



## ناپایداری دامنه‌های رودخانه‌ی رجدون تمت تأثیر بارگذاری لرزه‌ای (شمال گناوه)

عباس کنگی<sup>۱\*</sup>، جعفر رهنمازاد<sup>۲\*</sup>، نادر سعادت فراه<sup>۳</sup>، علی رومانی<sup>۴</sup>

۱) گروه زمین شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود kangiabas@hotmail.com  
۲) گروه زمین شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زاهدان jrahnama@appliedgeology.ir  
۳) عهده داران مکاتبات

### مکیده:

دامنه‌های حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون در شمال شهرستان گناوه از لحاظ لغزش، پتانسیل بالایی دارد. رویداد زمین لرزه‌های نیرومند، این پتانسیل ناپایداری را به شدت افزایش می‌دهد. نهشته‌های پایین دست رودخانه که بیشتر از سیلتستون تشکیل شده‌اند، توانایی تولید لغزش‌های دایره‌ای و رسوبات بالا دست رودخانه که از مادستون ساخته شده‌اند، پتانسیل لغزش‌های صفحه‌ای-ستونی دارند. در چنین شرایطی رویداد زمین لرزه‌ای با شتاب افقی بیش از  $g/14$  در محدوده‌ی رودخانه‌ی رجدون، دامنه‌های با شیب بیش از ۲۰ درجه را ناپایدار می‌کند. چنین لغزش‌هایی سبب مسدود شدن مسیر جریان آب و در نتیجه تشکیل سدهای طبیعی در مسیر رودخانه می‌گردد. پی آمد این رویداد و شکسته شدن سدها، سبب تولید سیلاب‌های عظیم و در نتیجه تخریب بخش‌هایی از شهرستان گناوه را به همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: زمین لغزش، شتاب افقی، زمین لرزه، سد های طبیعی، شکسته شدن سد.

### ۱- مقدمه

ناپایداری دامنه‌های رودخانه‌ی رجدون تحت تأثیر رویداد زمین لرزه، شرایط بسیار پیچیده‌ای را به وجود خواهد آورد. به گونه‌ای که این لغزش‌های دامنه‌ای، با ایجاد سدهای طبیعی در مسیر رودخانه و شکسته شدن آنها پس از آگیری، پتانسیل تولید سیلاب‌های بسیار بزرگی را خواهد داشت. در این مقاله نخست پارامترهای لرزه‌ای مؤثر بر دامنه‌های رودخانه‌ی رجدون محاسبه گردیده، سپس با توجه به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی رسوبات حاشیه‌ی رودخانه، پتانسیل لغزش تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

منطقه‌ی مورد مطالعه در محدوده‌ی حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی دره گپ در جنوب غرب کمربند چین-تراست زاگرس و شمال استان بوشهر قرار دارد (تصویر ۱). رودخانه‌ی دره گپ از به هم پیوستن دو رودخانه‌ی گپ و رجدون حاصل گردیده است. این رودخانه با طول ۱۱۵/۶ کیلومتر از ارتفاعات شمال گناوه سرچشمه گرفته و به طرف خلیج فارس جریان دارد و در شرق شهرستان گناوه وارد خور گناوه می‌شود. رودخانه‌ی رجدون به عنوان یکی از سرشاخه‌های حوضه‌ی آبریز دره گپ در بخش جنوبی آن واقع گردیده است. با توجه به وضعیت اقلیمی و لیتولوژی سازنده‌های حوزه آبریز رودخانه‌ی رجدون و گپ، همه ساله جریان‌های سیلابی مخربی همراه با حجم زیادی از گل و لای به خور گناوه حمل شده و خسارات بسیاری ایجاد می‌کند. بنابراین بارش‌های تند و سیلابی در فصول بارانی همواره خطری جدی برای شهر گناوه و خورهای اطراف می‌باشد. در چنین شرایطی

### ۲- جایگاه تکتونیکی زاگرس

رشته کوه زاگرس با سلسله چین‌های تماشایی، یکی از کمربندهای چین-تراست بسیار زیبا در جهان است (Hessami et al. 2001). این کمربند کوهستانی مرز همگرا بین صفحه‌های عربستان و ایران مرکزی را در جنوب غرب ایران ساخته است. کمربند چین خورده‌ی ساده‌ی زاگرس با ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر پهنا، در سنوزوئیک فوقانی شکل گرفته

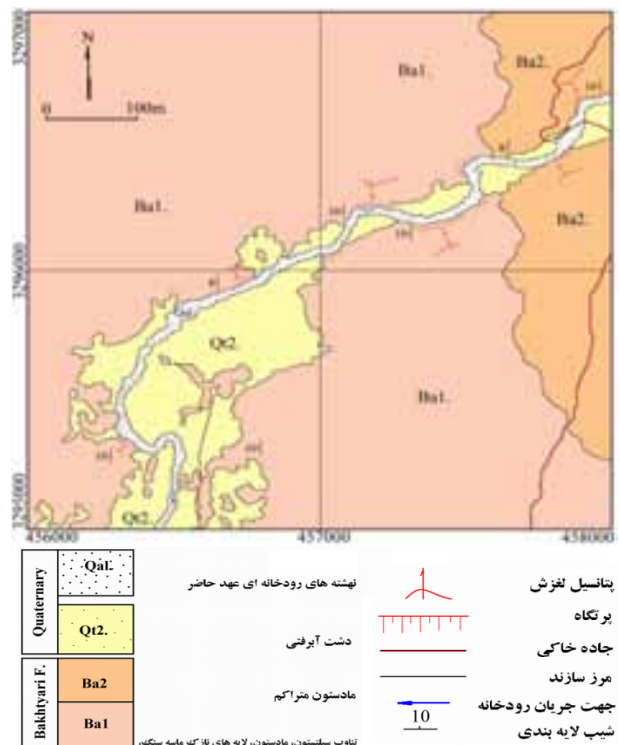




تصویر ۲- مورفولوژی سازند بختیاری در حاشیه رودخانه‌ی رجدون.

#### ۴- گسل‌های اصلی منطقه‌ی مورد مطالعه

فعالیت‌های لرزه‌ای کمربند چین-تراست زاگرس با وضعیت لرزه‌ای ایران مرکزی تفاوت آشکاری دارد. در پهنه‌ی زاگرس بخش قابل توجهی از گسل‌ها به دلیل عدم وجود رخنمون سطحی (گسل کور) قابل شناسایی نیستند (Letouzey & Berberian 1980, Sherkati 2004). اغلب زمین‌شناسان بر این عقیده‌اند که وجود لایه-های نمک سازند هرمز در مرز پی‌سنگ و پوشش رسوبی فانروزوئیک (تقریباً عمق ۱۰ کیلومتری)، ارتباط جنبشی پی‌سنگ را از پوشش رسوبی قطع کرده است (Hessami et al. 2001, Hessami et al. 2009, McQuillan 1991, Rahnama-Rad et al. 2006). بدین ترتیب زمین لرزه‌های بزرگ زاگرس به پی‌سنگ و زیر لایه‌های نمکی هرمز محدود شده‌اند (Standridge 2005). هرچند برخی از زمین لرزه‌های زاگرس همانند زمین لرزه ۱۹۷۲ میشان با گسلش سطحی همراه بوده، اما در این زمین لرزه نیز ارتباط جابجایی‌های سطحی و زلزله تا حد زیادی مبهم می‌باشد، به گونه‌ای که نتایج حاصل از حل مکانیسم کانونی گسل در زمین لرزه‌ای میشان با جابجایی قابل مشاهده در سطح، سازگار نمی‌باشد.



تصویر ۳- نقشه‌ی زمین شناسی مهندسی رودخانه‌ی رجدون در مناطق

پرخطر

سامانه ساختاری کازرون هم اکنون از فعال‌ترین روندهای لرزه‌خیز در زاگرس می‌باشد. همچنین این پهنه به احتمال قریب به یقین، مرزی بین دو ایالت لرزه زمین‌ساختی در دو سوی شمال-غرب و جنوب شرق خود در زاگرس می‌باشد و عملاً زاگرس را به دو ناحیه با ویژگی‌های لرزه‌خیزی متفاوت تقسیم می‌نماید. خطواره کازرون به-طور مایل تاقدیس‌های زاگرس را با روند شمالی-جنوبی قطع می‌کند (Sepehr & Cosgrove 2004). این گستره، از لرزه‌خیزی بالا و زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای متوسط و دوره‌ی بازگشت‌های کوتاه برخوردار است. از دیدگاه لرزه زمین‌ساختی محدوده‌ی گسل کازرون، یک ناحیه‌ی بحرانی از نظر خطر زمین‌لرزه است. به‌هرحال کوتاه بودن زمان دوره‌ی بازگشت زمین‌لرزه‌ها در زاگرس از ویژگی‌های این ایالت لرزه زمین‌ساختی به‌شمار می‌رود و به همین ترتیب بزرگی زمین‌لرزه‌ها نیز اکثراً کم می‌باشد. بنابراین پهنه‌ی گسل کازرون بسیارفعال و پرتکاپو، و آزادشدن انرژی در این ناحیه به‌صورت مداوم، مرحله‌ای و در فواصل زمانی کوتاه است. منطقه‌ی مورد مطالعه در فاصله ۱۰۰ کیلومتری غرب گسل کازرون واقع شده است.

#### ۴-۲- گسل بی‌بی حکیمه

گسل معکوس بی‌بی حکیمه با طول ۱۰۰ کیلومتر و روند شمال غرب-جنوب شرق و شیب تند به‌طرف شمال شرق در بخش شمالی بندر دیلم قرار دارد (Wennberg et al. 2007). این گسل در قسمت شمالی خمیده شده و به امتداد شمالی جنوبی تغییر راستا داده است. فرادیواره‌ی این گسل در شمال بندر دیلم سازندهای میشان و آغاچاری را بر روی دشت ساحلی خلیج فارس تراست کرده است. گسل بی‌بی حکیمه با خط اثر کاملاً مشخص بر روی عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای در مرز بین کوه و دشت قرار دارد. به‌علاوه بریده شدن سازندهای فوق در مجاور گسل امکان شناسایی آن را بر روی زمین ممکن ساخته است. هرچند این گسل به کواترنری نسبت داده شده، اما هیچگونه اطلاعات لرزه‌ای مرتبط با فعالیت‌های اخیر گسل در دسترس نیست. این گسل در شمال غرب رودخانه‌ی رجدون واقع شده و کوتاه‌ترین فاصله‌ی آن تا منطقه‌ی مورد مطالعه ۵۰ کیلومتر است.

#### ۴-۳- گسل میشان

گسل میشان با راستای شمال غرب-جنوب شرق و طول ۵۰ کیلومتر در شمال شرق رودخانه‌ی رجدون قرار دارد. این گسل با شیب به-طرف شمال شرق، سازند گچساران را بر روی سازند میشان رانده است (Bachmanov et al. 2004). فعالیت بخش غربی این گسل در

از جمله مهم‌ترین گسل‌های موجود تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری منطقه‌ی مورد مطالعه می‌توان به گسل‌های کازرون، آغاچاری، بی‌بی حکیمه، بهبهان، میشان، ارژن، دو گنبدان، بشط و ده دشت اشاره نمود (تصویر ۴). هرچند در طی برآورد پارامترهای لرزه‌ای تأثیر کلیه‌ی گسل‌های فوق مورد محاسبه قرار گرفته است، اما به‌دلیل تأثیر ویژه‌ی گسل‌های کازرون، بی‌بی حکیمه و میشان بر منطقه‌ی مورد مطالعه، در این بخش تنها به تشریح آنها می‌پردازیم (Safari et al. 2009).

#### ۴-۱- گسل کازرون

گسل کازرون با طول ۴۵۰ کیلومتر و راستای تقریبی شمالی جنوبی در فاصله ۱۵ کیلومتری غرب شهرستان کازرون قرار دارد (Sepehr & Cosgrove 2005). این گسل بی‌سنگی و قدیمی، ضمن کنترل مرز باختری حوضه نمکی هرمز، بر رسوبات زاگرس نیز اثرگذار بوده به گونه‌ای که ساختارهای زاگرس را با جهت راستگرد خمیده و جابه‌جا کرده است (Sepehr & Cosgrove 2004). برخی از نشانه‌های گسل کازرون دلالت بر جابجایی راست لغز این گسل در طول آن دارد. این زون گسلی با نفوذ دو گنبد نمکی همراهی شده است. در صورتی که صحت رویدادهای لرزه‌ای قبل از ۱۹۵۰ پذیرفته شود، تعیین رابطه بین موقعیت کانونی زمین لرزه‌ها در طول این گسل دشوار نیست. موقعیت کانون سطحی سه زمین لرزه (۲ سپتامبر ۱۹۳۰، ۴ فوریه ۱۹۳۴ و ۲۰ آگوست ۱۹۳۶) به درستی با راستای گسل کازرون منطبق می‌باشد. هیچ‌گونه اطلاعات مهله‌رزه‌ای در رابطه با این زمین لرزه‌ها وجود ندارد. به‌علاوه مدارک صحرائی مبنی بر فعالیت گسل در طی رویداد این زمین لرزه‌ها قابل مشاهده نیست. در روستای شاه صالح واقع در نزدیکی گسل نیز آثار تغییرات توپوگرافی ناشی از فعالیت‌های اخیر گسل وجود ندارد. تنها در بخش جنوبی روستای شاه صالح، در مجاور رودخانه‌ی شرقی غربی خط اثر گسل کازرون با یک متر برش، به-صورت معکوس و شیب ۸۰ تا ۸۵ درجه به‌طرف غرب مشاهده می-شود. این بخش از گسل در داخل سازند گچساران نفوذ کرده و توسط نهشته‌های آبرفتی کواترنر پوشیده شده است. به‌طور کلی نبود داده‌های ریزلرزه‌ای و کمبود کانون زلزله نشانگر عدم فعالیت جدید این گسل است، اما زمین‌لرزه‌های ۱۵ ژانویه ۱۹۶۷ و ۲۳ اکتبر ۱۹۷۱ در بخش جنوبی گسل کازرون، نشانگر فعالیت بخشی از گسل کازرون در دوره کواترنری است (Berberian 1976). در این زمین لرزه‌ها شوک اول به بزرگی ۴/۷ ریشتر به دو کاروانسرا خسارت وارد کرده و ریزش کوه را به همراه داشته است. شوک دوم به بزرگی ۴/۵ ریشتر در منطقه‌ی کمارج به چند خانه قدیمی خسارت وارد کرده و در کونار تخته با گسلش سطحی همراه شده است.

در این مقاله برای محاسبه‌ی خطر سالیانه‌ی 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 بهره‌گیری شده است. بنابراین به منظور تعیین بزرگی رویدادهای لرزه‌ای در شعاع ۱۰۰ کیلومتری منطقه‌ی مورد مطالعه از مدل سافت باندز (Soft Bounds Model) استفاده می‌گردد. 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 نیاز باسازی می‌گردد. 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  $\lambda$ ،  $M_{max}$ ،  $\beta$  و مقدار  $b$  value) به‌علاوه دوره‌ی بازگشت زمین لرزه‌ها با دوره‌های زمانی مختلف بر اساس مدل کیچکو و سلهول (Kijko & Sellevoll 1992) به کمک نرم افزار ای-ای-اچ-پی (EEHP, Estimation of Earthquake Hazard Parameters) محاسبه شده است. بر اساس این محاسبات در منطقه‌ی مورد مطالعه پارامترهای مورد نظر به شرح زیر (رابطه‌های ۲ و ۳) و دوره بازگشت رویداد زمین لرزه‌ها با بزرگی ۵/۵، ۶، ۶/۵ به ترتیب برابر ۴، ۱۹، ۹۶ و ۵۴۵ سال می‌باشد.

$$\text{Beta} = 3.12 \pm 0.09 \quad (b = 1.33 \pm 0.04) \quad (2)$$

$$\text{Lambda} = 614.92 \quad (\text{for min} = 2.50) \quad (3)$$

#### ۵-۲- برآورد بیشینه شتاب گرانش افقی زمین

یکی از مهمترین خطرهای ناشی از زمین‌لرزه ایجاد حرکت‌های شدید ناشی از گذر امواج الاستیک است که نه تنها می‌تواند به‌طور مستقیم سبب تخریب و ناپایداری سازه شود، بلکه عامل محرک برای ایجاد اثرات جنبی مانند کوه لغزش، فرونشست و روانگرایی خاک است. شدت اثر تخریبی تکان‌های زمین لرزه بستگی به ویژگی‌های سرچشمه آن از جمله بزرگی، چگونگی عملکرد نیروهای به‌وجود-آورنده 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. برای طراحی سازه‌های ویژه و پراهمیت، استفاده از تحلیل رفتار پویا (dynamic response) و شبه

۲ ژولای ۱۹۷۲ زمین لرزه‌ی میشان به بزرگی  $M_b=5.4$  را سبب شده است. نزدیک‌ترین فاصله‌ی گسل میشان تا منطقه‌ی مورد مطالعه ۵۰ کیلومتر است.

#### ۵- پتانسیل‌های لرزه‌خیزی

##### ۵-۱- برآورد پارامترهای لرزه‌ای به روش (MLE, Maximum Likelihood Estimation)

به منظور پی بردن به سرشت لرزه‌خیزی هر ایالت لرزه‌ای، بایستی پارامترهای لرزه‌خیزی آن ایالت را برآورد نمود. این پارامترها عبارتند از  $M_{max}$ ،  $\lambda$  و  $\beta$  در معادله‌ی گوتنبرگ ریشتر. پارامتر  $\lambda$  عبارت است از آهنگ رویداد سالانه یا نرخ پویایی (Kijko & Sellevoll 1989)، پارامتر  $M_{max}$  حداکثر بزرگی زمین‌لرزه که یک گسل توان تولید آن را دارد (Ward 1997) و پارامتر  $\beta$  بر اساس معادله‌ی گوتنبرگ بیان می‌شود. بر اساس معادله‌ی ۱،  $N_c$  مقدار تجمعی زلزله‌های رخ داده با بزرگی  $M$  یا بیشتر از آن می‌باشد. مقادیر  $a$  و  $b$  پارامترهایی هستند که برای هر منطقه فرق می‌کنند

$$\text{Log}N_c = a - bM \quad (1)$$

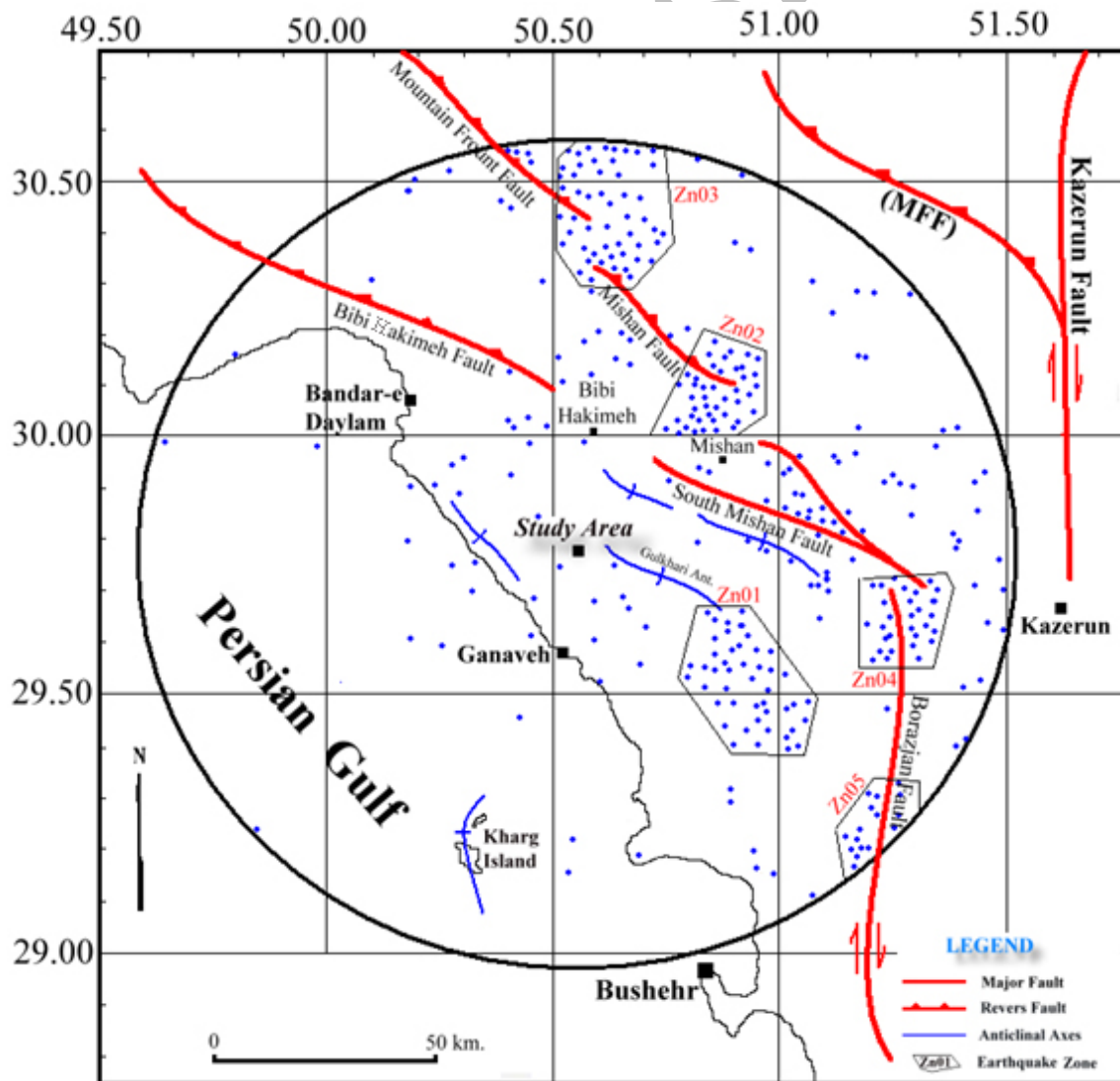
در منطقه‌ی مورد مطالعه ارزیابی پارامترهای اصلی زمین لرزه شامل حداکثر بزرگی منطقه‌ی  $M_{max}$ ، نرخ فعالیت  $X$  و پارامتر  $\beta$  گوتنبرگ-ریشتر بر اساس روش (Kijko & Sellevoll 1992) محاسبه شده است. این روش تکنیک‌هایی برای شناسایی گپ‌های لرزه‌ای و دستکاری بزرگی زمین لرزه‌های مشکوک را در اختیار قرار 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 تغییرات مشخصات سنسورهای لرزه‌ای در ایستگاه‌های مختلف نیز خطاهای سیستماتیک به محاسبات وارد می‌کند (Chung & Bernreuter 1981). به‌علاوه داده‌های دستگاهی به دو دسته تقسیم می‌شوند. نخست داده‌های دستگاهی ناکامل شامل زمین لرزه‌هایی که قبل از راه اندازی شبکه بین المللی لرزه‌شناسی (WWNSS, World Wide Network of Standard Seismograph Stations) ثبت شده و دوم داده‌های دستگاهی کامل که به‌صورت یک پریود کوتاه مدت ۵۰ ساله پس از به‌کارگیری شبکه بین المللی لرزه‌شناسی ثبت شده است. بنابراین کاتالوگ لرزه‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه با داده‌های مه‌لرزه‌ای ناقص و دستگاهی کامل، اطلاعاتی ناهمگن می‌باشند که مورد پردازش فنی قرار گرفته است.

ایستایی (pseudo static) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سالیان اخیر همگام با پیشرفت‌های دانش و فنی مهندسی زلزله، تکنیک‌های جدید برای محاسبه‌ی 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 فاصله  $R$  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 ۱۰۰ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این گستره، کلیه‌ی 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 گسله-

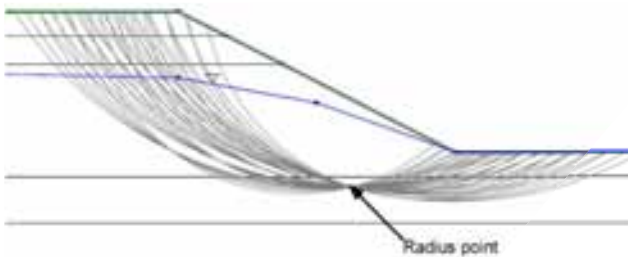
های جنب‌اشناسایی شده و توسط نرم افزار سیزریسک تری (SeisRiskIII) مورد آنالیز قرار گرفته‌اند (تصویر ۴). میزان شتاب گرانش افقی زمین معمولاً در دو حد با احتمال خطر ۶۴٪ و ۱۰٪ انتخاب می‌شود که حد اول سطح مبنای طراحی (DBL, Design Basis Level) و حد دوم سطح حداکثر طراحی (MDL, Maximum Design Level) نامیده می‌شود. بر پایه پیشنهاد‌های مهندسی تجربی، می‌توان سازه‌های معمولی را بر پایه‌ی احتمال رویداد زیاده‌تر یعنی بیش از ۵۰٪ 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 پیش‌بینی نمود.

در این مقاله به منظور محاسبه شتاب گرانش افقی با عمر مفیدهای

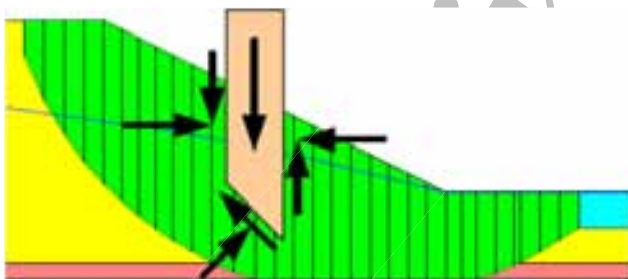


تصویر ۴- موقعیت سرچشمه‌های خطی و ناحیه‌ای در گستره‌ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتری منطقه‌ی مورد مطالعه

به‌علاوه روش‌های ترکیبی جستجوی تصادفی بر اساس روش‌های مبتنی بر الگوی مونت کارلو (Robert & Casella 2004, 2009) ساختار ساده‌ای از جستجوی تصادفی و فنون بهینه‌سازی دارند. در این روش تعداد زیادی از سطوح احتمالی برای یافتن ضریب اطمینان کمینه تولید می‌شود. روش استاتیکی آنالیز پایداری بر اساس رابطه‌ی نیروهای برشی و نرمال در هر یک از قطعات تحت لغزش مورد استفاده قرار می‌گیرد (تصویر ۶). تأثیر این نیروها بر قاعده‌ی قطعه‌ی 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 (Morgenstern & Price 1965) با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای تعیین کننده امکان آنالیز پایداری را با کمترین خطای ممکن میسر ساخته است.



تصویر ۵- تمام سطح لغزش مشترک در یک نقطه.



تصویر ۶- رابطه‌ی نیروهای برشی و نرمال بر یک قطعه لغزشی (Krahn 2003)

محاسبات مورد نظر بر اساس روش تعادل حادی و ضرایب ایمنی خروجی حاصل از روش تعادل گشتاوری انجام می‌شود. بدین ترتیب داده‌های مربوط به ساختارها و گمانه‌ها 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. آنالیز پایداری دامنه‌های رودخانه‌ی رجدون بر اساس روش مورگنستر-پرایس (تابع نیمه سینوسی half-sine function) انجام شده است.

متفاوت، از رابطه‌ی میرایی (Campbell & Bozorgnia 2003) استفاده شده است. لازم به ذکر است که رابطه‌ی میرایی کمپبل بر اساس شتاب نگاشت‌های ثبت شده در شمال آمریکا و بعضی قسمت‌های جهان (از جمله زمین لرزه‌ی طبرس و منجیل در ایران) ارائه شده است. نتیجه‌ی حاصل از محاسبه‌ی احتمال خطر زمین لرزه در محدوده‌ی مورد مطالعه، با فرض عمر مفید ۲۵، 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 ۰/۶۴٪ (زمین لرزه مبنای طرح، DBL) شتاب گرانش افقی برابر ۰/۱۴ g خواهد بود. در حالی که در طول عمر مفید ۵۰ ساله و با احتمال رویداد ۱۰٪ (سطح حداکثر طراحی MDL)، شتاب گرانش افقی برابر ۰/۲۰ g است.

جدول ۱- بیشینه‌ی شتاب گرانش افقی زمین در محدوده‌ی پر خطر رودخانه‌ی رجدون به روش محاسبه‌ی احتمالات (بر حسب درصد g).

MDL) بیشینه زمین لرزه ممکن با ۱۰٪ احتمال رویداد			DBL) با ۶۴٪ احتمال رویداد		
سال ۱۰۰	سال ۵۰	سال ۲۰	سال ۱۰۰	سال ۵۰	سال ۲۵
۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۳

#### ۶- پتانسیل‌های ناپایداری

##### ۶-۱- لغزش با سطح برش دایره‌ای ساده

آنالیز پایداری عددی برای نخستین بار در ۱۹۱۶ میلادی مطرح، سپس جهت پایداری دیوارهای سواحل گوتنبرگ سوئد مورد استفاده قرار گرفت و در طی چند دهه‌ی اخیر توسط دانشمندان متعدد (Spencer 1967, Morgenstern & Price 1965, Janbu 1936) (Limiting equilibrium) و با استفاده از روش قطعات (Methods of slices) در چهار دهه‌ی گذشته بر اساس تحلیل تعادل حادی (Limiting equilibrium) و با استفاده از روش قطعات (Methods of slices) گام‌های مؤثر در جهت آنالیز پایداری دامنه‌ها برداشته شده است. 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 ۱۹۶۰ امکان انجام آنالیزهای پیچیده‌ی ریاضی و تکرار توابع ریاضی دشوار را فراهم نمود. بنابراین نرم‌افزارهای متعددی جهت آنالیز پایداری دامنه‌ها تهیه شده، که در این مطالعات از نرم افزار اسلاید (Slide)، (Krahn 2003) استفاده شده است.

##### ۶-۱-۱- روش تملیل

در روش‌های آنالیز پایداری دامنه‌ها، یافتن سطح بحرانی شکست با پیشرفت محاسبات و عملیات جستجو انتخاب می‌گردد (تصویر ۵).

خشک و بارگذاری لرزه‌ای پایدار می‌باشند. هرچند دامنه‌های مورد نظر تا شیب ۴۰ درجه بدون بارگذاری لرزه‌ای پایدار هستند، اما رویداد زمین لرزه‌ای با شتاب افقی  $g = 0.14$  در منطقه‌ی مورد مطالعه، توانایی ناپایدار نمودن دامنه‌ها با شیب بیش از ۲۰ درجه را دارد (جدول ۲ تصویر ۸ و ۹). بنابراین رویداد زمین لرزه‌های نیرومند در منطقه‌ی مورد مطالعه سبب لغزش‌های دامنه‌ای در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون و مسدود شدن مسیر رودخانه می‌گردد. در چنین شرایطی سدهای طبیعی در مسیر رودخانه ایجاد شده و شکسته شدن پی در پی این سدها سیلاب‌های بزرگی را ایجاد می‌کند که شهر بندری گناوه را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

جدول ۲- مقایسه‌ی ضریب ایمنی دامنه‌های رودخانه‌ی رجدون با تغییر پارامترهای مؤثر.

شیب دامنه (درجه)					
۵۰	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰
۱/۰۶	۱/۴۱	۱/۴۷	۱/۵۸	۱/۷۵	۲/۴۱
۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۹۳	۱/۰۰	۱/۱۱	۱/۴۷
۰/۸۰	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۴	۱/۵۰

#### ۲-۶- لغزش‌های ستونی

تکامل شکستگی‌های فصل مشترک به‌همراه خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها، شرایط لازم جهت زمین لغزش‌های بزرگ مقیاس را در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون فراهم نموده است. در چنین شرایطی مادستون‌های ضخیم لایه بخش بالایی سازند بختیاری، بیشترین پتانسیل لغزش را دارند. هرچند این رسوبات در حاشیه‌ی رودخانه به صورت دیواره‌های کاملاً عمود ظاهر شده‌اند، اما پس از تماس با آب (زمان سیلاب) مقاومت آن‌ها به شدت کاهش یافته و به صورت ستون‌های عظیم به داخل رودخانه سقوط می‌کنند. مهمترین عامل کنترل کننده‌ی این ناپایداری‌ها طرح شکستگی‌های فصل مشترک، خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها و ضخامت رسوبات مورد نظر می‌باشد. در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون به دلیل ضخامت زیاد لایه‌های مادستون، طرح شکستگی‌های فصل مشترک ساختمان‌های ستونی شکل را ایجاد کرده است (تصویر ۱۰).

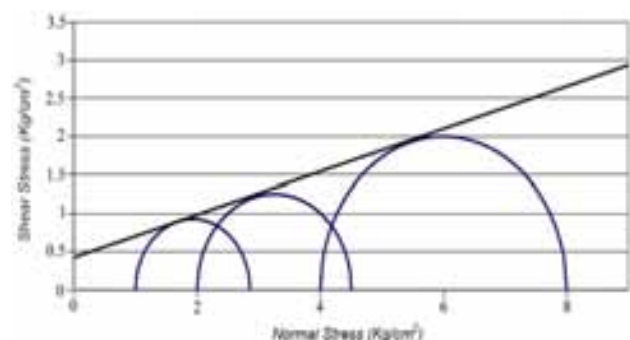
#### ۲-۶-۱- شکستگی‌های فصل مشترک

نایبوستگی‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه تنها در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون قابل اندازه‌گیری است. این نایبوستگی‌ها در ۱۲ ایستگاه در طول رودخانه‌ی رجدون اندازه‌گیری شده و مورد آنالیزهای آماری قرار گرفته‌اند. مجموع مطالعات انجام شده حکایت از آن دارد که درزه‌های فصل مشترک مهمترین سیستم درزه‌های موجود در منطقه می‌باشد.

مورگنستر-پرایس در سال ۱۹۶۵ روش آنالیز پایداری دامنه‌های ارائه شده توسط اسپنسر را اصلاح نمود. در این روش از توابع ثابت، نیمه سینوسی، دوزنقه‌ای و داده‌های نقطه‌ای معین استفاده شده است. در روش مورگنستر-پرایس فاکتور ایمنی با لنگر پایداری و معادله‌ی ایمنی با تعادل نیروهای افقی در ارتباط است. در هر دو معادله نیروی نرمال در قاعده‌ی لغزش به وسیله‌ی مجموع نیروهای عمودی محاسبه می‌شود. این روش بر اساس دو فاکتور اساسی معادله‌ی ایمنی و محدوده نیروهای برشی / نرمال داخل قطعات لغزشی پایه‌گذاری شده است. به علاوه در این آنالیز سطح لغزش دایره‌ای ساده مرتبط با  $(FS)$   $(\lambda, vs)$  با فرض تعادل لنگرهای مستقل در داخل قطعه برشی فرض شده است. بر این اساس توده‌ی لغزشی همانند یک جسم آزاد در طی لغزش، چرخش می‌نماید.

#### ۲-۶-۱-۶- پتانسیل لغزش‌های دایره‌ای در ماشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون

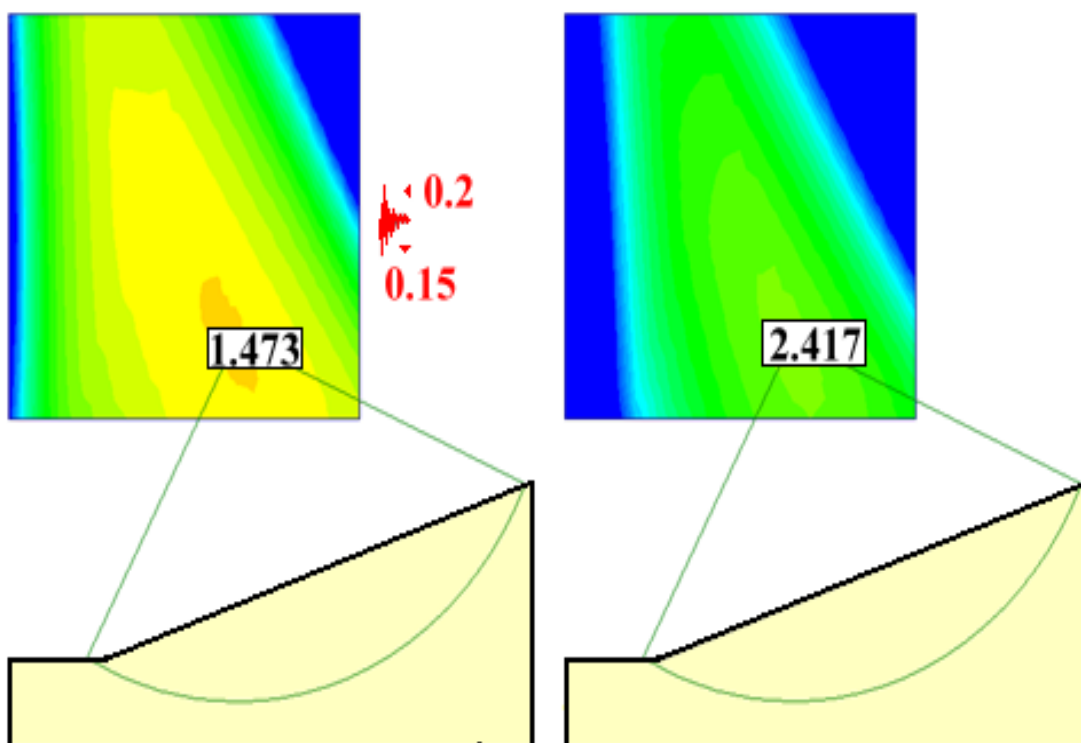
به منظور مشخص شدن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیلتستون‌ها و مادستون‌های سازند بختیاری در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون، دو نمونه مغزه‌ی حفاری تحت آزمایش سه محوری قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی دلالت بر آن دارد که به‌طور متوسط زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها ۱۶ درجه، چسبندگی ۴۳ کیلونیوتن بر متر مربع و دانسیته ۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد (تصویر ۷). به علاوه بر اساس طبقه‌بندی اصلاح شده بنیوسکی (RMR, Rock Mass Rating) سیلتستون‌ها و سیلتستون‌های حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون با کسب ۱۶ امتیاز جزء سنگ‌های بسیار ضعیف و در کلاس ۵ طبقه‌بندی، قرار می‌گیرد. بر این اساس ضریب چسبندگی (C) این رسوبات کمتر از ۱۰۰ و مقدار زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  برای کل توده سنگ کمتر از ۱۵ درجه خواهد بود.



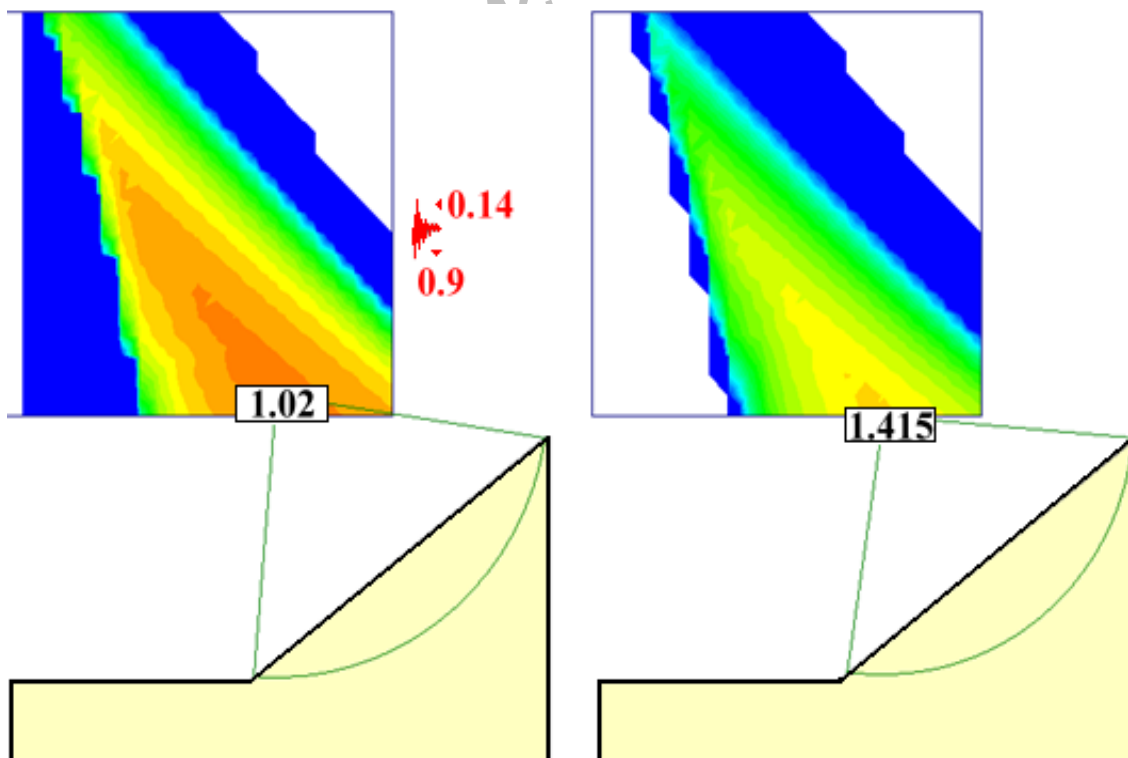
تصویر ۷- نمودار دواير موهر و پوش گسيختگی آزمایش سه محوری در حالت خشک (نمونه‌ی شماره ۱).

نتایج آنالیزهای انجام شده توسط نرم‌افزار اسلاید، بیانگر آن است که دامنه‌های حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون با شیب ۲۰ درجه در حالت





تصویر ۸- مقایسه‌ی ضریب ایمنی دامنه‌های با شیب ۲۰ درجه در شرایط طبیعی و تحت بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی  $g = 0.2$ .



تصویر ۹- مقایسه‌ی ضریب ایمنی دامنه‌های با شیب ۴۰ درجه در شرایط طبیعی و تحت بارگذاری لرزه‌ای با شتاب افقی  $g = 0.14$ .



تصویر ۱۰- پتانسیل تشکیل ستون‌های سنگی در مجاور رودخانه‌ی رجدون.



تصویر ۱۱- لغزش‌های ستونی تحت تأثیر شکستگی‌های فصل مشترک در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون.



horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra", *Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 93*: 314-331.

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

**Farhoudi, G., 1978**, "A Comparison of Zagros Geology to Island Arcs", *Journal of Geology, Vol. 86*: 325-334.

**Farhoudi, G., Faghieh, A., Mosleh, H., Keshavarz, T., Heyhat, M. R. & Rahnama-Rad, J., 2008**, "Using GIS/RS techniques to interpret different aspects of salt domes in southern Iran", *Geophysical Research Abstracts, Vol. 10*: EGU-A-06522.

**Farhoudi, G. & Poll, K., 1992**, "A morphotectonic study of environmental impact on ground water in Southern Iran and under the Persian Gulf", *Geologische Rundschau, Vol. 82 (4)*: 581-587.

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

**Hatzfeld, D., Tatar, M., Priestley, K. & Ghafory-Ashtyany, M., 2003**, "Seismological constraints on the crustal structure beneath the Zagros mountain belt (Iran)", *Geophys. J. Int., Vol. 155*: 403-410.

**Hessami, Kh., Koyi, H. A. & Talbot, C. J., 2001**, "The significance of strike slip faulting in the basement of the Zagros fold-thrust belt", *J. Petroleum Geol., Vol. 24*: 5-28.

**Hessami, Kh., Koyi, H. A., Talbot, Ch. J., Tabasi, H. & Shabanian, E., 2001**, "Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros Mountains", *Journal of the Geological Society of London, Vol. 158 (6)*: 969-981.

**Hessami, Kh., Nilforoushan, F. & Talbot, C.T., 2006**, "Active deformation within the Zagros mountains deduced from GPS measurements", *J. Geol. Soc. London, Vol. 163*: 143-148.

**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., 2007**, "Evolution of Joints in Sediments of Shemshak Group (Tezereh Coalmine)", *Journal of Applied Geology, Vol. 3 (2)*: 144-150.

**Kangi, A. & Heidari, N., 2008**, "Reservoir-induced Seismicity in Karun III Dam (Southwestern Iran)", *Journal of Seismology, Vol. 12 (4)*: 350-361.

**Kent, P. E., 1979**, "The emergent Hormuz salt plugs of Southern Iran", *Jour. Petroleum Geology, Vol. 2 (2)*: 117-144.

**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

آنالیزهای مورد نظر با شرایط موجود رودخانه‌ی رجدون کاملاً سازگار است.

## ۷- نتیجه گیری

مادستون‌ها و سیلتستون‌های سازند بختیاری در حاشیه‌ی رودخانه‌ی رجدون به دلیل خصوصیات ژئوتکنیکی خاص، دارای پتانسیل ناپایداری می‌باشند. رویداد زمین لرزه‌های نیرومند با شتاب افقی بیش از  $g/14$  در محدوده‌ی رودخانه‌ی رجدون، لغزش‌های دامنه‌ای حاشیه‌ی این رودخانه را به شدت افزایش می‌دهد. به دلیل مورفولوژی خاص رودخانه، رویداد چنین لغزش‌هایی سبب تشکیل سدهای طبیعی متعدّد در مسیر رودخانه می‌گردد. تشکیل چنین سدهای طبیعی در طول مسیر رودخانه علاوه بر شکسته شدن آنها، در برخی از محل‌ها باعث تغییر مسیر رودخانه خواهد شد. در هر دو صورت پی‌آمد این رویداد، با وقوع سیلاب‌های بزرگ خسارات بسیاری زیادی به شهرستان گناوه در جنوب رودخانه‌ی رجدون وارد می‌کند. بنابراین تعدیل شیب دامنه‌های پرخطر این رودخانه و احداث سازه‌های مهندسی در مکان‌های با پتانسیل لغزش ضروری به نظر می‌رسد.

## مراجع

**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.

**Bachmanov, D. M., Trifonov, V. G., Hessami, Kh. T., Kozhurin, A. I., Ivanova, T. P., Rogozhin, E. A., Hademi, M. C. & Jamali, F. H., 2004**, "Active faults in the Zagros and central Iran", *Tectonophysics, Vol. 380 (3-4)*: 221-241.

**Berberian, M., 1976**, "Contribution to the seismotectonics of Iran: Part II", *Geol. Surv. Iran. Rep. No. 40, Tehran*.

**Berberian, M., 1995**, "Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds; active basement tectonics and surface morphotectonics", *Tectonophysics, Vol. 241*: 193-224.

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

**Bosak, P., Jaros, J., Spudil, J., Sulovsky, P. & Vaclavek, V., 1998**, "Salt Plugs in the Eastern Zagros, Iran: Results of Regional Geological Reconnaissance", *GeoLines (Praha), Vol. 7*: 3-174.

**Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y., 2003**, "Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the

- Island, Louisiana", *SEG( Society of Exploration Geophysicists) Technical Program Expanded Abstracts: 1160-1163*
- 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*.
- Wennberg, O.P., Azizzadeh, M., Aqrawi, A. A. M., Blanc, E., Brockbank, P., Lyslo, K. B., Pickard, N., Salem, L. D. & Svånå, T., 2007**, "The Khaviz Anticline: an outcrop analogue to giant fractured Asmari Formation reservoirs in SW Iran", *Geological Society, London, Special Publications, Vol. 270: 23-42*.
- 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(27)*.
- Krahn J., 2003**, "The 2001 R.M. Hardy Lecture: The limits of limit equilibrium analyses", *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40 (3): 643-660*.
- Letouzey, J. & Sherkati, S. 2004**, "Salt Movement, Tectonic Events, and Structural Style in the Central Zagros Fold and Thrust Belt (Iran), In Salt sediments interactions and hydrocarbon prospectively", *24<sup>th</sup> Ann. GCSSEP Foundation, Bob*
- McQuillan, H., 1991**, "The role of basement tectonics in the control of sedimentary facies, structural patterns and salt plug emplacements in the Zagros fold belt of Southwest Iran", *Journal of Southeast Asian Earth Sciences, Vol. (5-4): 453-463*
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E., 1965**, "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces", *Geotechnique, Vol. 15: 79-93*.
- Mouthereau O., & Meyer, B., 2006**, "The Zagros folded belt (Fars, Iran): constraints from topography and critical wedge modeling", *Geophysical Journal International, Vol. 165 (1): 336-356*.
- Rahnama-Rad, J., Farhoudi, G., Ghorbani, H., Habibi Mood, Sh. & Derakhshani, R., 2009**, "Pierced salt domes in the Persian Gulf and in the Zagros mountain ranges in southern Iran and their relationship to hydrocarbon and basement tectonics", *Iranian Journal of Earth Sciences, Vol.1 (1): 157-72*.
- Robert, C. & Casella, G., 2004**, "Monte Carlo Statistical Methods", *2<sup>nd</sup> ed., Springer-Verlag, New York*.
- Robert, C. & Casella, G., 2009**, "Introducing Monte Carlo Methods with R", *Springer-Verlag, New York*.
- Safari, H. O., Pirasteh, S. & Pradhan, B., 2009**, "Upliftment Estimation of the Zagros Transverse Fault in Iran Using Geoinformatics Technology", *Open access Journal of Remote Sens. Vol.1: 1240-1256*.
- Sepehr, M. & Cosgrove, J.W., 2004**, "Structural framework of the Zagros fold-thrust belt, Iran", *Marine Petroleum Geol., Vol. 21: 829-843*.
- Sepehr, M. & Cosgrove, J.W., 2005**, "Role of the Kazerun fault zone, in the formation and deformation of the Zagros fold-thrust belt, Iran". *Tectonics, Vol. 24:TC5005*.
- Sepehr, M., Cosgrove, J. W. & Moieni, M., 2006**, "The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros fold-thrust belt", *Tectonophysics, Vol. 427: 265-281*.
- Spencer, E., 1967**, "A Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Interstices Forces", *Geotechnique, Vol 17 (1): 11-26*.
- Standridge, D., Bishop, C. & Serpa, L., 2005**, "A high-resolution seismic survey to image the top of salt at Avery