق‌ها در نواحی مختلف با هم یکسان نیست و بیشترین تاثیر مربوط به ناحیه A است. با افزایش فاصله از نقطه انفجار، میانگین میرایی منطقه کم می‌شود ولی این اختلاف مخصوصا برای نواحی حد وسط با عمیق شدن شکاف، کاهش می‌یابد.

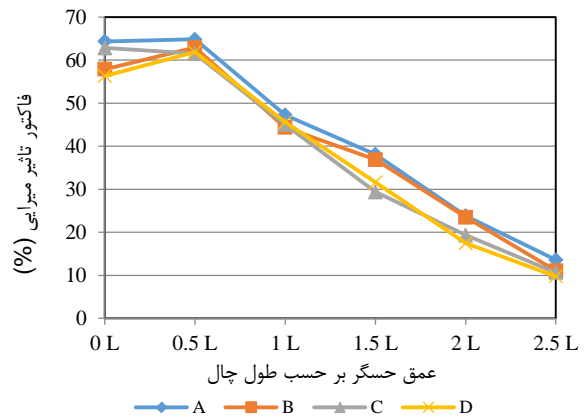


شکل ۱۹- میانگین کل میرایی نواحی مختلف از سطح تا عمق در اثر تغییر عمق شکاف.

نتایج بدست آمده نشان داد که با ایجاد شکاف می‌توان حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد از لرزش زمین را میرا کرد. بیشترین تاثیر شکاف بر نقاط سطحی است و نقاط واقع در عمق، کمتر تحت تاثیر شکاف قرار می‌گیرند. هنگامی که عمق شکاف از عمق نقطه ثبت لرزش بیشتر شود این تاثیر نیز افزایش می‌یابد ولی با این حال تاثیر شکاف بر روی نقاط واقع در عمق کمتر است. میرایی ۶۰ درصدی لرزش در سطح زمین در اولین گام ایجاد شکاف، نشان می‌دهد که حتی با وجود عمق کم شکاف، باز هم تاثیر بسزایی در کاهش لرزش در سطح زمین دارد. این موضوع بیانگر این است که از شکاف می‌توان بیشتر برای حفاظت از



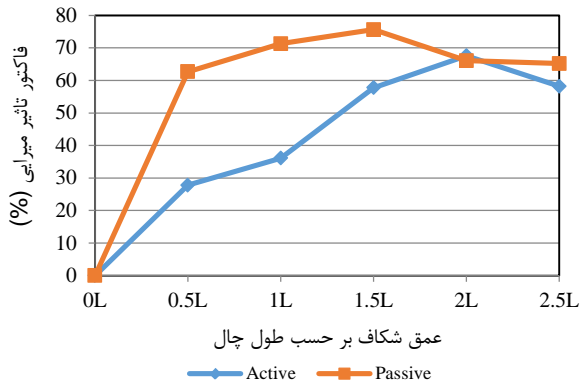
شکل ۱۶- میانگین تاثیر میرایی از سطح تا عمق به صورت خطی در اثر تغییر عمق شکاف در نواحی مختلف.



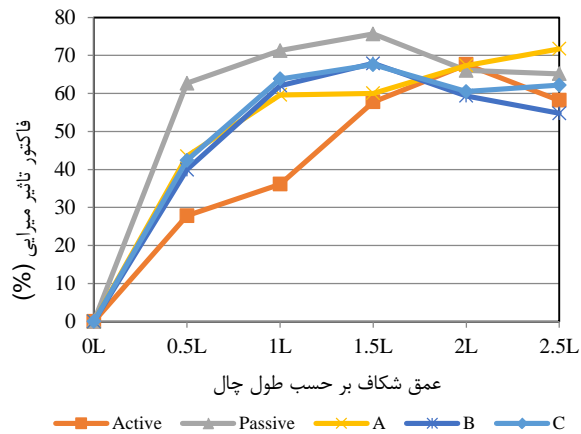
شکل ۱۷- میانگین تاثیر میرایی در اثر عمق‌های مختلف شکاف در مقابل عمق حسگر.

در حالت کلی، وضعیت میرایی منطقه بعد از شکاف نسبت به منطقه قبل از شکاف بررسی شد. در این بررسی، میانگین سرعت ذرات در سه نقطه بعد از شکاف نسبت به سه نقطه قبل از آن، سنجیده شد و میزان تاثیر میرایی بدست آمد. به این ترتیب، تاثیر کلی میرایی منطقه‌ای، از سطح تا عمق مشخص شد. نتایج حاصل از این بررسی مربوط به ناحیه D در شکل ۱۸ ارائه شده است. شکل ۱۸ مشخص می‌کند که روند تغییرات میانگین تاثیر میرایی از سطح تا عمق نسبت به افزایش عمق شکاف، افزایشی است.

فعال و غیر فعال، مطابق شکل ۲۲، اثر موقعیت شکاف در بین این دو حالت نیز بررسی و ارائه شده است.



شکل ۲۱- تغییرات میرایی در دو حالت فعال و غیر فعال در اثر تغییر عمق شکاف.



شکل ۲۲- تغییرات میرایی در دو حالت فعال و غیر فعال و مناطق مابین آن‌ها در اثر تغییر عمق شکاف.

شکل ۲۱ نشان می‌دهد که تاثیر شکاف در حالت غیر فعال نسبت به حالت فعال بیشتر است و فقط وقتی عمق شکاف حدود ۲ برابر طول چال باشد تاثیر میرایی حالت فعال نیز به اندازه حالت غیر فعال می‌شود. همچنین با ملاحظه شکل مذکور مشخص می‌شود که میرایی حاصل از اولین گام ایجاد شکاف در حالت غیر فعال حدوداً ۲ برابر حالت فعال است. تاثیر شکاف در موقعیت نواحی دیگر، مابین مقادیر مربوط به حالت فعال و غیر فعال قرار می‌گیرد و از طرفی میزان تاثیر آنها تقریباً با هم مساوی است. با عمیق شدن شکاف و رسیدن به عمق ۲ برابر طول چال روند تغییرات در تمام حالات کمی تغییر می‌کند که این موضوع در نمودارهای ترسیم شده در شکل ۲۲ قابل مشاهده است.

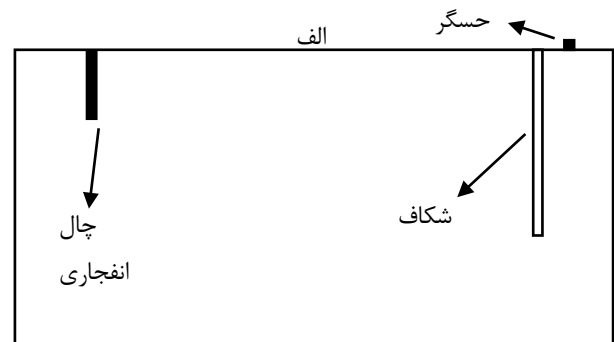
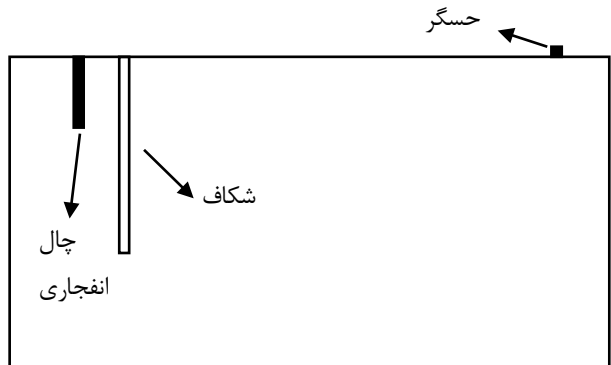
۴-۳-۲) بررسی در عمق

در این حالت، حسگرها در همان فاصله ثابت نسبت به نقطه انفجار از سطح تا عمق ۲/۵ برابر طول چال قرار گرفتند. نتایج

سازه‌های سطحی استفاده کرد و یا در صورت بکارگیری این روش برای سازه‌های زیرزمینی باید حداقل عمق شکاف از عمق سازه بیشتر باشد.

۴-۳-۳) بررسی تاثیر موقعیت شکاف

یکی از مهمترین مباحث در حفاظت یک نقطه در مقابل لرزش زمین به کمک ایجاد شکاف، موقعیت شکاف است. این موضوع وضعیت فعال یا غیر فعال بودن اثر شکاف را بررسی می‌کند. بر این اساس، مدلسازی عددی برای حالت ثابت بودن یک نقطه و تغییر موقعیت و عمق شکاف در نواحی مختلف انجام شد. در شکل ۲۰ موقعیت شکاف و نقطه ثبت در حالت فعال و غیر فعال نشان داده شده است. فاصله شکاف تا چال انفجاری در حالت فعال با فاصله شکاف تا نقطه ثبت در حالت غیر فعال برابر است. این بررسی نیز مانند حالت‌های قبلی به دو صورت سطحی و عمقی انجام شد.



شکل ۲۰- موقعیت شکاف و نقطه ثبت مدل‌سازی شده در حالت فعال و غیر فعال (الف) فعال (ب) غیر فعال.

۴-۳-۴) بررسی در سطح

نتایج حاصل از بررسی سطحی تاثیر موقعیت شکاف در شکل ۲۱ ارائه شده است. در این حالت میزان میرایی نسبت به حالت بدون شکاف بدست آمده است. در این تحلیل علاوه بر دو حالت

فقط باید برای رسیدن به میرایی بالا از شکاف با عمق زیاد استفاده کرد.

۵- نتیجه گیری

بر اساس مدل سازی های انجام شده و همچنین تحلیل داده های آنها، نتایج زیر بدست آمده است.

- با افزایش عمق نقاط ثبت، میزان میرایی ثبت شده در مناطق مختلف به هم نزدیک می شوند و تغییرات میرایی با شیب کمی صورت می گیرد یا به عبارتی اثر عمق کم می شود.

- اگر نقاط ثبت لرزش را از سطح زمین به اندازه نصف طول چال به عمق جابجا کنیم بیشترین تغییر میرایی اتفاق می افتد که مقدار آن از ۱۰ تا ۴۰ درصد در نواحی مختلف تغییر می کند. این اثر در نواحی نزدیک به انفجار (ناحیه A) حدوداً ۴ برابر نواحی دور (ناحیه D) است.

- با ایجاد شکاف می توان شدت لرزش زمین را تا ۸۵ درصد کاهش داد.

- بیشترین تاثیر شکاف بر مقدار میرایی در همان گام اول ایجاد شکاف (به اندازه نصف طول چال) است و مقدار این میرایی در ناحیه نزدیک حدود ۷۰ درصد و در ناحیه دور حدود ۵۰ درصد است. در گام های بعدی عمیق شدن شکاف، تاثیر میرایی با شیب کم افزایش می یابد.

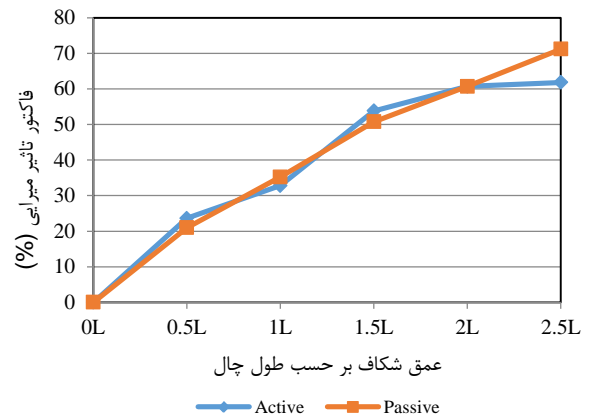
- بین پارامتر نسبت عمق شکاف به طول چال و مقدار میرایی روابطی به صورت نمایی و توانی با ضریب تصمیم گیری بالا ($R^2=0.9$) برقرار است.

- بین نسبت فاصله شکاف از چال به عمق چال و مقدار میرایی فقط در حالتی که عمق شکاف کم باشد رابطه ای به صورت توانی با ضریب تصمیم گیری بالا ($R^2=0.97$) برقرار است ولی با افزایش عمق شکاف از ۰/۵ برابر طول چال رابطه مناسبی بین نسبت مذکور و میرایی برقرار نمی شود.

- با در نظر گرفتن میانگین میرایی یک ناحیه از سطح تا عمق، با افزایش عمق شکاف، میرایی با یک مقدار ثابت حدوداً ۱۰ درصد در هر گام افزایش عمق بیشتر می شود و این موضوع مستقل از فاصله تا نقطه انفجار است.

- در سطح زمین، تاثیر میرایی در حالت غیر فعال بیشتر از حالت فعال است که مقدار آن در اولین گام ایجاد شکاف حدود ۲ برابر است. در عمق زمین عکس این موضوع اتفاق می افتد. با افزایش عمق شکاف، میزان میرایی ناشی از هر دو حالت به هم نزدیک می شوند.

این بررسی که به صورت میانگین میرایی در این حسگرها از سطح تا عمق می باشد در شکل ۲۳ ارائه شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می شود اگر میانگین میرایی از سطح تا عمق نقطه مورد نظر را در نظر بگیریم تاثیر موقعیت شکاف از بین می رود و در اکثر حالات، میرایی میانگین ارتباطی با موقعیت شکاف ندارد. فقط در عمق های زیاد شکاف، تاثیر حالت غیر فعال بیشتر می شود.



شکل ۲۳- میانگین تغییرات میرایی از سطح تا عمق در دو حالت فعال و غیر فعال در اثر تغییر عمق شکاف.

یکی از نکات مهم حاصل از بررسی حاضر این است که تاثیر ایزوله کردن لرزش به روش غیرفعال نسبت به روش فعال به مراتب بیشتر است. البته باید در نظر گرفت که این موضوع برای نقاط واقع در سطح زمین صدق می کند و از طرفی با عمیق شدن شکاف تاثیر این دو روش به هم نزدیک می شود. به بیان دیگر با افزایش عمق شکاف می توان اثر موقعیت شکاف را به شدت کاهش داد تا جایی که تفاوت چندانی بین حالت فعال و غیرفعال نباشد. به این ترتیب برای حفاظت سازه های سطحی در صورتی که عمق شکاف کم باشد باید شکاف نزدیک سازه باشد ولی اگر عمق شکاف زیاد باشد موقعیت شکاف چندان اهمیتی ندارد.

در شرایطی که لرزش در عمق زمین مورد نظر باشد شرایط برعکس می شود به طوری که تاثیر روش فعال به مراتب از غیرفعال بیشتر می شود هر چند که با عمیق شدن شکاف باز هم تاثیر این دو حالت به هم نزدیک می شود و عملاً موقعیت شکاف بی تاثیر می شود. بنابراین در صورتی که حفاظت از یک سازه زیرزمینی مد نظر باشد استفاده از روش فعال مناسبتر است ولی می توان با افزایش عمق شکاف، در هر موقعیتی از آن استفاده کرد.

اگر شرایط منطقه مورد حفاظت به گونه ای باشد که از سطح تا عمق ادامه داشته باشد موقعیت شکاف تاثیر چندانی ندارد و

Engineers, India, New Delhi, November., Part III, pp: 1-27.

[13] Prakash, A.J., Palroy, P., Misra, D.D., 2004, *Analysis of blast vibration characteristics across a trench and a pre-split plane*. *Fragblast* 8(1), pp: 51-60.

[14] Hossaini, S.M.F., Sen, G.C., 2006, *A study of the influence of different blasting modes and explosive types on ground vibrations*. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 30, No. B3.

[15] Uysal, O., Arpaz, E., Erarslan, K., 2008. *Barrier holes and trench application to reduce blast induced vibration in Seyitomer coal mine*. *Environ Geol*, Vol. 54, pp: 1325-1331.

[16] Venkatesh, H.S., Venugopala. R., 2008, *Reduction of Blast Induced Ground Vibrations with Open Trenches in Surface Mines*. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG).

[17] Park. D., Jeon. B., Jeon. S., 2009, *A Numerical Study on the Screening of Blast-Induced Waves for Reducing Ground Vibration*. *Rock Mech Rock Eng*, Vol. 42, pp: 449-473.

[18] Alzawi, A., ElNaggar, M.H, 2011. *Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, pp: 306-317.

- اگر تاثیر موقعیت شکاف را بر روی یک ناحیه به صورت کلی از سطح تا عمق در نظر بگیریم میرایی ایجاد شده در هر دو حالت فعال و غیر فعال با هم برابر است.

- برای حفاظت سازه‌های سطحی در صورتی که عمق شکاف کم است باید شکاف نزدیک سازه باشد (حالت غیرفعال). ولی اگر عمق شکاف حدود ۲ برابر عمق چال انفجاری باشد موقعیت شکاف چندان اهمیتی ندارد.

- در صورتی که حفاظت از یک سازه زیرزمینی مد نظر باشد استفاده از روش فعال مناسب‌تر است ولی می‌توان با افزایش عمق شکاف تا ۲ برابر عمق چال، در هر موقعیتی از آن استفاده کرد.

۶- منابع

[1] Singh, T.N., Singh, V, 2005, *An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines*. *Geotech Geol Eng*, Vol. 23, pp: 249-262.

[2] Wheeler, R.M, 1988. *How millisecond delay periods may enhance or reduce blast vibration effect*. *Mining Engineering*. Vol. 40, pp: 969-973.

[3] Blair, D.P., Jiang, J.J., 1995. *Surface vibration due to a vertical column of explosive*. *Int.J.Rock Mech.Min.Sci & Geomech*. Vol. 32, pp: 149-154.

[4] Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Carcedo, A.J.F., 1995. *Drilling and blasting of rocks*. A.A.Balkema, Rotherdam.

[5] Bhandari. S., 1997, *Engineering rock blasting operations*. A.A.Balkema, Rotherdam.

[6] Roy, P.P., 1998. *characteristics of ground vibration and structural response to surface and underground blasting*. *Geotechnical and geological engineering*. Vol. 16, pp: 151-166.

[7] Hoshino, T., Mogi, G., Kou, S.Q., 2000, *Optimum Delay Interval Design in Delay Blasting*. *Int. J. Blasting Fragmentation* 4, pp:139-149.

[8] Valdivia, C., Vega, M., Scherpenisse, C.R., Adamson, W.R., 2003, *Vibration simulation method to control stability in the northeast corner of escondia mine*. *Int J Blasting Fragment* 7(2), pp: 63-78.

[9] Rossmannith, H.P., Hochholdinger-Arsic, V., Uenishi, K., 2005, *Understanding size and boundary effects in scaled modelblast - plane problems*. *Int J Blasting Fragment* 9(2), pp: 93-125.

[10] Uysal, O., Arpaz, E., Berber, M., 2007, *Studies on the effect of burden width on blast induced vibration in open pit mines*. *Environ Geol*. doi: 10.1007/s00254-007-0679-9.

[11] Berzal, R.L., 1976, *Blasting vibration levels transmitted across fracture planes*. *Mining Magazine* October, pp: 361-363.

[12] Gupta, R.N., Ghose, A.K., Mozumdar, B.K., Nabibullah, Md., 1990, *Design of blasting rounds with airdeck presplitting for dragline and shovel benches near populated areas - a case study*. *Int Sym on explosives and blasting techniques*, Institution of