

## به کارگیری رهیافت نیومارک برای تحلیل آسیب پذیری و ریسک زمین لرزه در معادن روباز (مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه)

مجید میبدیان<sup>۱</sup>، حسین معاریان<sup>۲\*</sup> و مهدی زارع<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> دانشیار پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۲/۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۳/۱۱، تاریخ تصویب ۸۸/۹/۱۷)

### چکیده

در این مطالعه آسیب پذیری دیواره ی غربی معدن مس سرچشمه با ظرفیت لغزش بالاتر، برآورد شده است. برای تحلیل آسیب پذیری و ریسک زمین لرزه در این معدن، ابتدا خطر زمین لرزه با تعریف چشمه های لرزه زا و تعیین پارامترهای لرزه خیزی در هر یک از این چشمه ها، به دست آمده است. سپس برای تعیین مؤثرترین چشمه در برآورد خطر زمین لرزه، از جدایش خطر استفاده شده و با استفاده از رهیافت نیومارک و برآورد شتاب بحرانی و شدت آریاس در این ساختگاه، مقدار جابه جایی نیومارک در راستای لغزش در دیواره ی غربی معدن به دست آمده است. در نهایت بیشینه احتمال لغزش و یا به عبارتی میزان آسیب پذیری در این دیواره محاسبه شده است که با این داده ها برای اولین بار در معادن ایران ریسک زمین لرزه در این ساختگاه به دست آمده است. مقدار ریسک زمین لرزه در این ساختگاه با استناد به داده های ذکر شده ۰/۰۷ مقدار خسارت مالی کلی به معدن برآورد می شود.

**واژه های کلیدی:** رهیافت نیومارک، زمین لرزه، آسیب پذیری، ریسک، معدن مس سرچشمه

### مقدمه

گسل شهرباک، از جمله گسل های عمیق در ارتباط با پی سنگ بوده و تصور می شود که علی رغم احتمال جا به جایی و عمل نیروهای کششی در زمان های قدیم، در دوران چهارم با جا به جایی فشاری و راندگی همراه بوده است.

گسل کوه بنان، از جمله گسل های فعال با فعالیت لرزه ای در منطقه ی مورد نظر است که زمین لرزه های مهم ماه ۱۲۲۴ هجری خورشیدی شمال شرقی کرمان با بزرگای  $M = 5/8$ ، ۲۷ اردیبهشت ۱۳۰۸ هجری خورشیدی ده ژوئیه با بزرگای  $M = 4/5$ ، زمین لرزه ۲۴ بهمن ۱۳۱۵ در تنگل با بزرگای  $M_s = 4/7$  و زمین لرزه ۲۸ آذر ۱۳۵۶ در تنگل با بزرگای  $M_s = 5/7$  را مربوط به این گسل می دانند.

گسل گوک، نیز از جمله گسل های فعال منطقه است که زمین لرزه های هشتم خردادماه ۱۲۹۰ هجری خورشیدی فیض آباد با بزرگای  $M = 5/6$ ، ۱۴ تیرماه ۱۳۲۷ هجری خورشیدی گوک با بزرگای  $M_s = 6/0$ ، زمین لرزه ۶ تیر ۱۳۶۰ هجری خورشیدی سیرج با بزرگای

معدن مس سرچشمه، دومین معدن روباز مس پرفیری در جهان، در ۱۵۰ کیلومتری جنوب غرب کرمان قرار دارد. طبق طرح توسعه ی معدن مس سرچشمه، حداکثر ارتفاع در دیواره ی غربی معدن به ۸۵۰ متر می رسد. در این طرح عرض پله ها ۱۵ متر، عرض پله ایمنی ۳۰ متر، ارتفاع پله ها ۱۲/۵ متر، شیب رمپ های ارتباطی ۱/۸، عرض رمپ ها ۳۰ متر و شیب نهایی ۳۲ تا ۳۴ درجه است.

در بحث تحلیل خطر زمین لرزه بررسی گسل های فعال منطقه، از فعالیت های اصلی است. بدین منظور به شعاع ۳۰۰ کیلومتر از معدن، کلیه گسل ها مورد بررسی شدند. گسل های عمده ی شناسایی شده در محدوده ی معدن عبارتند از: گسل رفسنجان که نزدیک ترین گسل فعال شناسایی شده در منطقه ی مورد نظر است و با توجه به نبود اطلاعات لرزه ای و همچنین شواهدی مبنی بر فعال بودن این گسل، می توان خطر لرزه ای بالایی برای ساختگاه مورد نظر به همراه داشته باشد.

$M_s = 7/1$  را مربوط به این گسل می‌دانند.

گسل گلباف، در راستای گسل لکر قرار داشته و به موازات گسل گوک امتداد دارد. این گسل، لرزه‌خیزی به نسبت بالایی را در نقشه‌ی لرزه‌خیزی منطقه نشان می‌دهد. زمین لرزه ۲۱ خرداد ۱۳۶۰ گلباف با بزرگای  $M_s = 6/7$  را به این گسل نسبت می‌دهند. سایر گسل‌های مهم در این منطقه عبارتند از: گسل معکوس زاگرس، گسل نایبند که این گسل‌ها با وجود لرزه‌خیزی بالای خود در فاصله‌های بیشتری نسبت به ساختگاه قرار گرفته‌اند.

### تعیین چشمه‌های لرزه‌زا

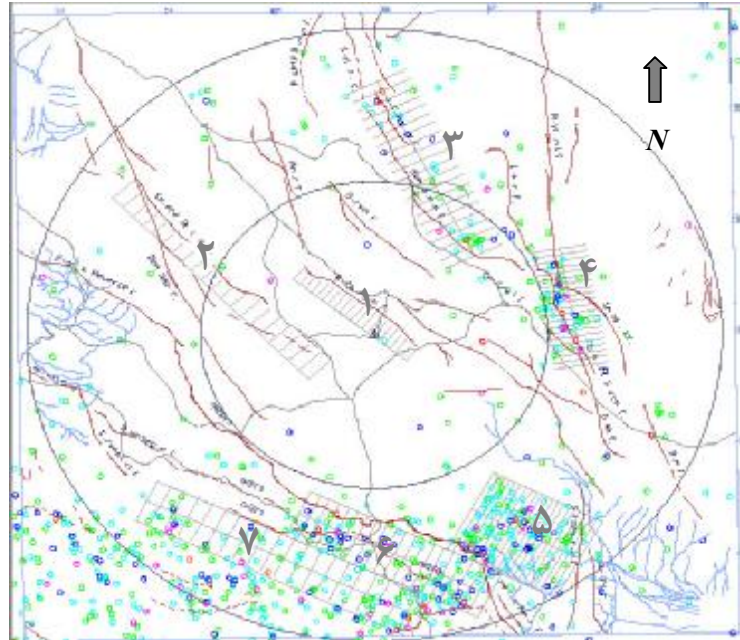
یکی از مهم‌ترین مراحل تحلیل خطر زمین‌لرزه تعیین چشمه‌های لرزه‌زا است. برای این هدف گسل‌های فعال این منطقه به همراه لرزه‌خیزی منطقه، شهرها و جاده‌های اصلی در لایه‌هایی جداگانه به نقشه درآمد (شکل ۱). کاتالوگ لرزه‌خیزی منطقه با استفاده از داده‌های کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ایران، اداره‌ی زمین‌شناسی امریکا و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در محدوده‌ی زمانی پس از نصب دستگاهی (۱۹۰۰ میلادی) تا زمان مطالعه جمع‌آوری شد. پس از حذف زمین لرزه‌هایی با بزرگای کمتر از ۴، با این ایده که این زمین‌لرزه‌ها، نقش کمتری در خطر لرزه‌ای ایفا می‌کنند و همچنین حذف پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها این داده‌ها به عنوان لایه‌ی لرزه‌خیزی منطقه در آمد. در شکل (۱) چشمه‌های لرزه‌زا در این معدن مشخص شده است. برای تعیین چشمه‌های لرزه‌زا، سعی شده است که این چشمه‌ها از روند کلی گسل‌های فعال منطقه پیروی کنند و همچنین لرزه‌خیزی را به خوبی نشان دهند. بدین منظور ۷ چشمه‌ی لرزه‌زا در این منطقه مشخص شدند و پس از آن هر یک از این چشمه‌ها خود به ۱۰ قسمت تقسیم شدند که این تقسیم با توجه به قضاوت مهندسی و همچنین لرزه‌خیزی منطقه و شکل کلی گسل‌ها بوده است. البته برای یافتن تعداد تقسیم بهینه، بهتر است حساسیت به تعداد تقسیم‌های متفاوت نیز انجام شود. پس از این، داده‌های لرزه‌ای با دسته‌های مشخص در این چشمه‌ها شناسایی شدند. در این مطالعه برای بررسی دقیق‌تر داده‌های لرزه‌ای، دو نوع دسته‌بندی انجام شده است. در نوع اول، داده‌ها به فواصل ۰/۵ واحد بزرگا و در نوع دوم داده‌ها به فواصل ۰/۱ واحد بزرگا تقسیم بندی

شدند و بدین ترتیب پارامترهای لرزه‌خیزی با دو روش به دست آمده‌اند. تا بدین روش حساسیت دسته بندی‌ها مشخص شود. البته این پارامترها به طور جداگانه با نرم‌افزار شارپ (کیکو، ۲۰۰۶) نیز به دست آمدند [۱] و [۲]. منظور از پارامترهای لرزه‌ای همان  $\beta$  و  $\lambda$  است که از رابطه‌ی گوتنبرگ-ریشتر به دست می‌آیند. چشمه‌های این ناحیه به ترتیب این خصوصیات زیر را دارند:

چشمه‌ی ۱، از نوع چشمه‌ی خطی بوده و نشان‌دهنده‌ی گسل رفسنجان است. طول این چشمه، که همان طول گسل رفسنجان است، برابر ۱۵۰ کیلومتر است و نزدیک‌ترین فاصله‌ی این گسل به ساختگاه معدن ۲۳ کیلومتر است. از مشخصات این چشمه، نبود داده‌ی لرزه‌ای و دستگاهی است. ولی همان‌طور که قبل از این اشاره شد، به دلیل وجود شواهد سطحی، از جمله جنبایی گسل (جابه‌جایی آبراهه‌ها) مشخص است که این گسل از جمله گسل‌های فعال منطقه است. با توجه به طول گسل از نظر توان لرزه‌ای می‌توان چنین گسلی را مشابه گسل بم دانست. پارامترهای لرزه‌ای این گسل به دلیل نبود داده‌های لرزه‌ای و نیز مشابهت این گسل با گسل بم، از داده‌های لرزه‌ای گسل بم [۳] استخراج شده است. البته باید اشاره شود که نمونه‌ی این فرآیند در سایر تحقیقات خطر لرزه‌ای نیز انجام شده است [۴].

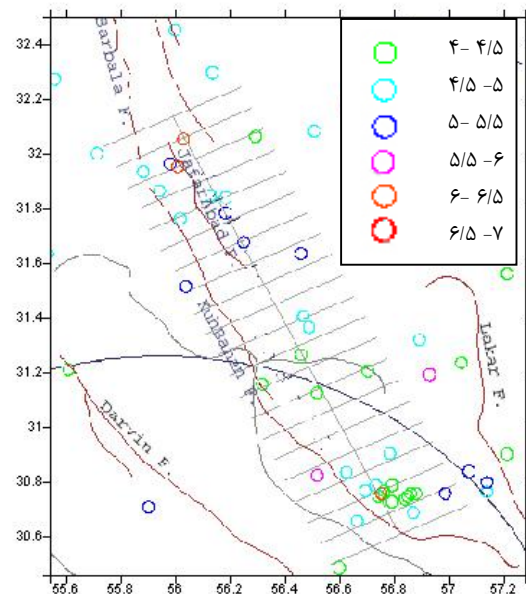
چشمه‌ی ۲، همانند گسل رفسنجان از نوع چشمه‌ی خطی بوده و نشان‌دهنده‌ی گسل شهرباک است. طول این چشمه برابر ۲۵۰ کیلومتر و نزدیک‌ترین فاصله‌ی این گسل به ساختگاه معدن ۴۰ کیلومتر است. برای این چشمه نیز همانند چشمه‌ی ۱ به علت نبود داده‌های لرزه‌ای و شباهت‌های موجود، از پارامترهای لرزه‌ای گسل بم استفاده شد.

چشمه‌ی ۳، به صورت ناحیه‌ای تعریف شده است و روند این چشمه اغلب از گسل کوه‌بنان پیروی می‌کند. این گسل در مرکز این ناحیه واقع شده و همان‌طور که قبل از این اشاره شد، زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی زیادی به این گسل منتسب است. مساحت این چشمه ۱۰۶۵۴/۶۱ کیلومتر مربع است. شکل (۲) پهنه‌ی لرزه‌ای چشمه‌ی ۳ را نشان می‌دهد.



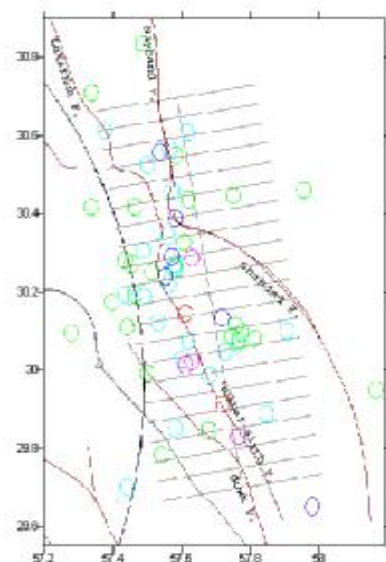
شکل ۱: نقشه‌ی لرزه‌خیزی منطقه.

چشمه‌ی ۴ که به صورت ناحیه‌ای در نظر گرفته شده است، در حقیقت بخش شمالی گسل گوک و گسل گلباف-سیرچ و بخش جنوبی گسل ناینند و همچنین بخش جنوبی گسل لکرکوه است. همان طور که اشاره شد، این گسل‌ها زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی زیادی را به همراه داشته‌اند. مساحت این چشمه ۵۵۸۹ کیلومتر مربع است.



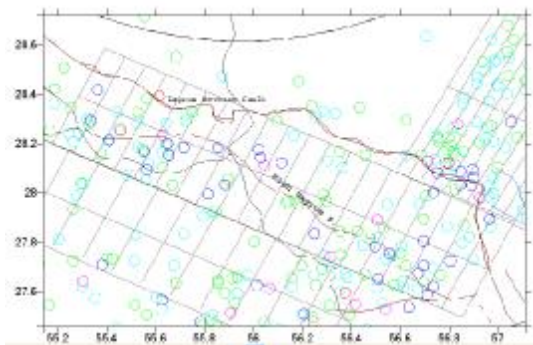
شکل ۲: چشمه‌ی لرزه‌زای ۳.

با استفاده از داده‌های، لرزه‌ای به دست آمده از شکل (۲)، پارامتر  $b$  از رابطه‌ی گوتنبرگ-ریشتر در حالت دسته‌بندی نوع ۱ برابر ۰/۵۹ و در دسته‌بندی نوع ۲ برابر ۰/۵۸ است که این نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی پایین این چشمه، با زمین‌لرزه‌های بالا و با دوره‌های بازگشت طولانی است.

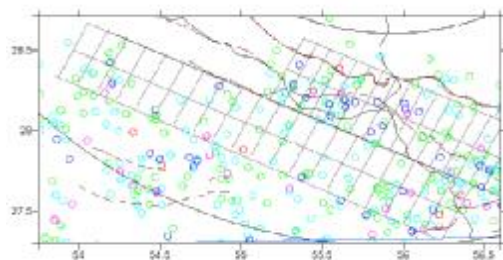


شکل ۳: چشمه‌ی لرزه‌زای ۴.

مرتفع پیروی کرده، و این گسل در مرز شمالی این چشمه قرار گرفته است، مساحت چشمه‌ی مورد نظر ۱۱۱۹۵ کیلومتر مربع است و لرزه‌خیزی به نسبت بالایی دارد. این چشمه در فاصله‌ای نسبتاً طولانی نسبت به ساختمان قرار گرفته است که به نظر می‌رسد فعالیت این چشمه تأثیر چندانی از نظر خطر زمین‌لرزه در ساختمان نداشته باشد. شکل (۶)، لرزه‌خیزی این چشمه را به همراه گسل‌های اطراف آن را نشان می‌دهد. با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به دست آمده از شکل (۶)، پارامتر  $b$  در حالت دسته‌بندی نوع ۱ برابر ۰/۷۶ و در دسته‌بندی نوع ۲ دارای مقدار ۰/۷۷ است که نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی متوسط این چشمه است.



شکل ۵: چشمه‌ی لرزه‌زای ۵

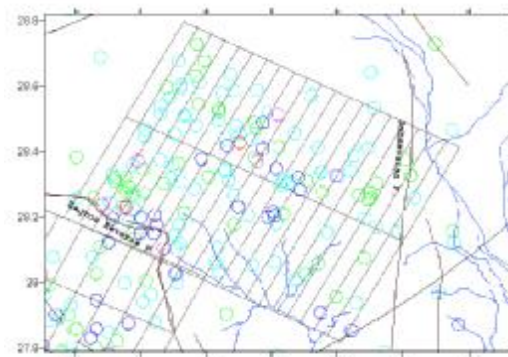


شکل ۶: چشمه‌ی لرزه‌زای ۶

با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به دست آمده، از سایر پارامترهای لرزه‌ای چشمه‌های لرزه‌زا در جدول (۱) گرد آمده است. با استفاده از رابطه‌ی کاهندگی به دست آمده از داده‌های شتاب‌نگاشت ایران (زارع، ۱۹۹۹)، بیشینه جنبش زمین، در ناحیه مورد نظر به دست آمده است. بر این اساس در این ناحیه برای هر چشمه احتمال خطر زمین‌لرزه به دست آمده است، که در نهایت احتمال کلی رخداد سالانه جنبش بیشینه‌ی زمین حاصل شده است [۵] (شکل ۷). همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است نمودار احتمال سالانه‌ی رخداد کلی از نمودار چشمه‌ی ۱

در شکل (۳) گسل‌ها و لرزه‌خیزی این چشمه مشخص شده است. با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به دست آمده از شکل (۳)، پارامتر  $b$  در حالت دسته‌بندی نوع ۱ برابر ۰/۶۳ و در دسته‌بندی نوع ۲ برابر ۰/۶۷ است که همانند چشمه‌ی ۳ نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی پایین این چشمه، با زمین‌لرزه‌های بالا با دوره‌های بازگشت طولانی است. چشمه‌ی ۵ در ناحیه‌ی شرقی واحد لرزه‌زمین‌ساختی زاگرس به صورت ناحیه‌ای تعریف شده است. گسل سبزواران در مرز شرقی و انتهای گسل معکوس زاگرس در مرز غربی این چشمه قرار دارد. به نظر می‌رسد در این ناحیه واحد زمین‌ساختی زاگرس دچار تغییر روند ساختاری ناگهانی شده که خود این موضوع می‌تواند دلیلی بر لرزه‌خیزی بالای این چشمه باشد.

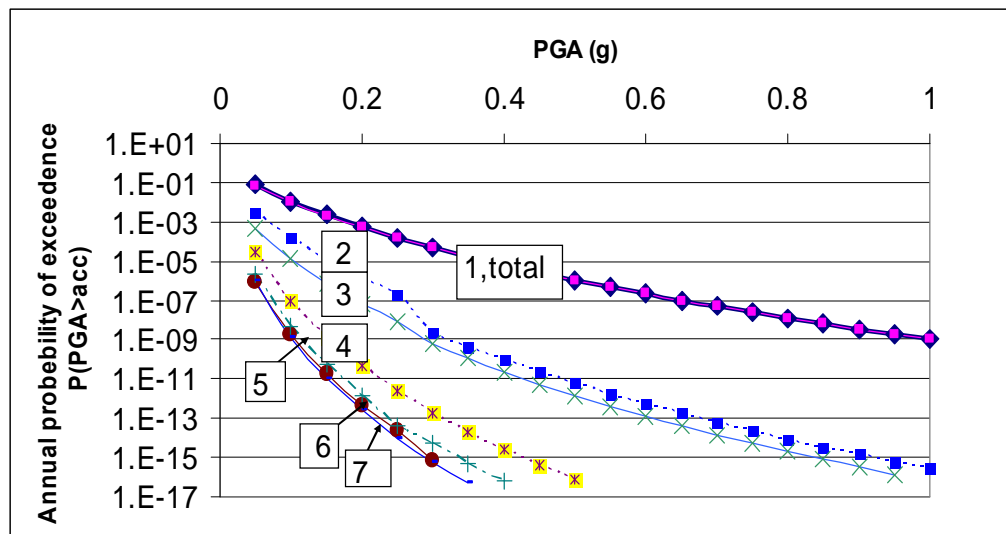
با استفاده از داده‌های لرزه‌ای به دست آمده از شکل (۴)، پارامتر  $b$  در حالت دسته‌بندی نوع ۱ برابر ۰/۹۱ و در دسته‌بندی نوع ۲ برابر ۰/۹۸ است که نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی بالای این چشمه است.



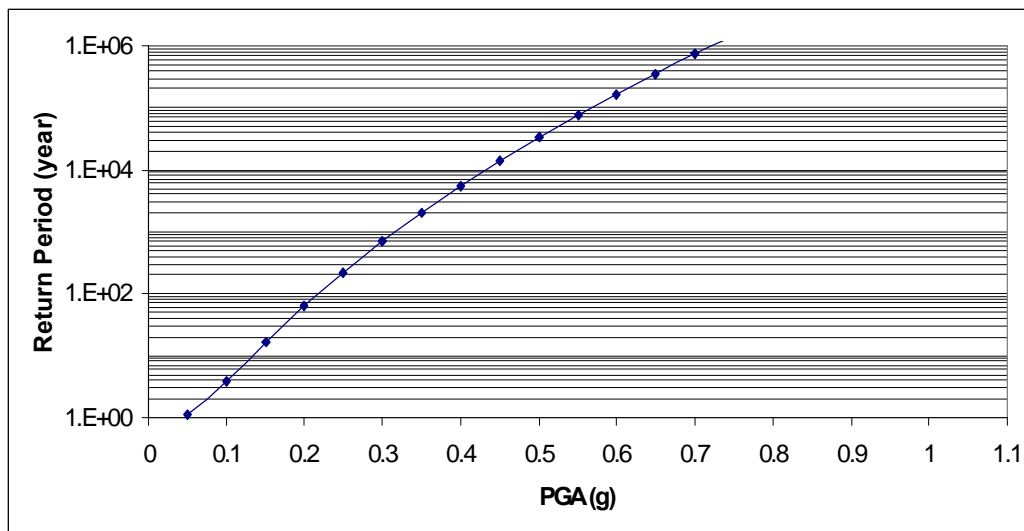
شکل ۴: چشمه‌ی لرزه‌زای ۴

چشمه‌ی ۶ نیز یکی از چشمه‌های لرزه‌زا است که به صورت ناحیه‌ای تعریف شده است. این چشمه به طور عمده از روند گسل‌های معکوس زاگرس و گسل زاگرس مرتفع پیروی می‌کند و با توجه به لرزه‌خیزی بالای این گسل‌ها، ناحیه مورد نظر نیز ناحیه‌ای متراکم از نظر لرزه‌خیزی است. در شکل (۵)، لرزه‌خیزی چشمه‌ی مورد نظر به همراه گسل‌های این چشمه نشان داده می‌شود.

شکل (۶)، پارامتر  $b$  در حالت دسته‌بندی نوع ۱ برابر ۰/۸۷ و در دسته‌بندی نوع ۲ برابر ۰/۹۴ است که نشان‌دهنده‌ی لرزه‌خیزی به نسبت بالای این چشمه است. چشمه‌ی ۷، به صورت یک چشمه‌ی ناحیه‌ای در نظر گرفته شد. این چشمه به طور کلی از روند گسل زاگرس



شکل ۷: احتمال سالانه‌ی رخداد برای هر یک سرچشمه‌ها و همچنین احتمال سالانه‌ی رخداد برای کل سرچشمه‌ها.



شکل ۸: دوره‌ی بازگشت زمین‌لرزه‌ها با بیشینه شتاب مشخص برای ساختمان معدن مس سرچشمه.

معدن روباز بوده و در چنین شیئی استعداد لغزش دارد، بنابراین می‌توان سازه‌ی معدن روباز را با زمین‌لغزش‌ها مقایسه کرد. در مورد زمین‌لغزش‌ها نظر بر این است که هر زمان زمین‌لغزه در سنگ‌های ترشیری قرار گیرد، موج‌های با فرکانس بالاتر همبستگی بیشتری با آن‌ها خواهند داشت و زمین‌لغزش‌های قرار گرفته در سنگ‌های کواترنری با موج‌های با فرکانس پایین همبستگی بیشتری دارند [۵]. به دلیل قرارگیری معدن مس سرچشمه در سنگ‌های ترشیری می‌توان نتیجه گرفت که این معدن در ارتباط با امواج فرکانس بالا همبستگی بیشتری داشته و به

پیروی کرده است و سایر چشمه‌ها تأثیر معنی‌داری در نمودار کلی ندارند، در نتیجه مشخص می‌شود که چشمه‌ی ۱ بیشترین تأثیر را در احتمال رخداد بر ساختمان مورد نظر دارد.

برای دوره‌ی بازگشت زمین‌لرزه‌ها بر حسب بیشینه شتاب، نمودار زیر حاصل شده است (شکل ۸).

با توجه به شکل (۸) مقدار بیشینه شتاب برای دوره‌ی بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ سال در این ساختمان به ترتیب ۰/۱۳g، ۰/۲۲g و ۰/۲۸g به دست آمده است.

به این دلیل که سازه‌ی مورد نظر در این ساختمان،

این امواج حساس تر است.

جدول ۱: پارامترهای لرزه‌ای لرزه‌های چشمه‌های لرزه‌زا.

| $D_{min}$<br>(Km) | $M_{max}$ | $\lambda$ | $\beta$ | Type of classification | Source Name |
|-------------------|-----------|-----------|---------|------------------------|-------------|
| 23                | 7         | 0.26      | 1.36    | Kijko Software         | 1           |
| 40                | 7         | 0.26      | 1.36    | Kijko Software         | 2           |
| 120               | 7.6       | 0.56      | 1.36    | Type 1                 | 3           |
|                   | 7.6       | 0.53      | 1.33    | Type 2                 | 3           |
|                   | 7.2       | 0.32      | 1.25    | Kijko Software         | 3           |
| 172               | 6.7       | 0.62      | 1.45    | Type 1                 | 4           |
|                   | 6.7       | 0.62      | 1.52    | Type 2                 | 4           |
|                   | 7.1       | 0.46      | 1.29    | Kijko Software         | 4           |
| 194               | 6.7       | 1.08      | 2.09    | Type 1                 | 5           |
|                   | 6.7       | 1.26      | 2.25    | Type 2                 | 5           |
|                   | 6.7       | 1.78      | 1.30    | Kijko Software         | 5           |
| 186               | 6.8       | 1.06      | 2.00    | Type 1                 | 6           |
|                   | 6.8       | 1.15      | 2.16    | Type 2                 | 6           |
|                   | 6.8       | 0.94      | 1.24    | Kijko Software         | 6           |
| 230               | 6.8       | 0.86      | 1.75    | Type 1                 | 7           |
|                   | 6.8       | 0.90      | 1.77    | Type 2                 | 7           |
|                   | 7         | 0.75      | 1.43    | Kijko Software         | 7           |

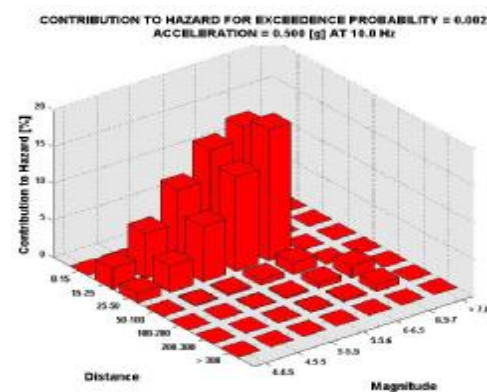
## تحلیل آسیب‌پذیری دیواره‌ی غربی معدن

### مس سرچشمه

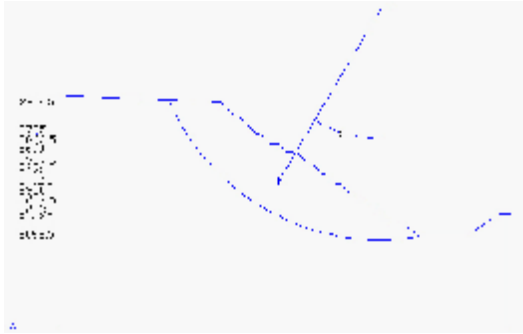
در این بخش سعی شده است به عنوان الگویی برای استفاده برای آسیب‌پذیری دیواره‌های معادن روباز، آسیب‌پذیری دیواره‌ی غربی معدن مس سرچشمه، که ظرفیت لغزش بیشتری دارد، بررسی شود. در این دیواره در پایان استخراج، حداکثر ارتفاع ۸۵۰ متر و شیب کلی دیواره معدن در این دیواره بین ۳۲ تا ۳۴/۵ درجه خواهد بود. با بازدید از معدن مشخص شد که در حال حاضر در این معدن از افق ۲۹۱۲/۵ تا افق ۲۴۱۲/۵ معدن‌کاری شده است و بدین ترتیب حداکثر ارتفاع در دیواره‌ی غربی معدن به ۵۰۰ متر رسیده است. همچنین شواهدی مبنی بر لغزش کلی در دیواره‌ی غربی به دست نیامد، ولی در این دیواره می‌توان در مواردی لغزش‌های گوه‌ای و یا در پاره‌ای موارد پرتاب سنگ را مشاهده کرد. در این مطالعه سعی شده است که آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لرزه در دیواره‌ی معدن بر اساس لغزش کلی محاسبه شود. بنابراین از اثرات زمین‌لرزه بر لغزش‌های گوه‌ای و همچنین پرتاب سنگ صرف نظر شده است. البته در مورد پرتاب سنگ، با آتش‌کاری کنترل شده، می‌توان تا حد بسیار زیادی از این پدیده جلوگیری کرد. بنا به تحقیقات انجام گرفته، مشخص شده است که سنگ‌های آندزیت بخش اعظم دیواره‌های معدن را تشکیل می‌دهد و پاشنه‌ی پیت نهایی معدن از استوک سرچشمه‌ی پرفیری تشکیل شده است. بنابراین در این مقاله از خواص مکانیک سنگی سنگ آندزیت به دست‌آمده از کارهای منتشر شده‌ی قبلی، استفاده شده است. در تحقیقات انجام گرفته قبلی، مقادیر متفاوتی برای خواص مکانیک سنگی سنگ‌های دیواره‌ی غربی ارائه شده است که در

بنابراین برای نشان دادن اثرات فرکانس‌های مختلف امواج رسیده از چشمه‌های متفاوت، از بحث جدایش خطر استفاده می‌شود. جدایش در حقیقت تفکیک خطر احتمالی زمین‌لرزه به پارامترهای اصلی زمین‌لرزه است. این پارامترها به طور معمول بزرگا و فاصله در نظر گرفته می‌شوند. برای استفاده از بحث جدایش خطر، از نرم‌افزار تهیه شده در این راستا [۴] استفاده شد.

در مورد این معدن به علت همبستگی با فرکانس‌های بالا از نمودارهای استخراج شده با فرکانس طیفی بالاتر از ۵ هرتز استفاده شد. به طور مثال در شکل (۴) مؤلفه‌ی خطر احتمالی زمین‌لرزه در فرکانس طیفی ۱۰ هرتز بر اساس فاصله و بزرگا نشان داده می‌شود.



شکل ۹: جدایش خطر زمین‌لرزه در فرکانس طیفی ۱۰ هرتز.



شکل ۱۰: زاویه‌ی شیب لغزش در شکست دایره‌ای.

بنا به تحقیقات انجام گرفته در این معدن، فاکتور ایمنی به روش آنالیز ابعادی دوعبده‌ی، برای دیواره‌ی غربی ۱/۵۳ به دست آمده است [۷] که با احتساب این عامل و با توجه به رابطه‌ی ۱، مقدار شتاب بحرانی برای این دیواره  $g = 0.27$  به دست می‌آید. اگر خواسته باشیم عامل ایمنی را با استفاده از خواص مکانیک سنگی آندزیت و رابطه‌ی پیشنهادی جیبسون و همکاران (۲۰۰۳) استفاده کنیم این معادله را داریم [۱۰]:

$$FS = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \phi'}{\gamma \tan \alpha} \quad (2)$$

که در آن  $\phi'$  زاویه‌ی اصطکاک مؤثر،  $c'$  چسبندگی مؤثر،  $\alpha$  زاویه‌ی شیب،  $\gamma$  چگالی مواد،  $\gamma_w$  چگالی آب،  $t$  ضخامت شیب عمود بر صفحه‌ی شکست و  $m$  بخشی از ضخامت صفحه بوده که اشباع شده است. عبارت اول در سمت راست معادله بیان‌کننده‌ی مؤلفه‌ی چسبندگی مقاومت، عبارت دوم بیانگر مؤلفه‌ی اصطکاک و مؤلفه‌ی سوم برای کاهش مقاومت اصطکاک به علت فشار آب منفذی است. در این رابطه مقدار ضخامت مورد استفاده، بنا به نظر جیبسون بیشترین مقدار ضخامت به صورت عمود بر سطح لغزش است [۱۰] که ضخامت با این ایده ۴۰۹ متر می‌شود.

در نتیجه عامل ایمنی در این دیواره، ۱/۳۹ به دست می‌آید که در این صورت شتاب بحرانی برای این دیواره  $g = 0.2$  محاسبه می‌شود.

در شکل (۱۱)، سایر منحنی‌های لازم برای به دست آوردن شتاب بحرانی با استفاده از مقادیر عامل ایمنی استاتیکی و زاویه‌ی لغزش ارائه شده است. پارامتر دوم، در محاسبه‌ی جابه‌جایی نیومارک، شدت آریاس،  $I_a$  است که یک نوع اندازه‌گیری از ارتعاش لرزه‌ای بر حسب جمع انرژی‌های به هدر رفته به وسیله‌ی وزن واحد ارتعاش سنج

این مطالعه ضعیف‌ترین خواص به عنوان بحرانی‌ترین حالت مد نظر قرار گرفته است. خواص مورد استفاده برای بررسی پایداری دیواره چسبندگی و همچنین زاویه‌ی اصطکاک در حالت اشباع است. مقدار چسبندگی ۲/۵ مگا پاسکال و زاویه‌ی اصطکاک سنگ آندزیت در حالت اشباع ۲۸ درجه به دست آمده است [۷].

## رهیافت نیومارک

هنگامی که یک شیب سنگی در معرض جنبش لرزه‌ای قرار می‌گیرد، چنانچه تنش عبوری دینامیکی به مقاومت برشی سنگ برسد، لزوماً شکست اتفاق نمی‌افتد. به علاوه، اگر عامل ایمنی روی یک سطح لغزش، در حین جنبش زمین به کمتر از یک برسد، این عامل به تنهایی نشان‌دهنده‌ی مسئله جدی نیست. چیزی که به واقع مشکل‌ساز است، اندازه‌ی جابه‌جایی در زمانی است که عامل ایمنی کمتر از ۱ شود [۸]. پارامتر جابه‌جایی شیب‌های خاکی و سنگی به دلیل جنبش‌های زمین‌لرزه را می‌توان با استفاده از روش نیومارک (۱۹۶۵)، محاسبه کرد [۹]. این روش نسبت به روش شبه‌استاتیکی به واقعیت نزدیک‌تر است. در حال حاضر برای محاسبه‌ی پارامتر جابه‌جایی نیومارک، روابط تجربی مختلفی ارائه شده است که هر یک از این روش‌ها متناسب با داده‌های شتاب‌نگاشت منطقه‌ی مورد نظر هستند. همان‌طور که ذکر شد برای به دست آوردن جابه‌جایی نیومارک با استفاده از روابط تجربی به دو عامل اساسی شتاب بحرانی و شدت آریاس نیاز است:

پارامتر اول به عامل ایمنی استاتیکی شیب با قابلیت لغزش و همچنین به زاویه‌ی لغزش بستگی دارد.

$$a_e = (FS - 1) g \sin \alpha \quad (1)$$

که در آن  $FS$  فاکتور ایمنی،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $\alpha$  زاویه‌ی شیبی که مرکز جرم در ابتدای حرکت خود با این زاویه حرکت می‌کند و در نهایت  $a_e$  شتاب بحرانی شیب است. زاویه‌ی شیب لغزش در این دیواره، با فرض لغزش دایره‌ای صلب (شکل ۱۰) بنا به بررسی نیومارک [۹] زاویه‌ی بین خط قائم بر مرکز دایره‌ی صفحه‌ی لغزش و خطی است که مرکز جرم سطح لغزش را به مرکز دایره‌ی صفحه لغزش وصل کرده است که در این دیواره این زاویه ۳۱ به دست آمده است.

میان روابط موجود، رابطه‌ی زیر بر اساس رابطه‌ی کاهندگی امبرسیز و بومر برای داده‌های شتاب‌نگاشت ایران انتخاب شده است [۱۳]:

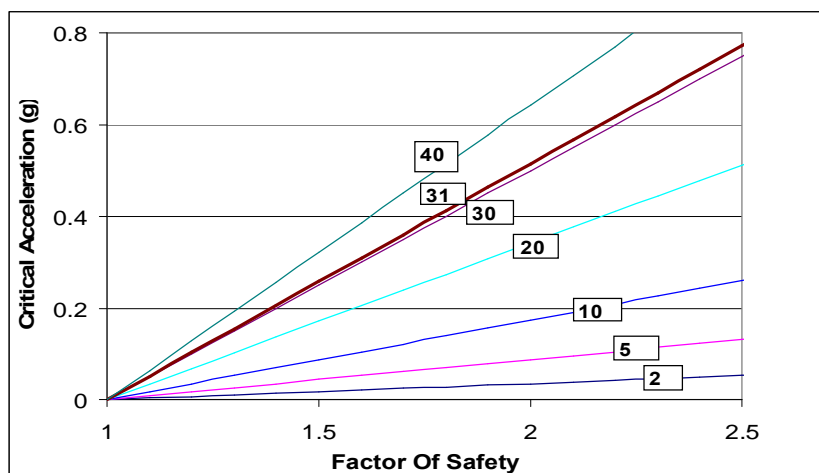
$$\log(I_a) = -\frac{3}{88} + \frac{0.181}{M} - 0.002R - \text{Log}(R) \quad (4)$$

که در آن  $M$  بزرگا و  $R$  فاصله‌ی رویداد تا ساختگاه است. پس از انتخاب رابطه‌ای مناسب برای به دست آوردن شدت آریاس، همچنین با به دست آوردن شتاب بحرانی مناسب برای ساختگاه مورد نظر، نوبت به برآورد جا به جایی نیومارک در این ساختگاه می‌رسد.

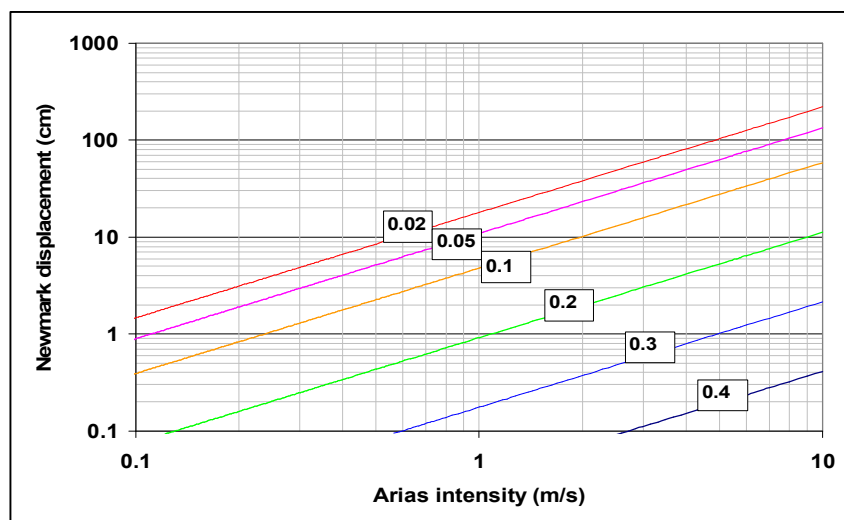
است، که فرکانسی بین صفر تا بی‌نهایت دارد و با واحد  $m/sec$  بیان شده است. همچنین با انتگرال زیر محاسبه می‌شود [۹]:

$$I_a = \frac{\pi}{\sqrt{g}} \int_0^{t_d} (a(t))^2 dt \quad (3)$$

که در آن  $a(t)$  شتاب زمین ثبت شده در حین یک رویداد،  $g$  گرانش (هر دو با واحد  $m/sec^2$ ) و  $T_d$  دوام ثبت رویداد است (به ثانیه). ویلسون و کیفر (۱۹۸۵) [۱۰] و کیفر و ویلسون (۱۹۸۹) روابط کاهندگی مشروط بر  $I_a$  به صورت تابعی از بزرگای زمین‌لرزه و فاصله از چشمه‌ی زمین‌لرزه ایجاد کردند [۱۲]. روابط استفاده شده برای شدت آریاس، روابط تدوین شده بر اساس داده‌های شتاب‌نگاشتی ایران بوده (مهدوی‌فر و همکاران، ۱۳۸۶) است که از



شکل ۱۱: منحنی‌های به دست‌آوردن شتاب بحرانی با استفاده از فاکتور ایمنی و زاویه‌ی لغزش (زوایای لغزش در داخل مربع نوشته شده است).



شکل ۱۲: مقادیر جابه‌جایی نیومارک بر اساس شدت آریاس و مقادیر مختلف شتاب بحرانی (مقادیر شتاب بحرانی در داخل مربع نشان داده شده است).



مختلف شدت آریاس و همچنین شتاب بحرانی، تهیه کرد (شکل ۱۳). احتمالات شکست به دست آمده در این شکل، از دو روش به دست آمده‌اند:

۱- در روش اول، از رابطه‌ی ارایه شده توسط جیبسون و همکاران [۱۰] برای زلزله‌ی نورتریج در آمریکا، الهام گرفته شده است که رابطه‌ی پیشنهادی درباره‌ی این زمین‌لرزه به این صورت است:

$$P(f) = m[1 - \exp(-aD_n^b)] \quad (6)$$

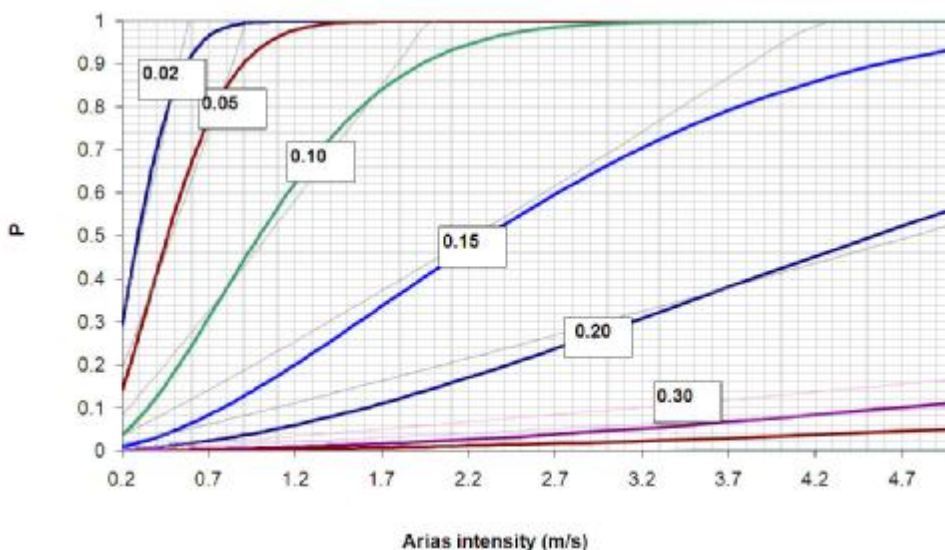
ضرایب به دست آمده در این معادله برای زمین‌لرزه در منطقه‌ی نورتریج برابر است با:  $a = 0.052$ ،  $m = 0.274$  و  $b = 1/663$ . شکل کلی معادله به شکل بالا است و تنها ضرایب بسته به شرایط مختلف متغیر است. در این مورد به این دلیل که بیشینه احتمال لغزش مد نظر بوده است ضریب  $m$  برابر ۱ و بقیه ضرایب همان ضرایبی است که در زلزله‌ی نورتریج به دست آمده است [۱۴].

۲- در روش دوم، احتمال لغزش برای وقتی که جابه‌جایی نیومارک بزرگ‌تر و مساوی ۱۰ به دست آمده است، برابر ۱ در سایر موارد، جابه‌جایی نیومارک به دست آمده به عدد ۱۰ نرمال شده است. در این صورت منحنی‌های خطی (شکل ۱۳) به دست آمده‌اند. همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، این منحنی‌ها همپوشانی به نسبت مناسبی را با هم دارند و می‌توان از این نمودارها برای برآورد بیشینه احتمال لغزش در این مورد استفاده کرد.

در این مرحله، از رابطه‌ی تجربی تدوین شده بر اساس داده‌های شتاب‌نگاشتی ایران (مهدوی‌فر و همکاران، ۱۳۸۶) [۱۲] و الگو گرفته از رابطه‌های تجربی جیبسون و همکاران [۱۳]، استفاده شده است که این رابطه به صورت زیر است:

$$\log(D_n) = -1/0.87 \times \log(I_a) - 7/176 \times (a_c) + 1/398 \quad (5)$$

بر اساس این رابطه، نمودارهایی برای مقادیر مختلف شتاب بحرانی و همچنین شدت آریاس به دست آمده است (شکل ۱۲). بر اساس این روابط مقدار جابه‌جایی نیومارک در بحرانی‌ترین حالت، ۲/۳۵ سانتی‌متر به دست می‌آید. که بر اساس طبقه‌بندی ارایه شده توسط کیفر، جابه‌جایی متوسطی دارد که احتمال لغزش در این حالت کم تا متوسط است. برای به دست آوردن مقدار احتمال لغزش که همان مقدار آسیب‌پذیری در این ساختگاه می‌شود، می‌توان از حدود آستانه‌ی ارایه شده توسط ویلسون و کیفر استفاده کرد. بر این اساس حد آستانه‌ی برای لغزش‌های چسبنده ۱۰ سانتی‌متر و برای لغزش‌های گسسته ۲ سانتی‌متر برآورد شده است که با توجه به برآورد لغزش چسبنده با توجه به نوع مواد تشکیل دهنده و ضریب چسبندگی بالا در این معدن، حد آستانه‌ی لغزش ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس می‌توان نمودارهای احتمال لغزش را با توجه به حد آستانه‌ی مقادیر جابه‌جایی نیومارک به دست آمده برای مقادیر



شکل ۱۳: نمودارهای احتمال لغزش، بر اساس شدت آریاس و مقادیر شتاب بحرانی (مقادیر شتاب بحرانی در این نمودارها در داخل مربع‌ها نوشته شده است).

با توجه به مقادیر به دست آمده از شدت آریاس و همچنین شتاب بحرانی، بیشینه احتمال لغزش در دیواره‌ی غربی معدن مس سرچشمه، ۰/۲۷ به دست می‌آید. در حقیقت این عدد مقدار آسیب‌پذیری در برابر زمین‌لرزه‌ی احتمالی برای دیواره‌ی غربی معدن است.

### تحلیل ریسک زمین‌لرزه در معادن روباز

درباره تحلیل ریسک در معادن در مرحله اول باید سازی معدن روباز را که همان پیت معدن است، بررسی کرد. سازی معدن روباز در حقیقت از دیواره‌هایی تشکیل می‌شود که این دیواره‌ها را می‌توان به عنوان شیب‌هایی با قابلیت لغزش در نظر گرفت. باید اذعان کرد که معدن بر خلاف سازه‌های عمرانی در تمام عمر خود در حال تغییر است. به بیانی دیگر معدن، سازه‌ای دینامیک است که همین موضوع تحلیل ریسک در مورد معادن روباز را پیچیده‌تر می‌کند. ریسک زلزله را در معادن روباز (یعنی مقدار خسارت مورد انتظار به دلیل لغزش شیب در اثر زمین‌لرزه) می‌توان با رابطه‌ی زیر بیان کرد [۱۵]:

$$R_s = \sum (C_i V_i) H \quad (5)$$

که در آن  $C_i$  نشان‌دهنده‌ی قیمت ماشین‌آلات مخصوص معدن کاری و خسارت به انسان‌هایی است که در معرض خطر مستقیم به علت رخداد لرزه‌ای هستند. از این میان دیگر عامل‌ها،  $C_i$  نتیجه‌ی ثانویه‌ی لغزش شیب است. برای مثال، غرامت مالی کارگران از کار افتاده، مقادیر تولید از دست رفته و شیب‌های طبیعی ویران شده را باید به حساب آورد.

$V_i$  به معنای آسیب‌پذیری است، یعنی بخشی از مقدار  $C_i$  که به طور کلی (۴ یا ۵) بخشی از آن خراب می‌شود:

$$0 \leq V_i \leq 1 \quad (6)$$

$H$  خطر لرزه‌ای است. یعنی احتمال رخداد لرزه‌ای با شدت  $I$  و یا با جنبش زمین مشخص که می‌تواند مسبب خسارت مورد انتظار در مکان مورد نظر و در خلال بازه‌ی زمانی مورد نظر شود:

$$0 \leq H \leq 1 \quad (7)$$

در این بیان، منظور از رخداد‌های لرزه‌ای، همه‌ی زمین‌لرزه‌های زمین‌ساخت طبیعی و همچنین زمین‌لرزه‌های مصنوعی "الفای" هستند [۱۵]. در این مطالعه اثر نامطلوب موج‌های لرزه‌ای شدید حاصل از انفجارهای بزرگ که اغلب در معادن روباز به کار برده

می‌شود، حذف شده است. این اثرات در نواحی کوچکی در حوالی شیب‌ها عمل می‌کنند. زمان و منشا این رخدادها مشخص است و کاربرد عملیات آتش‌کاری کنترل‌شده می‌تواند خطر لرزه‌ای را تا حد ناچیزی برساند. به همین دلیل است که ریسک لرزه‌ای انفجارهای معدن روباز بیش از این بحث نشده است. برای تعیین ریسک زمین‌لرزه  $R_s$  مطابق با رابطه ۱، سه عامل مستقل باید فرض شود: مقدار  $C_i$  به طور کامل در اختیار مالکان معدن است.  $V_i$  به طور معمول باید بر مبنای زمین‌شناسی و زلزله‌شناسی مهندسی درباره‌ی حرکت شیب در خلال زمین‌لرزه‌ها تخمین زده شود. برای تعیین فاکتور آخر  $H$ ، دانش لرزه‌خیزی ناحیه‌ی مورد نظر به کار می‌آید. در این مطالعه خطر زمین‌لرزه و همچنین آسیب‌پذیری ناشی از زمین‌لرزه بررسی شده‌اند. همان‌طور که در بحث تحلیل خطر زمین‌لرزه اشاره شد احتمال خطر زمین‌لرزه برای شتاب بیشینه‌ی زمین محاسبه شده است. احتمال رخداد  $p$ ، مربوط به فراوانی سالیانه فزونی یافتن جنبش زمین "σ" و بازه زمانی  $t$  است:

$$P = 1 - \exp(-\sigma t) \quad (8)$$

برای بیشینه شتاب  $g$  ۰/۱۵ احتمال رخداد سالیانه، ۰/۰۱ به دست می‌آید. بنابراین برای ۳۰ سال عمر مفید معدن میزان خطر قابل پذیرش ۰/۲۵۹ است.

همان‌طور که در بخش قبلی هم ذکر شد، مقدار آسیب‌پذیری دیواره‌ی غربی معدن مس سرچشمه در بحرانی‌ترین حالت، ۰/۲۷ است. که با توجه به رابطه‌ی ریسک در مورد معادن روباز مقدار ریسک زمین‌لرزه در این دیواره‌ی غربی برای حالت لغزش کلی، عبارت است از:

$$R = V \times H \times C = 0.26 \times 0.27 \times C = 0.07 C \quad (9)$$

در نتیجه ریسک در این معدن با توجه به شرایط کلی گفته شده ۰/۰۷ مقدار خسارت مالی کلی به معدن خواهد بود.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مطالعه در حقیقت اولین قدم در راه بررسی آسیب‌پذیری و ریسک زمین‌لرزه در معادن روباز ایران است که در این راستا از رهیافت خطر لرزه‌ای و در مرحله‌ی بعدی تحلیل پایداری دینامیکی به کمک رهیافت نیومارک استفاده شده است. بررسی خطر لرزه‌ای در

شتاب‌نگاشتی ایران (مهدوی فر و همکاران، ۱۳۸۶)، استفاده شده است.

در این معدن مقدار جابه‌جایی نیومارک ۲/۳۵ سانتی‌متر به دست می‌آید و با توجه به طبقه‌بندی انجام گرفته توسط ویلسون و کیفر مقدار متوسطی را دارد. برای به دست آوردن مقدار آسیب‌پذیری و در حقیقت احتمال لغزش در این ساختگاه، از دو رهیافت استفاده شد و با استفاده از این دو رهیافت مقدار احتمال لغزش برای دیواره‌ی معدن حدود ۰/۲۷ به دست می‌آید. در نهایت با توجه به رابطه‌ی ریسک و همچنین برآورد خطر احتمالی زمین لرزه و آسیب‌پذیری دیواره‌ی غربی در حالت لغزش کلی، مقدار ریسک در این معدن ۰/۰۷ خسارت کلی به معدن برآورد می‌شود که این مقدار با توجه به هزینه‌های بسیار سنگین معدن مقدار قابل توجهی خواهد بود.

محدوده‌ی معدن نشان می‌دهد که گسل رفسنجان به عنوان چشمه‌ی خطی، مؤثرترین نقش را در خطر لرزه‌ای در این معدن ایفا می‌کند.

تحلیل خطر لرزه‌ای در این معدن نشان می‌دهد که برای این ساختگاه برای بازه‌های زمانی ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ سال مقادیر بیشینه شتاب افقی زمین به ترتیب  $g/۱۳$ ،  $g/۲۲$  و  $g/۲۸$  به دست آمده است. دلیل استفاده از رهیافت نیومارک برای پایداری دیواره‌ها آن است که این روش از مقادیر شدت آریاس و همچنین شتاب بحرانی استفاده کرده است و بنابراین محدود به یک شتاب بیشینه نیست و شرایط پایداری را دقیق‌تر بررسی می‌کند. با به دست آوردن شدت آریاس و همچنین با برآورد شتاب بحرانی مناسب برای ساختگاه مورد نظر، برای برآورد جابه‌جایی نیومارک در این ساختگاه، از رابطه‌ی تجربی تدوین شده بر اساس داده‌های

## مراجع

- 1 - Kijko, A. and Sellevol, M. A. (1980). "Estimation of Earthquake Hazard Parameter From incomplete Data Files. Part I. Utilization of Extreme and Complete Catalogs with Different of Threshold Magnitude." *Bulletin of Seismological of America*, Vol. 79, No. 3, PP. 845-854.
- 2 - Kijko, A. And Sellevol, M. A. (1992). "Estimation of Earthquake Hazard Parameter From incomplete Data Files. Part II. Incorporation of Magnitude Heterogeneity." *Bulletin of Seismological of America*, Vol. 82, No. 1, PP. 120- 134.
- 3 - Shahvar, M. (2006). *Seismic hazard deaggregation in Bam earthquake*, Msc. Thesis , International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES).
- 4 - Montilla, J. A. P., Galdeano, C. S. and Casado, C. L. (2003). "Use of Active Fault Data versus Seismicity Data in the Evaluation of Seismic Hazard in the Granada Basin (Southern Spain)." *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 4, PP. 1670-1678.
- 5 - Zare, M. (2005). *Introduction to Applied Seismology, 1<sup>st</sup>*. Ed. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.
- 6 - Ramos, A. M. and Rodriguez, C. E. (2003). "Ground Strong Motion and Landslides Relationships: the Lomapieta Earthquake Analysis." *Geophysical Institute, Javeriana University, Bogota, Colombia*.
- 7 - Bakhshi, H. R. (2006). *Analysis of Slope stability of the west wall of Sarcheshmeh Copper Mine by 3D Numerical Methods in a non continuous medium*, Msc. Thesis, University of Tehran.
- 8 - Lin, J. S. and Whitman, R. V. (1986). "Earthquake induced displacement of sliding blocks." *J, Geotech. Eng Div., ASCE*, Vol. 112, No. 1.
- 9 - Newmark, N. M. (1965). "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments." *Geotechnique* , Vol. 15, PP. 139-160.

- 10 - Jibson, R. W. Harp, E. L. and Michael, J. A. (1998). *A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California, Area*, Open-File Report 98-113, PP.42.
- 11 - Wilson, R. C. and Keefer, D. K. (1985). "Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding, in Ziony." *J.I., ed., Evaluating Earthquake Hazards in the Los Angeles Region-An Earth-Science Perspective*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, PP: 316-345.
- 12 - Keefer, D. K. and Wilson, R. C. (1989). *Predicting Earthquake-induced Landslides, with Emphasis on Arid and Semi-arid Enviroments*, in P.M. Sadler, and D.M. Morton (eds.), *Landslides in a Semiarid Environment*, Inland Geological Society of Southern California Publications, Riverside, California. Vol. 2, Part 1, PP. 118–149.
- 13 - Mahdavifar, M., Jafari, M. K. and Zolfaghari, M. (2007). "The Attenuation of Arias Intensity in Alborz and Central Iran." *Proc., 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Seismology and Earthquake Engineering*, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Iran.
- 14 - Jibson, R. W. (personal communication),
- 15 - Tobyas., V. (1996). "Seismic Risk by Open Pit Mining Near Slopes of Krusne Hory MTS." *ACTA Montana IRSM AS CR, Series A*, No. 10, PP. 193- 201.