



نقش سیستم شکستگی‌ها در شرایط بارگذاری لرزه‌ای بر ناپایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه

عباس کنگی^{۱*}، ممسن پورکرمانی^۲ و سمیه میرزایی^۳

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، kangiabas@hotmail.com

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، mohsen.pourkermani@gmail.com

(۳) گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان

(* عهده‌دار مکاتبات)

تاریخ دریافت: ۸۹/۵/۳۰؛ تاریخ دریافت اصلاح شده: ۸۹/۱۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱۲؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۰/۵/۲۵

هکیده

در معدن مس سرچشمه شرایط هندسی سنگ‌برداری، وضعیت آب زیرزمینی، ویژگی‌های مکانیکی سنگ، خصوصیات فیزیکی و هندسی شکستگی‌ها و راستای نفوذ دایک‌ها سبب شده دیواره‌های معدن از نظر پایداری رفتارهای متفاوتی از خود نشان دهند. مجموع این خصوصیات نامناسب‌ترین شرایط پایداری را برای دیواره غربی معدن فراهم نموده است. به علاوه نفوذ دایک‌های گرانودیوریتی در بخش غربی معدن مس سرچشمه تغییرات اساسی در ابعاد، فرم توده معدنی، کانی‌سازی، هیدروژئولوژی و رفتار ژئومکانیکی توده سنگ ایجاد نموده است. راستای شمالی جنوبی این دایک‌های نفوذی، سبب شده اغلب آن‌ها به موازات دیواره غربی امتداد یافته و پتانسیل ناپایداری این بخش را تشدید نمایند. وضعیت خاص سیستم شکستگی‌ها نسبت به سطح سنگ‌برداری در دیواره غربی معدن شرایطی را ایجاد نموده که در صورت رویداد زمین‌لرزه با شتاب افقی $2.4g$ ، دیواره‌های با شیب بیش از ۵۰ درجه ناپایدار گردیده و توده‌های بزرگ سنگ بصورت صفحه‌ای با درزه‌های کششی لغزش کنند. در چنین شرایطی ظهور ریزش‌های گوه‌ای با ابعاد کوچک در راستای فصل مشترک دو دسته بلوک B2 و B3 دور از انتظار نیست. همچنین پتانسیل لغزش‌های دایره‌ای بر روی واریزه‌ها و سنگ‌های به شدت خرد شده این بخش از معدن وجود دارد. ویژگی‌های مکانیکی واریزه‌ها به گونه‌ای است که در شرایط بارگذاری لرزه‌ای دامنه‌های با شیب بیش از ۲۰ درجه ناپایدار می‌شود. بنابراین در صورت رویداد زمین لرزه مبنای طرح (DBL) با شتاب گراننش افقی برابر $2.4g$ ، ناپایداری‌های گسترده از نوع لغزش صفحه‌ای، گوه‌ای در توده سنگی و لغزش‌های دایره‌ای بر روی واریزه‌ها و سنگ‌های به شدت خرد شده حاصل خواهد شد. این لغزش‌ها خسارات زیادی را به همراه خواهد داشت و عملیات بهره‌برداری از ماده معدنی در اعماق بیشتر را با مشکل روبرو می‌کند.

واژه‌های کلیدی: معدن مس سرچشمه، زمین‌لغزش، بارگذاری لرزه‌ای.

۱- مقدمه

لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس در زیرصفحه ایران و در اثر بالا آمدن محلول‌های گرمایی کانه‌دار شکل گرفته است (Kangi et al. 2010, Wrobel-Daveau et al. 2010). معدن مس سرچشمه با شیب دیواره‌های ۲۹ تا ۳۵ درجه، به شکل یک بیضی می‌باشد که قطر بزرگ آن ۲۳۰۰ متر و قطر کوچک آن ۱۲۰۰ متر طول دارد. عملیات اکتشاف این کانسار در سال ۱۳۲۸ شروع و در سال ۱۳۴۷ به شرکت سلکشن

معدن مس سرچشمه در فاصله ۶۰ کیلومتری جنوب رفسنجان، در مجموعه ارتفاعات بنده مزار-پاریز در طول جغرافیایی $53^{\circ}55'$ و عرض جغرافیایی $29^{\circ}57'$ قرار دارد. این معدن یکی از مهم‌ترین ذخایر مس و مولیبدن پورفیری رویاز جهان است که بر روی کمر بند مس قرار دارد. این کمر بند آتشفشانی حدود ۲۵ میلیون سال پیش در طی فرورانش

۱۰۰ ساله بوسیله نرم‌افزارهای SeisRiskIII مورد محاسبه قرار گرفت. در نهایت داده‌های حاصل از برداشت‌های صحرایی، حفاری‌های دستگاهی، نتایج آزمایشگاهی و محاسبات توسط نرم‌افزارهای RockWork14، RocPackIII و Slide مورد پردازش قرار گرفت. بدین ترتیب فرم لغزش توده‌های سنگی شناسایی و مناسب‌ترین شیب پله‌ها بر روی دیواره غربی، در شرایط رویداد زمین لرزه‌های محتمل ارزیابی گردید.

۷- جایگاه تکتونیک

معدن مس سرچشمه بر روی کمر بند آتشفشانی ارومیه-بزمان و در مجاور پهنه سنندج-سیرجان قرار دارد (تصویر ۲). زون سنندج-سیرجان با پهنای ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلومتر در شمال شرق راندگی اصلی زاگرس قرار گرفته است. این واحد ساختاری از غرب دریاچه ارومیه تا گسل میناب امتداد دارد و به دلیل پدیده‌های دگرگونی، ماگماتیسم و فعالیت‌های تکتونیک پی‌درپی، ناآرام‌ترین پهنه ساختاری ایران می‌باشد (Shahabpour 2005). دگرگونی در نیمه جنوبی این پهنه بیشتر تحت تأثیر کوه‌زایی سیمین پیشین و دگرگونی و پلوتونیزم در نیمه شمالی بیشتر تحت تأثیر رویداد لارامید بوده است (Alavi 1994, Hooper et al. 1994, Wrobel-Daveau et al. 2010). پهنه سنندج سیرجان در طی پرمین، تحت تأثیر ریفت شدگی قرار گرفته و به حوضه‌ای در حال فرونشست، که توسط رسوبات آواری انباشته گردیده، تبدیل شده است. در این دوره زمانی، نیروهای کششی ناشی از ریفت شدگی، ظهور

تراست واگذار گردید. این شرکت با انجام یک سری عملیات اکتشافی از جمله حفر ۳۳۵۰۰ متر گمانه اکتشافی، ۱۷۲۰۰ متر تونل اکتشافی و تهیه نقشه‌های متعدد، ذخیره‌ای معادل ۴۰۰ میلیون تن سنگ معدن با عیار ۱/۱۲ درصد را تعیین نمود. ادامه فعالیت‌های اکتشافی از سال ۱۳۵۱ توسط شرکت آناکاندا صورت گرفت. فعالیت‌های این شرکت شامل حفر ۲۹۴۲۰ متر گمانه اکتشافی و تهیه نقشه‌های اکتشافی با مقیاس‌های مختلف بوده است و ذخیره‌ای معادل ۸۰۰ میلیون تن سنگ معدن با عیار ۰/۸۴ درصد را تعیین نموده است.

طی سال‌های اخیر هم زمان با افزایش عمق معدن، ناپایداری‌هایی در دیواره غربی معدن ایجاد شده که علاوه بر تخریب پله‌ها، بهره‌برداری از این بخش معدن را با مشکلات روبرو کرده است (تصویر ۱). در چنین شرایطی رویداد زمین‌لرزه‌های نیرومند، ناپایداری در این بخش معدن را تشدید نموده و علاوه بر خسارات، عملیات بهره‌برداری ماده معدنی را متوقف خواهد کرد. بنابراین ارزیابی پتانسیل لغزش تحت بارگذاری لرزه‌ای، بر روی دیواره غربی معدن از ضروریات می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش، نخست کلیه اطلاعات موجود از جمله گزارش‌های زمین‌شناسی، داده‌های ژئوتکنیکی و نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ و خاک مورد بررسی قرار گرفته است. سپس محدوده دیواره غربی معدن شبکه‌بندی شده و در ۸ ایستگاه در ترازهای مختلف عملیات درزنگاری در حد مقیاس ۱:۱۰۰ انجام گردید. داده‌های مورد نظر براساس طبقه‌بندی اصلاح شده بنیوسکی دسته‌بندی و امتیاز ژئومکانیکی سنگ در بخش‌های مختلف معدن مشخص گردید. سپس مشخصات لرزه‌ای موردنیاز در محل معدن برای عمر مفید ۲۰، ۵۰ و

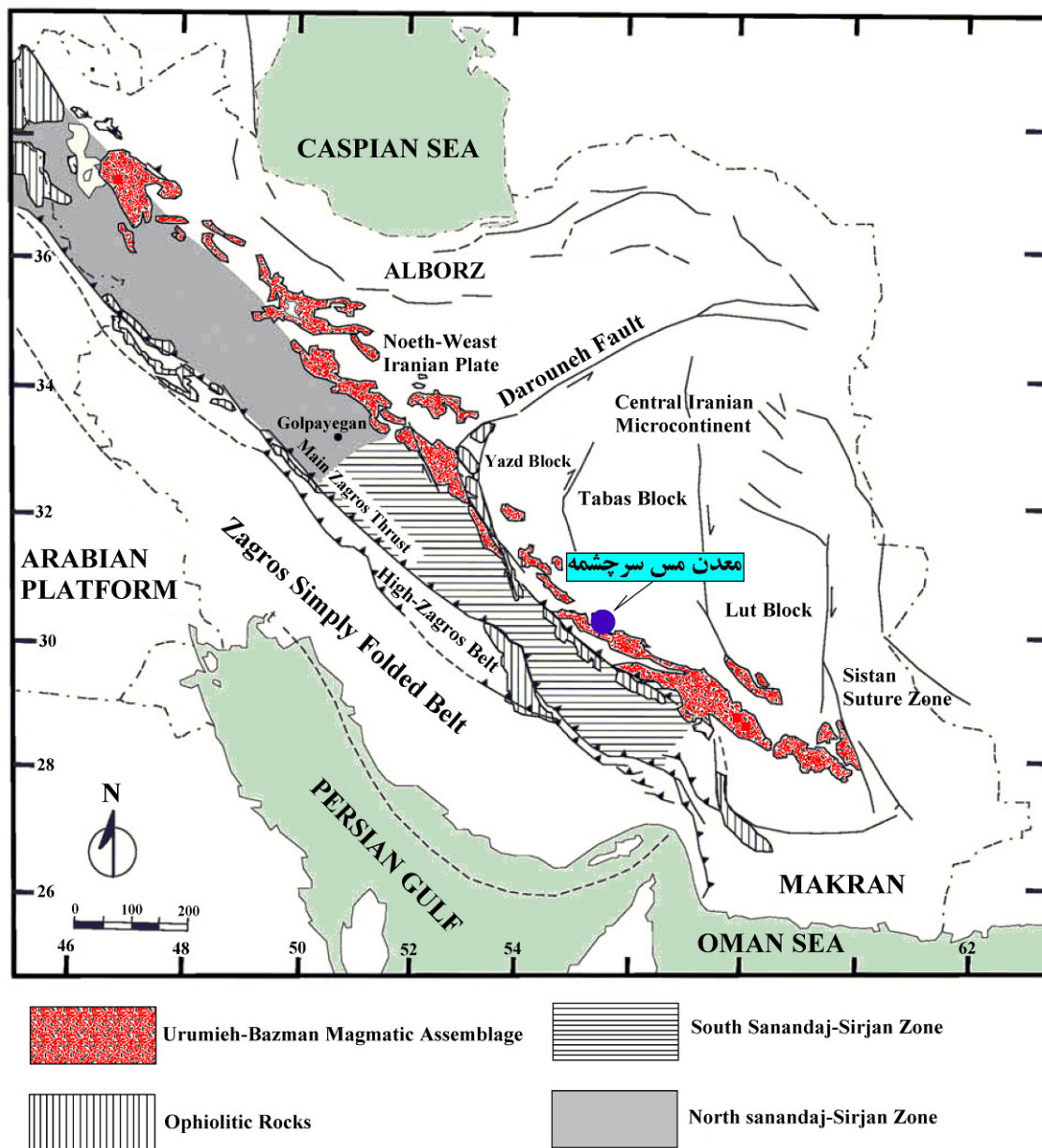


تصویر ۱- نمایی از دیواره غربی معدن مس سرچشمه

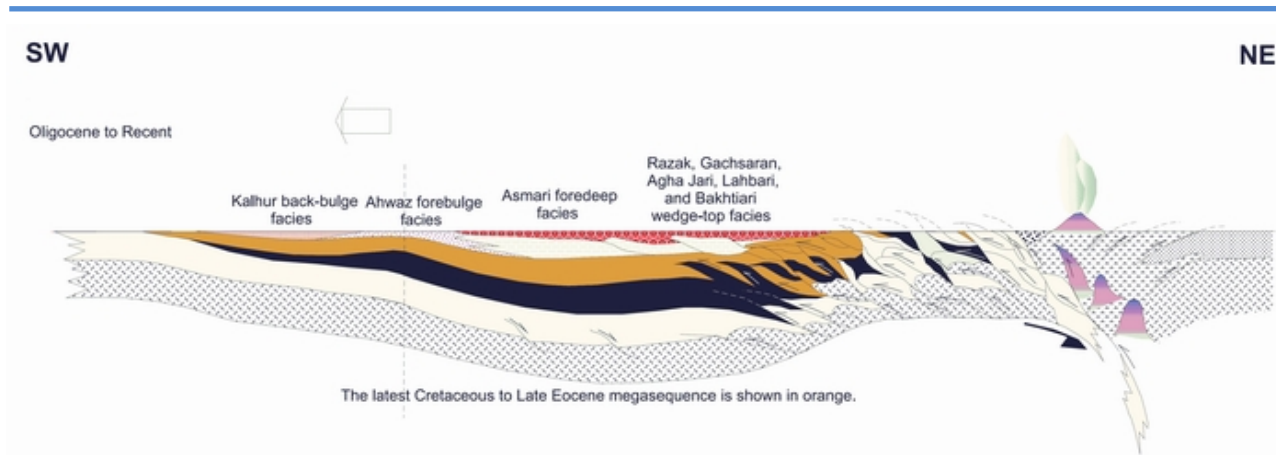
در حاشیه فعال صفحه ایران تحت تأثیر فرورانش، به اوج فعالیت خود رسیده است (تصویر ۳). این کمربند ولکانیکی شامل تولیت‌های کالک آلکان و توالی‌های آذرآوری و ولکانوکلاستیک می‌باشد. این مجموعه‌ها بصورت توده‌ای و خوشه‌ای شامل بازالت، پیروکلاستیک، گرانیت، دیوریت و گابرو به موازات رشته کوه زاگرس گسترش یافته‌اند (Hessami et al. 2001).

با برخورد نهایی دو قاره ایران و عربستان در میوسن میانی تغییر شکل و چین‌خوردگی در زاگرس آغاز گردید. بدین ترتیب در پهنه فلس زاگرس (Zagros imbricate zone) مجموعه‌ای از گسل‌های تراستی، واحدهای دگرگونی فانروژنیک را در مجاور یکدیگر و بر روی افیولیت‌های زاگرس رانده است.

ماگماهای بازالتی را به همراه داشته است (Shafiei 2010, Alavi 1994). در طی تریاس بالایی، هم‌زمان با تشدید فعالیت ماگماتیسم و ریفت‌شدگی اقیانوس نئوتتیس، مرحله دوم کشش در پهنه سنندج سیرجان ایجاد گردیده است (Sengor 1990, Ghasemi et al. 2005). در کرتاسه بالایی و پالئوسن تحتانی و در مراحل نخست بسته شدن اقیانوس‌های نئوتتیس و ناین-بافت، صفحه‌های عربی و سنندج سیرجان با دو کمان جزیره‌ای (Island arc) برخورد نموده‌اند. این برخورد استقرار افیولیت‌های نیریز-کرمانشاه در لبه شمالی صفحه عربی و افیولیت‌های ناین-بافت در شمال سنندج سیرجان را سبب شده است (Ghasemi & Talbot 2006). در آخرین مراحل بسته شدن اقیانوس نئوتتیس در طی ائوسن میانی، کمربند ولکانیکی ارومیه-بزمان



تصویر ۲- موقعیت معدن مس سرچشمه نسبت به کمربند آتشفشانی ارومیه-بزمان و سنندج-سیرجان (Ghasemi & Talbot 2006).



تصویر ۳- شکل‌گیری کمر بند آتشفشانی ارومیه-بزمان تحت تأثیر فرورانش لیتوسفر اقیانوس نئوتیس (Alavi 2004).

نیمی از حجم ماده معدنی در آن‌ها شکل گرفته است (Dargahi et al. 2010). استوک پورفیری سرچشمه با جنس گرانودیوریت و کانی‌سازی مس، جوان‌تر از سنگ‌های آندزیتی بوده و در هنگام بالا آمدن، آندزیت‌ها را قطع کرده است. به گونه‌ای که شدت کانی‌سازی در مجاورت آندزیت و استوک پورفیری سرچشمه افزایش یافته است (Ahmadzadeh et al. 2010).

در معدن مس سرچشمه، تحت تأثیر نفوذ محلول‌های گرمایی (هیدروترمال)، مجموعه‌ای از دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، بیوتیتی ثانویه، پروپلیتیکی و آرژیلیتی علاوه بر کانی‌زایی، خواص مقاومتی و ژئومکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. مهم‌ترین کانی‌های سولفور در منطقه سوپرژن این معدن کالکوسیت، کولیت، پیریت و گاهی مولیبدنیت می‌باشند، که میانگین میزان عیار مس آن ۱/۵ درصد است (MacClusky et al. 2003, Dargahi et al. 2010). بنابراین تحولات زمین‌شناسی منطقه معدنی سرچشمه را می‌توان مرحله به مرحله بصورت زیر تشریح نمود؛

- ۱- ته نشین شدن یک سری ضخیم گدازه‌های آندزیت زیر دریایی، توف‌ها و برش‌ها در دوره ائوسن.
- ۲- نفوذ یک توده از دیوریت هورنبلند - بیوتیت‌دار در ۲ کیلومتری شمال غرب منطقه معدنی در دره پران و احتمالاً چین‌خوردگی سنگ‌های آتشفشانی.
- ۳- نفوذ یک استوک گرانیتی تا گرانودیوریتی (پورفیری) در سنگ‌های آتشفشانی در دوره میوسن یا قبل از آن.
- ۴- ترک خوردگی شدید استوک و سنگ‌های آتشفشانی اطراف که به دنبال آن فازهای آرژیلی شدن، سیلیسی شدن و کانی‌سازی صورت گرفته است.
- ۵- همزمان با فازهای دگرسانی، دایک‌هایی با کانی‌سازی کم و پراکنده نفوذ کرده‌اند که معمولاً جهت آن‌ها شمال-شمال غرب است.

در این زون ورقه‌های تراستی به سمت جنوب غرب و بر روی کراتون عربی رانده شده‌اند (Alavi 2004). آنالیزهای توپوگرافی و مطالعات سائزموکتونیک، دلالت بر آن دارند که گسل‌های تراستی کور موجود در پی‌سنگ پهنه فلسی زاگرس، تغییر شکل‌های مهمی را در پوشش رسوبی ایجاد کرده‌اند. بدین ترتیب که فعالیت گسل‌های تراستی کور، باعث تکامل چین‌های نامتقارن در پوشش رسوبی گردیده است (Kangi & Heidari 2008).

۳- تاریخچه زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه

بررسی‌های زمین‌شناسی نشان می‌دهد که کانسار مس سرچشمه متشکل از یک توده گرانودیوریتی محصور در یک توده آندزیتی است که در زمان‌های مختلف توسط دایک‌هایی با ترکیب گرانودیوریت قطع شده است (تصویر ۴). دایک‌ها خیلی جوان‌تر از سنگ میزبان آندزیتی بوده و حدوداً نیمی از سنگ‌های معدن را تشکیل می‌دهند و به جز در مواردی در زون سوپرژن (غنی شده)، به صورت ثانویه منیرالیزه شده‌اند و به عنوان سنگ باطله معدن محسوب می‌شوند (Omran et al. 2009). کلیه دایک‌های موجود در معدن مس سرچشمه، از نظر سنگ‌شناسی، گرانودیوریت شناخته شده‌اند که برحسب زمان نفوذ و نوع کانی‌های غالب، به انواع دایک هورنبلند پورفیری، دایک فلدسپات پورفیری دایک بیوتیت پورفیری طبقه‌بندی گردیده‌اند (Azizi & Moinevaziri 2009). توزیع گسترده دایک‌ها در توده معدنی موجب تغییراتی اساسی در پارامترهای هیدروژئولوژیکی معدن، تغییر در ابعاد و فرم توده معدنی و تحت تأثیر قرار دادن کانه‌سازی شده است. راستای شمالی جنوبی دایک‌های نفوذی، سبب شده اغلب آن‌ها به موازات دیواره غربی معدن جهت‌گیری کنند (Ghasemia & Talbot 2006). سنگ آندزیت پورفیری سرچشمه به عنوان میزبان و قدیمی‌ترین سنگ، تحت تأثیر دگرسانی‌های زیادی قرار گرفته و تقریباً بیش از

این پارامترها عبارتند از M_{max} , λ و β در معادله گوتنبرگ ریشتر. پارامتر λ عبارت است از آهنگ رویداد سالانه یا نرخ پویایی (Kijko & Sellevoll 1989) و پارامتر M_{max} حداکثر بزرگی زمین‌لرزه‌ای می‌باشد که یک گسل توان تولید آن را دارد (Ward 1997).

در منطقه‌ی مورد مطالعه ارزیابی پارامترهای اصلی زمین لرزه شامل حداکثر بزرگی منطقه‌ای M_{max} ، نرخ فعالیت X و پارامتر β گوتنبرگ- ریشتر، بر اساس روش (Kijko & Sellevoll 1992) محاسبه شده است. این روش، تکنیک‌هایی را برای شناسایی گپ‌های لرزه‌ای و دستکاری بزرگی زمین لرزه‌های مشکوک در اختیار قرار می‌دهد.

به‌طور کلی داده‌های مه‌لرزه‌ای قدیمی با خطای بسیار زیاد، به‌صورت رکوردهای تاریخی ثبت می‌شوند. در اغلب موارد توصیف میزان خسارات ناشی از زمین لرزه‌های تاریخی به‌صورت نادرست و همراه با سوء تفاهم‌های شخصی همراه می‌باشد (Ambraseys et al. 1983).

علاوه بر این، تبدیل اطلاعات مه‌لرزه‌ای به داده‌های دستگاهی و تغییر مشخصات سنسورهای لرزه‌ای در ایستگاه‌های مختلف نیز خطاهای سیستماتیک به محاسبات وارد می‌کند (Chung & Bernreuter 1981).

۶- فرسایش و در نتیجه ظاهر شدن مجموعه پورفیری و اکسیدی و شسته شدن سولفورهای نزدیک سطح زمین.

۷- فوران گدازه و تشکیل سنگ‌های آتشفشانی جوان‌تر از یک مرکز آتشفشانی در کوه امیرالمؤمنین (۴ کیلومتری شمال معدن سرچشمه) که یک قسمت یا تمامی مجموعه پورفیری را با برش‌های آتشفشانی، داسیتی و ایگنمریت می‌پوشاند.

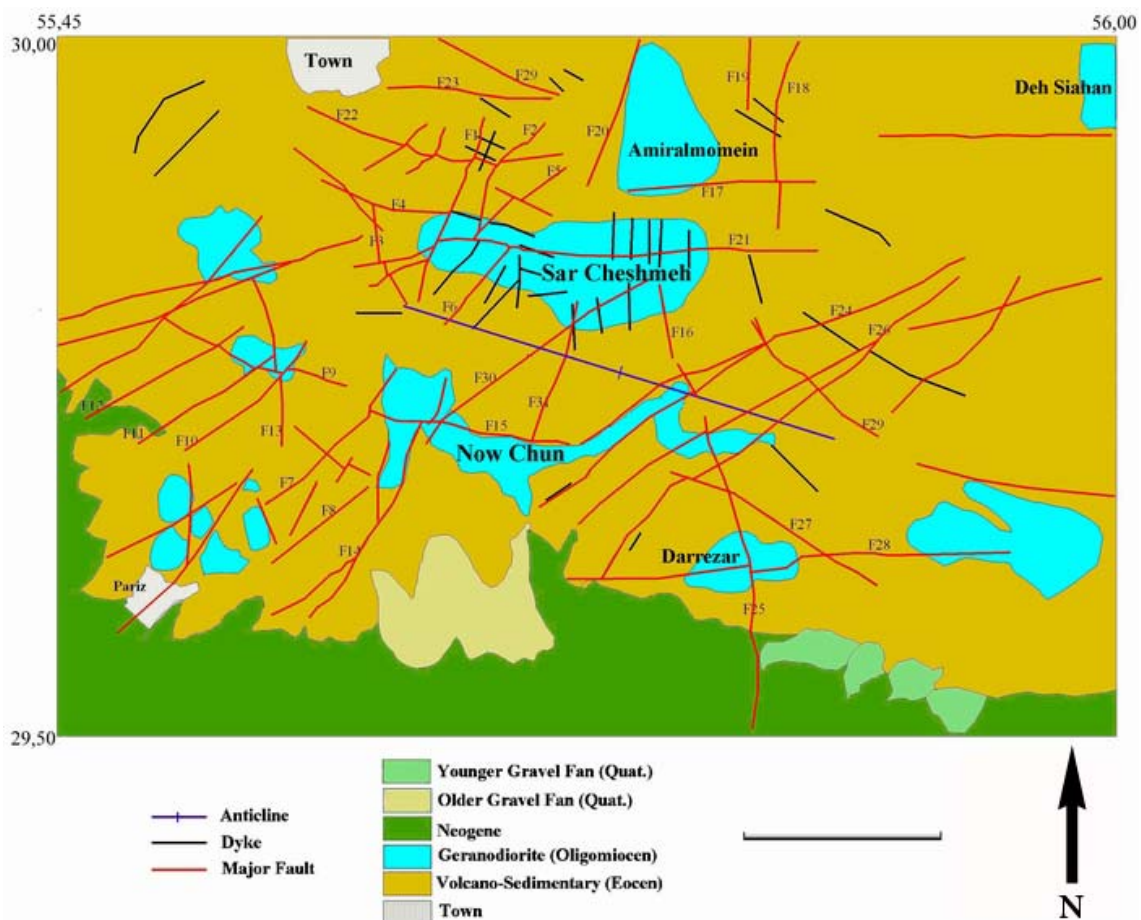
۸- رسوب کردن یک منطقه وسیع از سنگ‌های آهکی تراورتن به وسیله چشمه‌های آب گرم آتشفشانی.

۹- تشکیل پستی و بلندی‌های فعلی به وسیله ادامه فرسایش و تشکیل منطقه شسته‌شده با مقداری اکسیدهای مس و تشکیل منطقه ثانویه غنی شده (Dargahi et al. 2010).

۴- پتانسیل‌های لرزه‌خیزی

۴-۱- برآورد پارامترهای لرزه‌ای به روش Maximum Likelihood Estimation (MLE)

به منظور پی بردن به سرشت لرزه‌خیزی هر ایالت لرزه‌ای، بایستی پارامترهای لرزه‌خیزی آن ایالت را برآورد نمود.



تصویر ۴- نقشه زمین‌شناسی محدوده معدن مس سرچشمه

تخریب و ناپایداری سازه شود، بلکه عاملی محرک برای ایجاد اثرات جنبی مانند کوه لغزش، فرونشست و روانگرایی خاک می‌باشد. شدت اثر تخریبی تکان‌های زمین لرزه بستگی به ویژگی‌های سرچشمه‌ی آن از جمله بزرگی، چگونگی عملکرد نیروهای به‌وجودآورنده گسل و همچنین فاصله کانونی و همگرایی میرایی زمین (Attenuation) دارد. افزون بر این، داده‌های تجربی موجود نشان می‌دهد که رسوبات روی زمین و نوع پی‌سنگ، اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش و یا کاهش میزان تخریب دارند. جهت طراحی سازه‌های ویژه و پراهمیت، تحلیل رفتار پویا (dynamic response) و شبه ایستایی (pseudo static) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، همگام با پیشرفت‌های دانش و فن مهندسی زلزله، تکنیک‌های جدید برای محاسبه پارامترهای لرزه‌ای، توسط مؤسسات تحقیقاتی و دولتی جهان پیشنهاد شده است. به‌طور کلی مبانی تئوری محاسبه احتمال رویداد زمین لرزه، بر این فرض استوار است که از یک سرچشمه‌ی لرزه‌ای، زمین لرزه‌ای با بزرگی M در فاصله‌ی R ، جایگاه سازه مورد نظر را تحت تأثیر قرار داده و این رویداد از دیدگاه آماری برابر با الگوی متغیر مستقل (Random variable) محسوب می‌شود.

در منطقه‌ی مورد مطالعه، پهنه‌ای به شعاع ۱۵۰ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این گستره، کلیه سرچشمه‌های لرزه‌ای موجود اعم از پهنه‌ای (area source) که با تجمع کانون زمین لرزه‌ها مشخص می‌گردد و یا سرچشمه‌های خطی (Line source) در پیوند با گسله‌های جنبنا شناسایی شده و توسط نرم افزار ساینزریسک تری (Seis RiskIII) مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. میزان شتاب گرانش افقی زمین معمولاً در دو حد با احتمال خطر ۶۴ درصد و ۱۰ درصد انتخاب می‌شود که حد اول سطح مبنای طراحی (DBL, Design Basis Level) و حد دوم سطح حداکثر طراحی (MDL, Maximum Design Level) نامیده می‌شود. بر پایه پیشنهادهای مهندسی تجربی، می‌توان سازه‌های معمولی را بر پایه احتمال رویداد زیادتر یعنی بیش از ۵۰ درصد خطر طراحی نمود و سپس با قبول امکان خسارت محدود، وضعیت پایداری عمومی سازه‌ها را در صورت رویداد بیشینه زمین لرزه ممکن (MCL, Maximum Credible Level) کنترل و پیش-بینی نمود.

در این مقاله، به منظور محاسبه شتاب گرانش افقی با عمرهای مفید متفاوت، از رابطه‌ی میرایی (Campbell & Bozorgnia 2003) استفاده گردید. لازم به ذکر است که رابطه‌ی میرایی کمپبل، بر اساس شتاب نگاشت‌های ثبت شده در شمال آمریکا و بعضی قسمت‌های جهان (از جمله زمین لرزه طبس و منجیل در ایران) ارائه شده است. نتیجه‌ی حاصل از محاسبه احتمال خطر زمین لرزه در محدوده‌ی مورد

به‌علاوه داده‌های دستگاهی به دو دسته تقسیم می‌شوند. نخست داده-های دستگاهی ناکامل شامل؛ زمین لرزه‌هایی که قبل از راه‌اندازی شبکه بین‌المللی لرزه‌شناسی (World Wide Network of Standard Seismograph Stations, WWNSS) ثبت شده و دوم داده‌های دستگاهی کامل که به‌صورت یک پرپود کوتاه مدت ۵۰ ساله پس از به-کارگیری شبکه بین‌المللی لرزه‌شناسی ثبت شده‌اند.

بنابراین کاتالوگ لرزه‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه با داده‌های مه‌لرزه‌ای ناقص و دستگاهی کامل، اطلاعاتی ناهمگن می‌باشند که مورد پردازش فنی قرار گرفته است.

در این مقاله برای محاسبه‌ی خطر سالیانه زمین لرزه و همچنین احتمالات رویداد، از مدل تصادفی (Stochastic Model) با توزیع پواسون (Poisson process) استفاده شده است (منظور مستقل بودن هر رویداد است). بدین منظور از روش‌های پیشنهادی (Kijko 2004) (Kijko & Sellevoll 1992) که از جمله کامل‌ترین روش‌ها برای برآورد پارامترهای لرزه‌ای می‌باشد استفاده شده است.

بنابراین به منظور تعیین بزرگی رویدادهای لرزه‌ای در شعاع ۱۵۰ کیلومتری منطقه‌ی مورد مطالعه، از مدل سافت باندرز (Soft Bounds Model) استفاده گردیده است. در این مدل، بر اساس نظریه‌ی (Tinti & Mulargia 1985) و به کمک بزرگی قابل مشاهده، خطای تصادفی و توزیع (Gaussian) با انحراف استاندارد داده‌های مورد بازسازی قرار گرفته است. به‌طور کلی انتخاب مدل، وابسته به اطلاعات ما از روش جمع‌آوری داده‌ها و تدارک کاتالوگ لرزه‌ای است. در این میان نظرات شخصی نیز تا حدودی بر نتایج حاصله تأثیر دارد. در نهایت کلیه‌ی پارامترهای لرزه‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه (شامل λ ، M_{max} ، β و مقدار b-value) به‌علاوه‌ی دوره‌ی بازگشت زمین‌لرزه‌ها با دوره‌های زمانی مختلف، بر اساس مدل کیجکو و سله‌ول (Kijko & Sellevoll 1992) به کمک نرم افزار ای-ای-اچ-پی (Estimation of Earthquake Hazard Parameters, EEHP) محاسبه شده است. بر اساس این محاسبات، در منطقه‌ی مورد مطالعه پارامترهای مورد نظر به شرح زیر (رابطه‌های ۱ و ۲) و دوره بازگشت رویداد زمین لرزه‌ها با بزرگی ۵، ۵/۵، ۶، به ترتیب برابر ۱۰، ۴۹ و ۲۳۳ سال می‌باشد.

$$\text{Beta} = 3.09 \pm 0.08 \quad (b = 1.31 \pm 0.04) \quad (1)$$

$$\text{Lambda} = 1025.91 \quad (2)$$

۴-۲- برآورد بیشینه شتاب گرانش افقی زمین

یکی از مهم‌ترین خطرهای زمین‌لرزه، ایجاد حرکت‌های شدید ناشی از گذر امواج الاستیک است که نه تنها می‌تواند به‌طور مستقیم سبب

مطالعه، با فرض عمر مفید ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله، به صورت جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، در طول عمر مفید ۵۰ ساله با احتمال رویداد ۶۴ درصد (زمین لرزه مبنای طرح، طراحی MDL)، شتاب گرانش افقی برابر $g/28$ است. در حالی که در طول عمر مفید ۵۰ ساله و با احتمال رویداد ۱۰ درصد (سطح حداکثر طراحی MDL)، شتاب گرانش افقی برابر $g/28$ است.

جدول ۱- پیشینه شتاب گرانش افقی زمین در محدوده‌ی معدن مس سرچشمه به روش محاسبه احتمالات (برحسب درصد g)

زمین لرزه مبنای طرح (DBL) با ۶۴ درصد احتمال رویداد						
پیشینه زمین لرزه ممکن (MDL) با ۱۰ درصد احتمال رویداد						
دوره زمانی مورد ارزیابی	۲۰ سال	۵۰ سال	۱۰۰ سال	۲۰ سال	۵۰ سال	۱۰۰ سال
پیشینه شتاب گرانش افقی	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۲۹

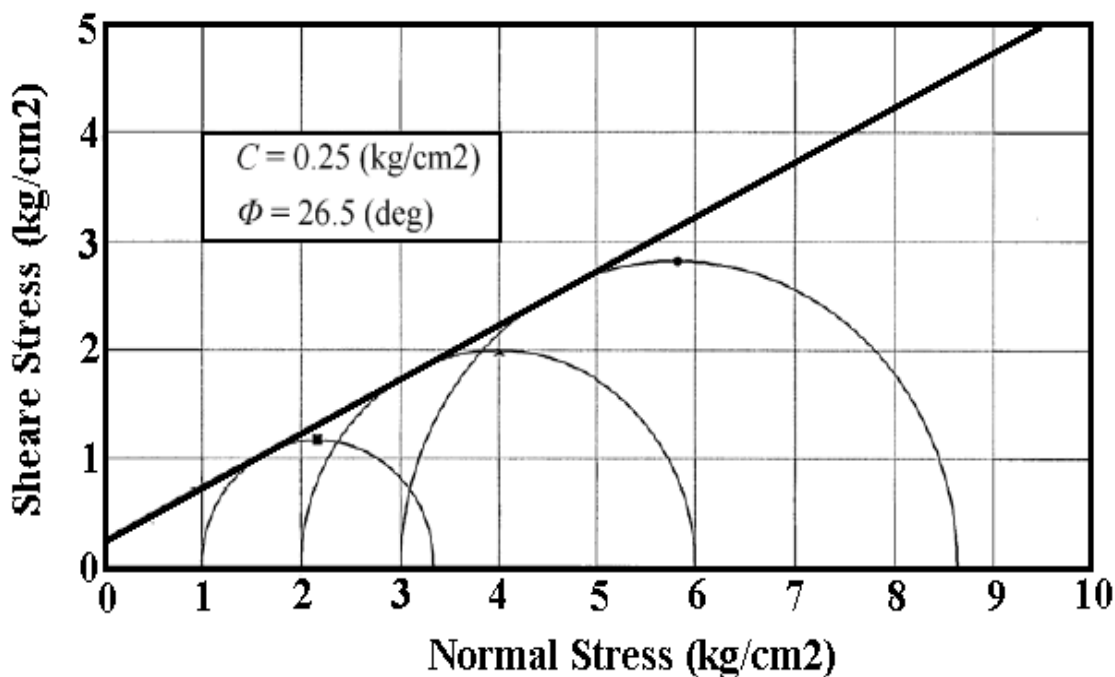
۵- خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها در دیواره غربی معدن

نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌های به دست آمده از دیواره غربی معدن مس سرچشمه، حکایت از آن دارد که میانگین دانسیته سنگ در حالت خشک و اشباع به ترتیب برابر $2/60$ و $2/62$ می‌باشد. به‌علاوه بر اساس آزمایش‌های برش مستقیم، میانگین زاویه اصطکاک داخلی Φ برابر ۳۱ درجه و مقدار چسبندگی C برابر ۷۱ کیلونیوتن بر سانتی‌متر مربع است. نتایج حاصل از آزمایش‌های سه محوری نیز دلالت بر آن دارد که میانگین چسبندگی C برابر ۲۶ کیلونیوتن بر سانتی‌متر مربع و زاویه اصطکاک داخلی Φ برابر ۲۷ درجه می‌باشد (تصویر ۵). بر اساس طبقه بندی اصلاح شده پنبوسکی

(RMR)، سنگ استوک و دایک‌های دیواره‌های غربی معدن مس سرچشمه با کسب ۴۷ امتیاز در کلاس ۳ و جزء سنگ‌های نسبتاً خوب قرار می‌گیرد. بنابراین ضریب چسبندگی C بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوپاسکال و مقدار زاویه اصطکاک داخلی Φ برای کل توده سنگ ۲۵ تا ۳۵ درجه خواهد بود.

۶- خصوصیات فیزیکی شکستگی‌ها

به منظور مطالعه سیستم شکستگی‌های موجود در دیواره غربی معدن مس سرچشمه، ۲۷۰ سطح شکستگی در ۸ ایستگاه مورد اندازه قرار گرفت. ایستگاه‌های مورد نظر بر روی سه واحد سنگی با جنس



تصویر ۵- نمودار دایر موهر و پوش گسیختگی آزمایش سه محوری در حالت خشک (دیواره غربی).

که شامل مشخصات فیزیکی ۲۷۰ مورد شکستگی می‌باشد، دسته‌بندی شده است (جدول ۳).

۷- آنالیز لغزش

اطلاعات مربوط به شکستگی‌های منتخب اندازه‌گیری شده در دیواره غربی معدن، در جداول شماره ۲ و ۳ نمایش داده شده است. در این جدول کلیه مشخصات شکستگی‌ها از جمله وضعیت هندسی، طول، تداوم، بازشدگی، پرشدگی، زبری، سختی، پیوستگی و ... مشخص شده است. این خصوصیات کمک می‌کند علاوه بر دسته‌بندی شکستگی‌ها ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها، پتانسیل لغزش‌های صفحه‌ای، گوه‌ای و لغزش‌های دایره‌ای در شرایط متفاوت از نظر شیب توپوگرافی در شرایط بارگذاری لرزه‌ای ارزیابی گردد. به‌علاوه آنالیز پایداری به کمک استریونت اجازه می‌دهد، توده سنگ بصورت سه بعدی مورد ارزیابی قرار گیرد. این توانایی امکان شناسایی جهت یافتگی‌های نامطلوب را در یک دامنه سنگی فراهم نموده و شناسایی هندسه لغزش را ممکن می‌سازد. غالباً آنالیزهای استریونت، مربوط به آنالیزهای جنبش سنجی (Kinematic) می‌باشد. جنبش سنجی، شاخه‌ای از دینامیک است که حرکات یا پتانسیل حرکت را در توده سنگ، با در نظر گرفتن نیروها بررسی می‌کند. بدین ترتیب به کمک استریونت پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای، گوه‌ای یا تاپلینگ (Toppling)، در سبک جنبش سنجی قابل شناسایی است (Hagan & Bulow 2000).

آندزیت، گرانودیوریت و دایک‌های هورنبلند پورفیری انتخاب شده، به گونه‌ای که در یک توزیع همگن، شرایط شکستگی‌ها در بخش‌های مختلف، دیواره غربی معدن را به خوبی نمایان کند. داده‌های اندازه‌گیری شده بر روی ۸ ایستگاه، پس از پیاده شدن بر روی شبکه‌ی استریونت تجزیه تحلیل شده (تصویر ۶) و سپس برای هر یک از دسته درزه‌های موجود در سنگ، یک مشخصات هندسی منتخب در نظر گرفته شد. بر اساس این روش، در هر یک از ایستگاه‌های مورد نظر، ۵ دسته درزه منتخب شناسایی شد (جدول ۲).

به منظور شناسایی دقیق وضعیت شکستگی‌ها در دیواره غربی معدن مس سرچشمه، ضرورت انجام نقشه‌برداری آن‌ها وجود داشت. در روش نقشه‌برداری شکستگی‌ها، بصورت سیستماتیک کلیه مشخصات شکستگی‌ها از جمله فاصله، طول، بازشدگی، پرشدگی و ... در یک توده سنگ ثبت می‌گردد. هرچند درزه‌نگاری بطور عمومی روشی معمول دارد اما اختلافات زیادی در فلسفه و روش‌های برداشت و تفسیر داده‌ها وجود دارد.

در این پژوهش، نقشه‌برداری شکستگی‌ها به دلیل شیب زیاد دیواره‌ی سنگی با دشواری‌های زیاد همراه بود، اما برداشت شکستگی‌ها در ۸ ایستگاه مورد نظر به دو روش پنجره‌ای و خطی (Line mapping & Window mapping) صورت گرفت.

در طی عملیات درزه‌نگاری، کلیه مشخصات مورد نیاز از جمله طول، فاصله، بازشدگی، پرشدگی، زبری، هوازدگی، پیوستگی و نشت آب در سطح شکستگی‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت داده‌های به دست آمده

جدول ۲- مشخصات هندسی سطوح شکستگی منتخب بر روی دیواره غربی معدن.

مشخصات هندسی سطوح شکستگی منتخب						
ایستگاه	واحد سنگی	دسته درزه ۱	دسته درزه ۲	دسته درزه ۳	دسته درزه ۴	دسته درزه ۵
۱	آندزیت	۱۲۵/۴۸	۳۴۷/۵۷	۲۹۰/۵۰	۵۰/۵۵	۱۶۷/۸۶
۲	آندزیت	۱۲۷/۵۰	۳۴۵/۶۰	۲۹۵/۵۷	۵۳/۶۳	۱۵۸/۸۰
۳	گرانودیوریت	۱۲۷/۵۰	۳۴۵/۶۰	۲۸۷/۵۳	۵۵/۶۶	۱۶۳/۷۵
۴	گرانودیوریت	۱۳۵/۵۴	۳۳۶/۵۴	۲۹۰/۴۸	۴۲/۶۷	۱۶۰/۷۷
۵	گرانودیوریت	۱۳۷/۴۷	۳۳۵/۶۵	۲۹۸/۴۵	۵۰/۵۴	۱۶۵/۸۵
۶	گرانودیوریت	۱۲۴/۵۵	۳۴۰/۶۰	۲۸۲/۵۰	۴۸/۶۳	۱۵۵/۸۰
۷	دایک	۱۲۰/۶۰	۲۷۴/۸۰	۲۹۵/۵۶	۵۷/۶۷	۱۵۹/۸۳
۸	دایک	۱۲۰/۵۹	۲۶۵/۸۴	۲۸۶/۵۰	۶۰/۵۴	۱۶۰/۷۹

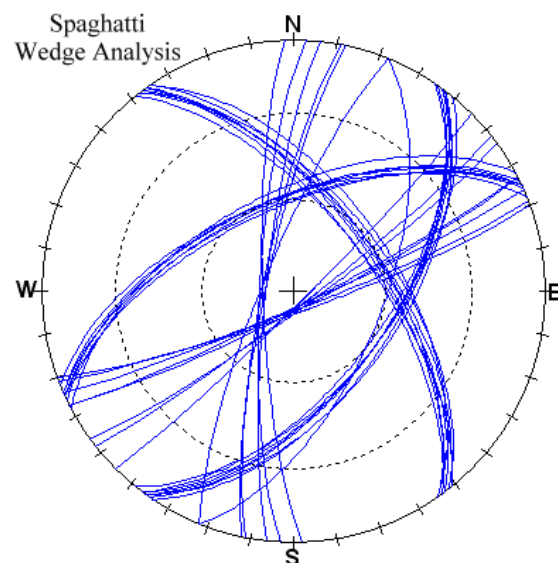
جدول ۳- خصوصیات فیزیکی شکستگی‌ها در دیواره غربی معدن مس سرچشمه.

مشخصات متوسط هر دسته درزه							
نام دسته درزه	طول (m)	فاصله (cm)	بازشدگی (mm)	پرشدگی	زبری	هوازدگی پیوستگی (درصد) نشت آب	
دسته درزه ۱	۲۰ - ۳	۱۵۰ - ۶۰	۲ - ۱	خاک	زبر	زیاد	۱۰۰ خشک
دسته درزه ۲	۳۰ - ۲۰	۳۰ - ۱۵۰	ندارد	ندارد	صاف	زیاد	۹۵ خشک
دسته درزه ۳	۲۰ - ۱۵	۱۰۰ - ۷۰	ندارد	ندارد	صاف	کم	۹۵ خشک
دسته درزه ۴	۱۰ - ۱	۶۰ - ۵۰	۱۵ - ۵	ندارد	زبر	بسیار کم	۱۰۰ خشک
دسته درزه ۵	۲۰ - ۱	۳۰۰ - ۶۰	۲۰ - ۳	ندارد	زبر	کم	۱۰۰ خشک

۸ ایستگاه
دیواره غربی

ناپایداری هر یک از بلوک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است (Roberds & Leroi 2002). نرم افزار راک‌پک ۳ (Rockpack III)، امکانات لازم برای انجام آنالیزهای فوق را فراهم می‌کند. بنابراین کلیه آنالیزهای این بخش به کمک این نرم افزار انجام گردیده است. هرچند در این آنالیز فرض بر آن است که همه ناپیوستگی‌ها به یکدیگر متصل هستند، اما در عمل چنین شرایطی حاکم نیست. حتی سالم بودن درصد کمی از سنگ در طول ناپیوستگی احتمال گسیختگی در راستای یک ناپیوستگی را به شدت کاهش می‌دهد (کنگی و همکاران ۱۳۸۸).

در مرحله نخست اطلاعات جدول ۲ به نرم افزار وارد شده و بر اساس روش مارکلند ۵ دسته ناپیوستگی اصلی شناسایی شده است. با در نظر گرفتن زاویه اصطکاک و رویه سنگی در دیواره غربی معدن، منطقه بحرانی ترسیم شده و موقعیت خط بزرگ‌ترین شیب شکستگی‌های شماره ۱ با مشخصات هندسی ۱۳۰/۵۰ نسبت به این منطقه نمایش داده شده است (تصویر ۷). تحلیل دیگرام‌های مورد نظر بیانگر آن است که در این سطح شکستگی، توانایی لغزش‌های صفحه‌ای با شکستگی‌های کششی وجود دارد (تصویر ۸). بدین ترتیب دیواره غربی معدن مس سرچشمه تا شیب ۶۰ درجه و ضریب ایمنی ۱/۳۲، بدون بارگذاری لرزه‌ای پایدار است (جدول ۴). اما در صورت رویداد زمین لرزه با شتاب افقی ۰/۲۴g، دیواره غربی معدن با شیب بیش از ۵۰ درجه ناپایدار شده و لغزش‌های صفحه‌ای با درزه‌های کششی رخ خواهد داد.



تصویر ۶- موقعیت سطوح شکستگی‌ها در مدل ماکارانی (دیواره غربی معدن - ایستگاه شماره ۴).

۷-۱- لغزش صفحه‌ای

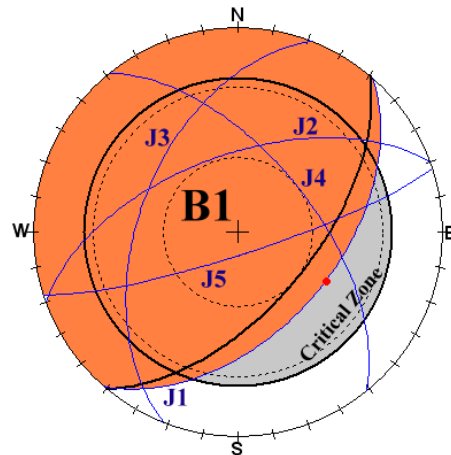
در این بخش، آنالیز جنبش سنجی بر اساس تئوری مارکلند (Markland) و با فرض گسیختگی صفحه‌ای بطرف پایین انجام گردید. بدون شک تست مارکلند، ابزار با ارزشی برای شناسایی ناپیوستگی‌های مؤثر در گسیختگی صفحه‌ای و حذف ناپیوستگی‌های غیر مؤثر از فرایند بررسی می‌باشد (Hoek & Diederichs 2006). به علاوه در شرایط متفاوت با در نظر گرفتن زاویه اصطکاک و مختصات رویه سنگی (Slope Face) منطقه بحرانی مشخص گردیده و پتانسیل

جدول ۴- برآورد میزان ضریب ایمنی دیواره غربی معدن تحت تأثیر لغزش صفحه‌ای با گسیختگی‌های کششی

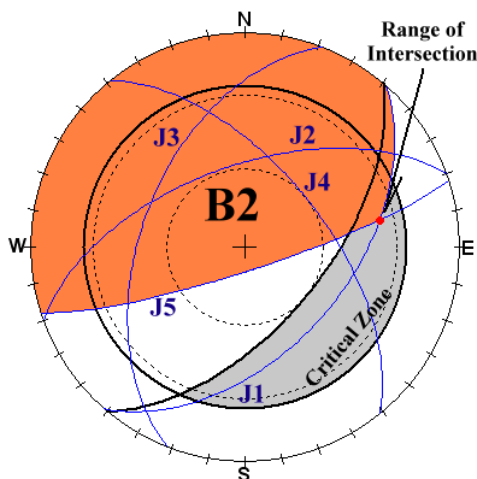
ضریب ایمنی					
شیب ۷۰ درجه	شیب ۶۵ درجه	شیب ۶۰ درجه	شیب ۵۵ درجه	شیب ۵۰ درجه	
۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۳۲	۱/۵۱	۱/۸۹	بدون بارگذاری لرزه‌ای
۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۹۴	۱/۰۹	۱/۳۸	شتاب افقی ۰/۲۴g
۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۸۹	۱/۰۴	۱/۳۲	شتاب افقی ۰/۲۸g

۳-۷- لغزش با سطح برش دایره‌ای ساده

آنالیز پایداری عددی با سطح برش دایره‌ای، برای نخستین بار در سال ۱۹۱۶ میلادی مطرح و در سال ۱۹۵۵ توسط پیترسون جهت پایداری دیوارهای سواحل گوتنبرگ مورد استفاده قرار گرفته است (Krahn 2003). در طی چند دهه اخیر روش آنالیز پایداری دامنه‌ها توسط فلینیوس (Fellenius 1936)، جانبو (Janbu 1954)، بیشاپ (Bishop 1955)، مورگنسترن و پرایس (Morgenstern & Price 1965) و اسپنسر (Spencer 1967) اصلاح گردید. به‌علاوه در چهار دهه گذشته بر اساس تحلیل تعادل حدی (Limiting equilibrium) و با استفاده از روش قطعات (Methods of slices) گام‌های مؤثری در جهت آنالیز پایداری دامنه‌ها برداشته شده است.



تصویر ۷- پتانسیل لغزش صفحه‌ای همراه با شکستگی‌های کششی به موازات شکستگی‌های شماره ۱ (دیواره غربی معدن)

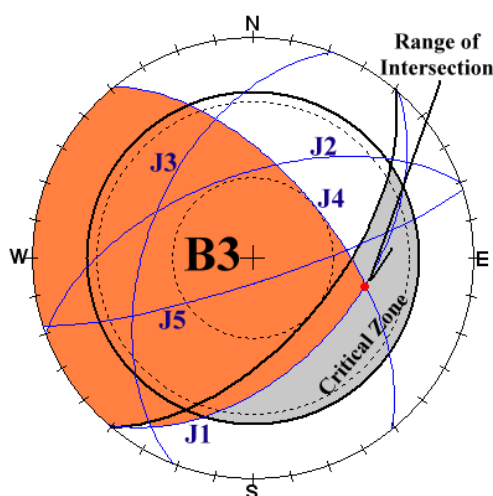


تصویر ۸- پتانسیل لغزش صفحه‌ای در دیواره غربی معدن

تصویر ۹- پتانسیل لغزش گوه‌ای بلوک B2 در راستای شکستگی‌های J1 و J5 در دیواره غربی معدن

۲-۷- آنالیز لغزش گوه‌ای

گسیختگی‌های گوه‌ای در مقایسه با لغزش‌های صفحه‌ای، در شرایط متنوع‌تر از نظر زمین‌شناسی و هندسی ایجاد می‌شوند (Hoek & Bray 2005). بنابراین مطالعه پایدار دامنه‌های سنگی از دیدگاه لغزش‌های گوه‌ای دارای اهمیت ویژه‌ای است. بدین منظور پس از آنالیزهای استریوگرافیک، بلوک‌های دارای پتانسیل لغزش گوه‌ای شناسایی می‌گردد. سپس با استفاده از شرایط توپوگرافی، مشخصات هندسی شکستگی‌ها، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ و بارگذاری جانبی از جمله بارهای لرزه‌ای و فاکتور ایمنی هر گوه سنگی محاسبه می‌گردد (Krahn 2003). نتایج حاصل از مطالعات انجام شده بر روی دیواره غربی معدن مس سرچشمه دلالت بر آن دارد که تقاطع سطوح شکستگی‌ها در این توده سنگی، بلوک‌های گوه‌ای شکل متعددی را ایجاد نموده که تنها دو بلوک B2 و B3 دارای پتانسیل لغزش می‌باشند (تصاویر ۹ و ۱۰). بر اساس مدل‌های هندسی، لغزش این بلوک‌های سنگی به موازات خط فصل مشترک سطوح شکستگی صورت می‌گیرد.



تصویر ۱۰- پتانسیل لغزش گوه‌ای بلوک B3 در راستای شکستگی‌های J1 و J4 در دیواره غربی معدن

ضریب ایمنی خروجی حاصل از روش تعادل گشتاوری انجام می‌شود. بدین ترتیب داده‌های مربوط به ساختارها و گمانه‌ها و در موارد ممکن مطابق با گمانه‌های ژئوتکنیکی (به عنوان دقیق‌ترین اطلاعات ژئوتکنیکی موجود)، مقاطع عرضی منتخب به عنوان معرف هر یک از حوزه‌ها تهیه می‌گردد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز برای واحدهای مختلف از مقادیر میانگین ویژگی مواد تعیین شده می‌باشد.

۷-۳-۲- پتانسیل لغزش دایره‌ای در دیواره غربی معدن

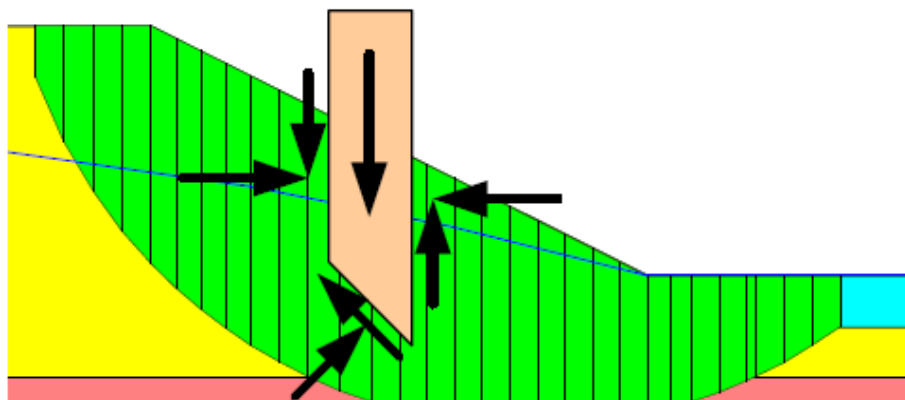
آنالیز پایداری واریزه‌ها و بخش‌های به شدت خرد شده دیواره غربی معدن مس سرچشمه، براساس روش مورگنستر- پرایس (تابع نیمه سینوسی Half-sine function) انجام شده است. این روش، بر اساس دو فاکتور اساسی معادله ایمنی و محدوده نیروهای برشی/ نرمال داخل قطعات لغزشی پایه گذاری شده است. به علاوه در این آنالیز سطح لغزش دایره‌ای ساده مرتبط با λ vs FS، با فرض تعادل لنگرهای مستقل در داخل قطعه برشی می‌باشد. بر این اساس توده لغزشی همانند یک جسم آزاد در طی لغزش چرخش می‌نماید.

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌ها شامل دانسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک، به عنوان خصوصیات خاک و سنگ‌های خرد شده بخش غربی معدن استفاده شده و توسط نرم افزار اسلاید مورد آنالیز قرار گرفته است. نتایج آنالیز نشان می‌دهد دامنه‌های مورد نظر با شیب ۳۵ درجه، در حالت خشک و بدون بارگذاری لرزه‌ای پایدار هستند. اما بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی $0.24g$ ، در همین شرایط، ضریب ایمنی را تا ۰.۸۹ کاهش داده و سبب ناپایداری دامنه‌ها خواهد شد (تصویر ۱۲ و ۱۳). به علاوه افزایش شیب دامنه نیز ناپایداری دیواره غربی معدن را سبب خواهد شد. بر این اساس تغییرات ضریب ایمنی با افزایش شیب و تحت تأثیر بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی $0.24g$ و $0.28g$ ، مورد محاسبه قرار گرفته است (جدول ۵).

در این تحقیقات معمولاً از روش جستجوی شبکه‌ای (Grid search) و جستجوی نمونه (Pattern search) برای یافتن سطح بحرانی شکست استفاده می‌شود. ظهور کامپیوتر در سال ۱۹۶۰، امکان انجام آنالیزهای پیچیده ریاضی و تکرار توابع ریاضی دشوار را فراهم نمود. بنابراین نرم افزارهای متعددی جهت آنالیز پایداری دامنه‌ها تهیه شده، که در این مطالعات از نرم افزار اسلاید (Slide) استفاده شده است. در این بخش از گزارش، واریزه‌های دامنه غربی معدن مس سرچشمه توسط نرم‌افزار اسلاید مورد تجزیه تحلیل قرار گرفته است.

۷-۳-۱- روش تحلیل

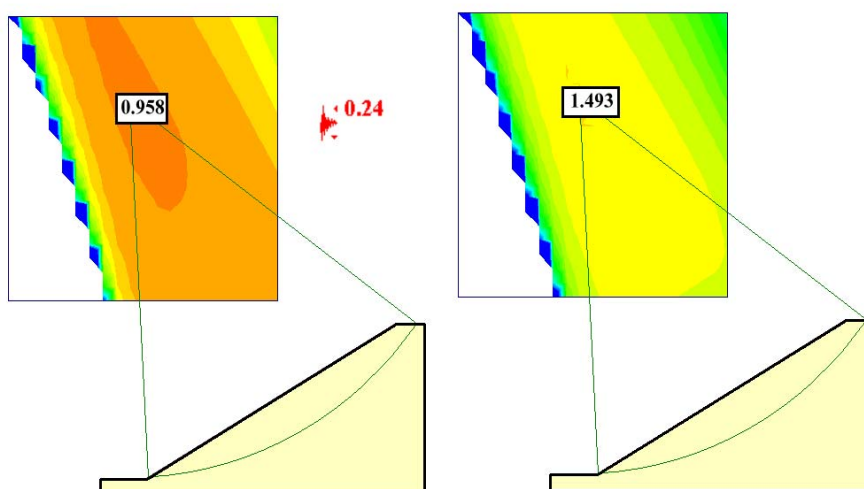
در روش‌های آنالیز پایداری دامنه‌ها، یافتن سطح بحرانی شکست با پیشرفت محاسبات و عملیات جستجو انتخاب می‌گردد. به علاوه روش‌های ترکیبی جستجوی تصادفی، براساس روش‌های مونت کارلو (Krahn 2003) ساختار ساده‌ای از جستجوی تصادفی و فنون بهینه‌سازی دارند (Krahn 2003). در این روش تعداد زیادی از سطوح احتمالی برای یافتن ضریب اطمینان کمینه تولید می‌شود. روش استاتیکی آنالیز پایداری، بر اساس رابطه نیروهای برشی و نرمال در هر یک از قطعات تحت لغزش مورد استفاده قرار می‌گیرد (تصویر ۱۱). تأثیر این نیروها بر قاعده قطعه برش خورده و پهلوهای آن مهم‌ترین پارامتر در پایداری و یا عدم پایداری توده می‌باشد. در روش‌های اولیه آنالیز پایداری به منظور ساده سازی و امکان محاسبه با دست، بسیاری از پارامترهای اساسی از جمله نیروهای درونی نادیده گرفته شده است. اما روش مورگنسترن و پرایس (Morgenstern & Price 1965) با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای تعیین کننده، امکان آنالیز پایداری را با کمترین خطای ممکن میسر ساخته است. در این مقاله تحلیل پایداری دامنه‌ها، با استفاده از نرم‌افزار اسلاید صورت گرفته است. این محاسبات بر اساس روش تعادل حدی و



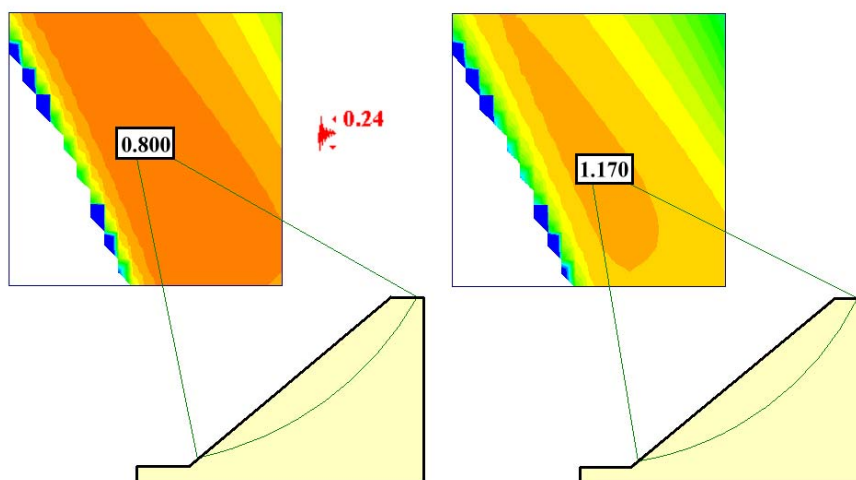
تصویر ۱۱- رابطه نیروهای برشی و نرمال بر یک قطعه لغزشی (Krahn 2003)

جدول ۵- مقایسه ضریب ایمنی با شرایط متفاوت در دیواره غربی معدن مس سرچشمه

ضریب ایمنی					
شیب ۶۰ درجه		شیب ۵۰ درجه		شیب ۴۰ درجه	
		شیب ۳۵ درجه		شیب ۳۰ درجه	
۰/۸۶		۰/۹۸		۱/۱۷	
۰/۶۲		۰/۸۰		۱/۳۶	
۰/۵۹		۰/۷۵		۰/۸۹	
				۱/۴۹	
				۰/۹۵	
				۰/۸۹	
				۲۴g	
				۲۸g	



تصویر ۱۲- مقایسه‌ی ضریب ایمنی لغزش دایره‌ای در واریزه‌ها و سنگ‌های خردشده دیواره غربی با شیب ۳۰ درجه، در شرایط طبیعی و تحت بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی ۲۴g.



تصویر ۱۳- مقایسه‌ی ضریب ایمنی لغزش دایره‌ای در واریزه‌ها و سنگ‌های خردشده دیواره غربی با شیب ۴۰ درجه در شرایط طبیعی و تحت بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی ۲۴g.

۸- نتیجه‌گیری

دیواره غربی معدن مس سرچشمه در مقایسه با سایر بخش‌های معدن، دارای بیشترین پتانسیل لغزش می‌باشد. نفوذ دایک‌های گرانودیوریتی با راستای شمالی جنوبی که رفتار ژئومکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار داده، یکی از عوامل افزایش پتانسیل ناپایداری در بخش غربی معدن است. همچنین حضور ۵ دسته شکستگی منتخب در توده سنگ، بلوک‌های صفحه‌ای و گوه‌ای متعددی را ایجاد نموده که برخی از آن‌ها در شرایط خاص، پتانسیل ناپایدار دارند. نتایج آنالیزهای لرزه‌ای براساس مدل کیچکو، دوره بازگشت رویداد زمین‌لرزه در منطقه مورد مطالعه را برای زمین لرزه‌ای به بزرگی ۶ ریشتر، ۲۳۳ سال ارزیابی نموده است.

به‌علاوه برآورد پارامترهای لرزه‌ای به روش کمپیل در محدوده معدن مس سرچشمه، حکایت از آن دارد که با عمر مفید ۵۰ ساله و احتمال رویداد ۶۴ درصد زمین لرزه مبنای طرح (DBL)، شتاب گرانش افقی برابر ۰.۲۴g خواهد بود. در حالی که با عمر مفید ۵۰ ساله و احتمال رویداد ۱۰ درصد سطح حداکثر طراحی (MDL)، شتاب گرانش افقی برابر ۰.۲۸g می‌باشد. نتایج آنالیز پایداری بلوک‌های سنگی به‌صورت صفحه‌ای و گوه‌ای، دلالت بر آن دارد که دیواره غربی معدن به‌دلیل وضعیت خاص سیستم شکستگی‌ها نسبت به سطح سنگ‌برداری، دارای پتانسیل لغزش می‌باشد. بر این اساس دیواره غربی معدن تا شیب ۶۰ درجه، بدون بارگذاری لرزه‌ای در برابر لغزش‌های صفحه‌ای، پایدار است. اما در صورت رویداد زمین لرزه با شتاب افقی ۰.۲۴g، دامنه‌های با شیب بیش از ۵۰ درجه ناپایدار شده و توده‌های سنگی به‌صورت صفحه‌ای با درزه‌های کششی لغزش می‌نمایند. به‌علاوه از مجموع بلوک‌های سنگی متعدد شناسایی شده، تنها بلوک‌های B2 و B3 دارای پتانسیل لغزش بوده و در شرایط ناپایدار قرار دارند.

آنالیزهای انجام شده بر روی بخش‌های واریزه‌ای و زون‌های خرد شده دیواره غربی معدن، حکایت از آن دارد که این بخش‌ها با شیب ۳۵ درجه در حالت خشک و بدون بارگذاری لرزه‌ای، پایدار هستند. اما بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی ۰.۲۴g، در همین شرایط ضریب ایمنی را تا ۰.۸۹ کاهش داده و سبب ناپایداری دامنه‌ها خواهد شد. بنابراین واریزه‌های با شیب بیش از ۲۰ درجه که بخش محدودی از دیواره غربی را تشکیل داده‌اند، در شرایط ناپایدار قرار می‌گیرند.

مراجع

کنگی، ع.، رهنماری، ج. و سعادت‌خواه، ن. و روحانی، ع.، ۱۳۸۸، "ناپایداری دامنه‌های رودخانه رجدون تحت تأثیر بارگذاری لرزه‌ای (شمال گناوه)"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۵ (۳): ۲۵۲-۲۴۰.

Ahmadzadeh, G., Jahangiri, A., Lentz, D. & Mojtabedi, M., 2010, "Petrogenesis of Plio-Quaternary post-collisional ultrapotassic volcanism in NW of Marand, NW Iran", *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 39 (1-2): 37-50.

Alavi, M., 1994, "Tectonics of Zagros Orogenic belt of Iran, new data and interpretation", *Tectonophysics*, Vol. 229: 211-238.

Alavi, M., 2004, "Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland Evolution", *American Journal of Science*, Vol. 304: 1-20.

Ambraseys, N., Banda, E., Irving, J., Mallard, S., Melville, C., Morse, T., Muir Wood, R., Mundoz, D., Serva, L., Shilston, D. & Vogt, J., 1983, "Notes on historical seismicity", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73: 1917-1920.

Azizi, H., & Moinevaziri, H., 2009, "Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran", *Journal of Geodynamics*, Vol. 47 (4): 167-179.

Berberian, M. & King, G. C. P., 1981, "Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Science*, Vol. 18: 210-265.

Bishop, A. W., 1955, "The use of the slope circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, Vol. 5: 7-17.

Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y., 2003, "Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra", *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 93: 314-331.

Dargahi, S., Arvin, M., Pan, Y. & Babaei A., 2010, "Petrogenesis of post-collisional A-type granitoids from the Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, Southwestern Kerman, Iran: Constraints on the Arabian-Eurasian continental collision", *Lithos*, Vol. 115 (1-4): 190-204.

Chung, D. H. & Bernreuter, D. L., 1981, "Regional relationships among earthquake magnitude scales", *Rev. Geophys. Space Phys.* Vol. 19: 649-663.

Fellenius, W., 1936, "Calculation of the Stability of Earth Dams", *Proceedings of the Second Congress of Large Dams*, Vol. 4: 445-462.

Ghasemi, A., Haji Hosseini, A. & Hosseini, M., 2005, "Geological Map of Chadegan (scale 1: 100,000)", *Geological Survey of Iran*.

Ghasemi, A. & Talbot, C. J., 2006, "A new tectonic scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 26: 683-693.

Hagan, T. N. & Bulow, B., 2000, "Blast designs to protect pit walls. *Slope Stability in Surface Mining*", *Soc. Min. Metallurgy and Exploration*, Denver: 125-130.

Hessami, K., Koyi, H. A., Talbot, C. J., Tabasi, H. & Shabaniyan, E., 2001, "Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros mountains", *Journal of Geological Society of London*, Vol. 158: 969-981.

- M.P., Ries, A.C. (Eds.), The Geology and Tectonics of the Oman region". *Geological Society of London, Special Publication, Vol. 49: 797–831.*
- Shafiei, B., 2010,** "Lead isotope signatures of the igneous rocks and porphyry copper deposits from the Kerman Cenozoic magmatic arc (SE Iran), and their magmatic - metallogenetic implications", *Ore Geology Reviews, Vol. 38 (1-2): 27-36.*
- Shahabpour, J., 2005,** "Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Neyriz", *Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 24 (4): 405-417.*
- Spencer, E., 1967,** "A Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Interstices Forces", *Geotechnique, Vol. 17 (1): 11-26.*
- Tinti, S. & Mulargia, F., 1985,** "Effects of magnitude uncertainties on estimating the parameters in the Gutenberg-Richter frequency-magnitude law", *Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 75: 1681-1697.*
- Ward, S. N., 1997,** "More on Mmax", *Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 87: 1199–1208.*
- Wrobel-Daveau, J. C., Ringenbach, J.C., Saeid Tavakoli, S., Ruiz, G. M. H., Masse, P. & Frizon de Lamotte, D., 2010,** "Evidence for mantle exhumation along the Arabian margin in the Zagros (Kermanshah area, Iran)", *Arabian Journal of Geosciences, Vol. 3:499–513.*
- Hoek, E. & Bray, J., 2005,** "Rock slope engineering (4th edition)", *Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah, p. 431.*
- Hoek, E. & Diederichs, M. S., 2006,** "Empirical estimation of rock mass modulus", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 43 (2): 203–215.*
- Hooper, R. J., Baron, I. R., Agah, S. & Hatcher, R. D., Jr., 1994,** "The Cenomanian to recent development of the southern Tethyan margin in Iran", *The Middle East Petroleum Geoscience (GEO'94), Vol. 2: 505–516.*
- Janbu, N., 1954,** "Applications of composite slip surfaces for stability analysis", *In Proceedings of the European Conference on the Stability of Earth Slopes, Stockholm, Vol. 3: 39-43.*
- Kangi, A. & Heidari, N., 2008,** "Reservoir-induced Seismicity in Karun III Dam (Southwestern Iran)", *Journal of Seismology, Vol. 12 (4): 350-361.*
- Kangi, A., Aryaei, A. A. & Maasoomi, A., 2010,** "Synsedimentary Deformations in Member 2 of the Mila Formation in the Central Alborz Mountains, Northern Iran", *Arabian Journal of Geosciences, Vol. 3 (2), 33-39.*
- Kijko, A., & Sellevoll, M. A., 1989,** "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files, Part I, Utilization of Extreme and Complete Catalogues with Different Threshold Magnitudes", *Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 79:645–654.*
- Kijko, A. & Sellevoll, M. A., 1992,** "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part II, Incorporation of Magnitude Heterogeneity", *Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 82: 120–134.*
- Kijko, A., 2004,** "Estimation of the maximum earthquake magnitude, Mmax", *pure & applied geophysics PAGEOPH, Vol. 161 (8): 1655-1681.*
- Krahn, J., 2003,** "The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses", *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40 (3): 643–660.*
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben Sari, D., & Tealeb, A., 2003,** "GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions", *Geophysical Journal International, Vol. 155: 126–138.*
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E., 1965,** "The analysis of the stability of general slip surfaces", *Geotechnique, Vol. 15: 79-93.*
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. & Jolivet, L., 2009,** "Reply to: Comment by Aftabi and Atapour on «Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences », *Vol. 113 (3-4): 847-849.*
- Roberds, W. J., & Leroi, E., 2002,** "Quantitative risk assessment of landslides", *Transportation Research Record 1786, Paper No. 02-3900, pp. 69–75, Transportation Research Board, Washington, DC*
- Sengor, A. M. C., 1990,** "A new model for the Late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman. In: Robertson, A.H.F., Searle,