# بیشینه شتاب زمین لرزه احتمالی و اثر آن بر شیروانی روستای کمرود به‌روش شبه دینامیک (شمال استان سمنان)

احمد ادیب*؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، گروه مهندسی نفت، تهران، ایران

مرتضی اشرفیان؛ مرکز تحقیقات زمین‌شناسی و محیط زیست زمین کاو

**تاریخ: دریافت** ۹٤/٦/۲۱ **پذیرش** ۹٤/۱۱/٦

## چکیده

روستای کمرود روی شیب مستعد لغزش قرار دارد، لغزش و جابه‌جایی این شیب می‌تواند باعث ایجاد خسارت عمده مالی و جانی شود، بر این اساس تحلیل پایداری شیروانی‌های شمال و شرق این روستا ضرورت دارد. این بررسی‌ها با هدف تعیین عوامل و پارامترهای مؤثر در ناپایداری این شیروانی در حالت دینامیک صورت گرفته است. نیروی اعمال شده شتاب زمین‌لرزه یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر لغزش در این ناحیه است. در این مقاله با رهیافت تعیینی، مقدار بیشینه شتاب احتمالی زمین لرزه با دورهٔ بازگشت ۵۰ سال در سایت برآورد و تأثیر آن در ناپایداری شیروانی‌های شمال و غرب روستای کمرود مشخص شده است. هم‌چنین با تعیین مشخصات هندسی شیروانی و پارامترهای فیزیکی و مقاومتی توده مستعد لغزش با استفاده از مدل‌سازی با نرم‌افزار FLAC 2D5.00 در مدل ساختاری الاستوپلاستیک، به‌همراه معیار گسیختگی موهر-کولمب به بررسی رفتار تنش-واتنش خاک در برابر شتاب افقی زمین لرزه به‌روش شبه دینامیک پرداخته شده است. در این ارتباط یک موقعیت مبنا در بالای شیرونی تعیین و میزان تغییر مکان افقی آن تا رسیدن به بیشینه شتاب احتمالی زلزله ثبت شده است. نتایج نشان می‌دهد که جابه‌جایی افقی و به‌دنبال آن رانش زمین، در شتابی کم‌تر از شتاب بیشینه به‌دست آمده با رهیافت تعیینی در این ناحیه رخ می‌دهد.

**واژه‌ای کلیدی:** زمین‌لغزش، کمرود، بیشینه شتاب، پایداری شیروانی، شبه دینامیک.

* **نویسنده مسئول** dr_a_adib@yahoo.co.uk

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

## مقدمه

شمال ایران مرکزی و البرز به‌دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی، توپوگرافی و آب و هوایی از جمله مناطق مستعد زمین‌لغزش به‌شمار می‌روند و سالانه خسارات چشم‌گیری بر اثر ناپایداری شیروانی‌ها در این مناطق گزارش شده است. عوامل متعددی مانند تغییر شرایط زمین‌شناسی، جنس سنگ، خصوصیات ریخت‌شناسی، کاربری اراضی، گسترش مناطق مسکونی، احداث راه‌ها، بارندگی و... در تحریک و فعالیت مجدد حرکات دامنه‌ای در این مناطق تأثیر می‌گذارند. زمین‌لغزش وقتی خطرناک می‌شود که از سوی فرآیندهای طبیعی یا انسانی از بیرون تحریک شود. از جمله فاکتورهای محرک را می‌توان بارندگی شدید و ناگهانی، تکان‌های ناشی از زلزله، تغییر سطح آب زیرزمینی و جریان‌های فرسایشی سریع نام برد که باعث تغییر مقاومت برشی مواد تشکیل دهنده دامنه و ناپایداری آن می‌شوند[ ۱].

زمین لرزه مهم‌ترین عامل تحریک زمین‌لغزش است، این دسته از زمین‌لغزش‌ها، در قرن اخیر در سراسر دنیا هزاران کشته و میلیاردها دلار خسارت داشته‌اند. در بسیاری از زلزله‌های رخداده در مناطق کوهستانی خسارات حاصل از زمین‌لغزش‌ها برابر و یا حتی بیش از خسارات مستقیم ناشی از زلزله بوده است. زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله علاوه بر تخریب سازه‌ها، می‌تواند به شریان‌های حیاتی مانند خطوط انتقال آب، برق، نفت و گاز آسیب جدی برسانند. انسداد جاده به‌وسیله زمین‌لغزش در زمان زلزله موجب قطع عملیات امدادرسانی به زلزله زدگان شده و میزان خسارات را افزایش می‌دهد [۲]. برای کاهش خسارات ناشی از رخداد زمین‌لغزش می‌توان با شناخت مناطق حساس به لغزش، برای توسعه مناطق مسکونی در حد امکان از این مناطق اجتناب کرد و یا در صورت اجبار به سکنی گزینی و یا توسعه در این مناطق با شناخت دقیق شرایط محیطی تمهیدات و نکات فنی لازم را مد نظر قرار داد.

کیفر[1] (۱۹۸٤) [۳] زمین‌لغزش‌ها را به ۳ دسته: I. ریزش‌ها و لغزش‌های گسسته.، II. زمین لغزش‌های پیوسته.، III. جریان‌های خاکی سریع و گسترش‌های جانبی گروه‌بندی کرده است. زمین‌لغزش‌های دستهٔ I و II در خاک و سنگ، و زمین لغزش‌های دسته III فقط در خاک رخ می‌دهند. از پـژوهش‌های انجام شده مـرتبط با زمین‌لغزش، مـی‌توان به پـژوهش‌های ژیپسون[2] و

1. Keefer
2. Jibson

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

همکاران (۲۰۰۰) [٤]، کیفر (۲۰۰۰) [٥]، ارومیه‌ای و مهدویفر (۲۰۰۰) [٦]، دلگادیو[1] و همکاران (۲۰۰۳) [۷]، لان[2] و همکاران (۲۰۰٤) [۸]، گلاد[3] و همکاران (۲۰۰۵) [۹]، ژیپسون (۲۰۰۷) [۱۰]، میلس[4] و کیفر (۲۰۰۷) [۱۱]، پاردهان[5] و لی[6] (۲۰۰۹) [۱۲]، روسی[7] و همکاران (۲۰۱۰) [۱۳]، مهدویفر (۱۳۸۵) [١٤]، رجبی (۱۳۸۹) [۱۵] و فاطمی‌عقدا و همکاران (۱۳۹۳) [۲] اشاره کرد.

روستای کمرود در شمال استان سمنان روی شیبی که مستعد لغزش است قرار دارد. تحلیل پایداری این شیب با هدف پایداری شیروانی و ایجاد سکونت‌گاه ایمن برای اهالی روستا اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا لغزش آن می‌تواند باعث ایجاد خسارت‌های عمده مالی و جانی شود. این تحقیق با هدف تعیین تأثیر عوامل و پارامترهای مؤثر در ناپایداری این شیروانی و ارائه راه حل پایدارسازی آن صورت گرفته است. بر اساس پژوهش‌های انجام شده از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر لغزش در این ناحیه، نیروی اعمال شدهٔ شتاب زمین لرزه است.

محققان برای پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها، روش‌های متفاوتی ارائه کرده‌اند که روش شبه دینامیکی یکی از کاربردی‌ترین آن‌ها است. در این روش، پارامتر مهم در محاسبات، شتاب افقی زلزله است که با تغییرات آن میزان نیروی وارد بر شیروانی تغییر می‌یابد. در بارگذاری شبه استاتیکی در سطح طراحی MCE حداقل ضریب اطمینان لغزش قابل قبول معادل ۱/۱۵ پذیرفته می‌شود و با معیار سید[8] هم‌خوانی دارد [١٦]. در این تحقیق حداقل ضریب اطمینان مطابق توصیه‌های استاندار برای دوایر لغزشی عمیق ۱/۵ در نظر گرفته و با بررسی‌های سطحی و زیرسطحی، پارامترهای فیزیکی و مقاومتی تودهٔ مستعد لغزش تعیین و با استفاده از مدل سازی با نرم‌افزار FLAC2D 5.00 در مدل ساختاری الاستوپلاستیک بر اساس معیار گسیختگی موهر-کولمب، رفتار تنش –واتنش خاک مشخص می‌شود.

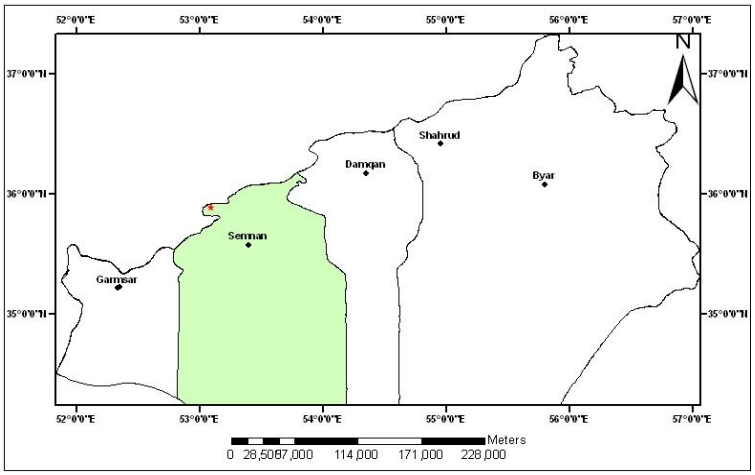
1. Del Gaudio
2. Lan et al
3. Glade
4.Miles
5. Pradhan
6. Lee
7. Rossi
8. Seed

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

## مواد و روش‌ها

### زمین ریخت‌شناسی ناحیه

روستای کمرود در منطقهٔ خطیرکوه در شمال استان سمنان در موقعیت عرض جغرافیایی ´٥٤ °٣٥ و طول جغرافیایی ´١٠ °٥٣ در دهستان چاشم قرار دارد. محدودهٔ خطیرکوه در البرز مرکزی از شمال و شرق به شهرستان سوادکوه، از جنوب به شهرستان سمنان، و از غرب به شهرستان فیروزکوه محدود است (شکل ۱). این ناحیه دارای شرایط اقلیمی خزری، خاص کرانه‌های دریای خزر و مناطق کوهستانی مشرف به دریا است و آب و هوای معتدل تا سرد کوهستانی دارد.

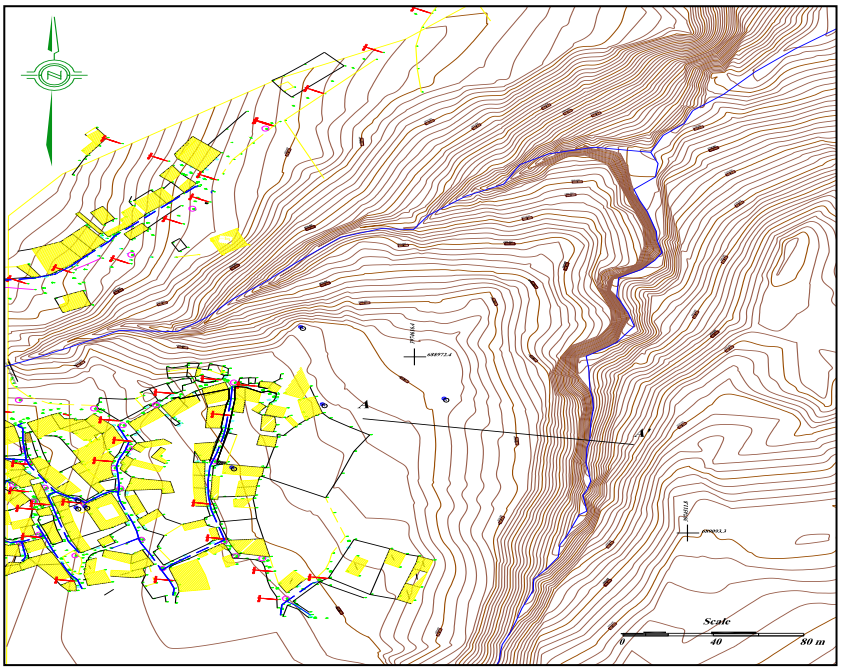



**شکل ۱. موقعیت روستای کمرود در شمال شهرستان سمنان و جنوب شهرستان سوادکوه در نقشه روستا با ★ مشخص شده است.**

بخشی از ساختگای روستای کمرود از نظر زمین‌شناسی جزء پادگانه‌های آبرفتی جدید، مخروط‌افکنه و آبرفت‌های بستر رودخانه است. منشأ این رسوبات سنگ‌های آهکی و آهک ماسه‌ای تا ماسه‌سنگی سازند باروت، سازنده ارتفاعات خطیرکوه است [۱۷]. محدودهٔ اطراف روستا، به‌دلیل نوع لیتولوژی (به‌خصوص ماسه سنگ‌های متورق نازک لایه و کنگلومراهای عهد حاضر) و تکتونیزه بودن سنگ‌ها در اثر فعالیت گسل‌ها، مستعد فرسایش است و میزان رسوب‌زایی زیادی دارند. رخداد زمین‌لغزش قدیمی بزرگ، مقدار زیادی مواد لغزشی را در

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

محدودهٔ اطراف روستا پراکنده و شواهد برجای مانده از تودهٔ لغزیده در قسمت شمالی روستای کمرود دیده می‌شود. تودهٔ لغزیده شامل قطعات سنگی، آهکی، کنگلومرایی، ماسه سنگی و رس است. اندازهٔ قطعات سنگی از حد چند سانتی‌متر تا چند متر بوده است و در قسمت جنوبی روستا تودهٔ لغزیده دارای قطعات سنگی بزرگ‌تری است. ضخامت رسوبات واریزه‌ای از جنوب به شمال روستا افزایش می‌یابد و هم‌اکنون تحت شرایط تحریک کننده لغزش، مستعد حرکت هستند. دره پیرامونی روستا پرشیب است و نشان‌دهندهٔ فرسایش شدید در ناحیه است (شکل‌های ۲ و ۳) [۱۸]. جابه‌جایی‌های افقی و عمودی در طول رودخانه‌های شرقی و غربی روستا، حاکی از ارتباط پیدایش دره با گسلش و تکتونیک فعال ناحیه است. تغییر مکان‌های عمودی در عرض رودخانه، آبشارهایی به ارتفاع بیش از ده متر ایجاد کرده است.




**شکل۲. نقشهٔ توپوگرافی با منحنی تراز دو متر (خط A-A') موقعیت مقطع تهیه شده برای تحلیل زمین‌لغزش را نشان می‌دهد**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

**شکل ۳. وضعیت پستی و بلندی‌ها و دره‌های احاطه‌کننده روستای کمرود (دید به‌سوی جنوب غرب)**

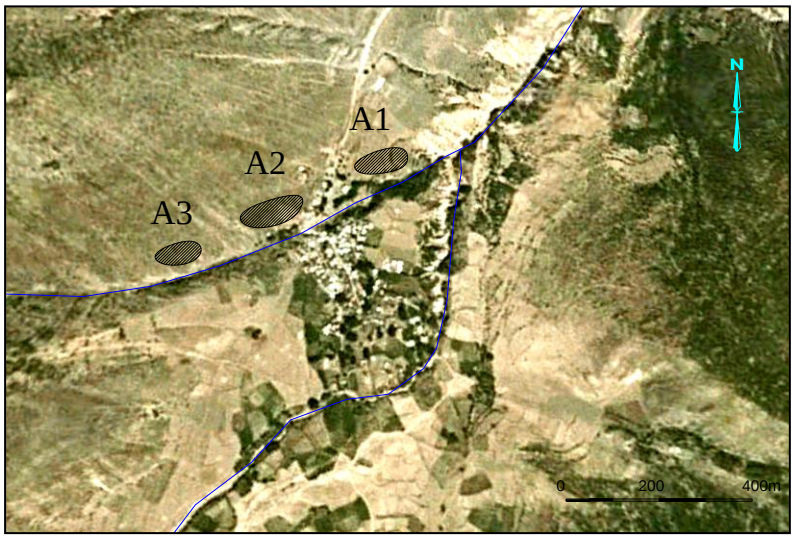
در سه رخنمون سنگی A1، A2 وA3 دو دسته درزه مشاهده می‌شود که یک دسته در امتداد شمال‌شرقی–جنوب‌غربی (j1) و دستهٔ دیگر در امتداد شمال‌غربی جنوب‌شرقی (j2) هستند، این دو امتداد روند رودخانه‌های شرقی و غربی کمرود را نشان می‌دهند. هم‌چنین جهات بیشینهٔ تنش در این منطقه باتوجه به این سه دیاگرام شمال غربی- جنوب‌شرقی مشخص شد (شکل‌های ٤ و ٥). شکل‌گیری دره‌های عمیق هم‌راستا با جهت شکستگی‌ها در این ناحیه را می‌توان به عمل‌کرد توأم فرسایش و پویایی ساختارها در دورهٔ کواترنر نسبت داد.

## لرزه خیری

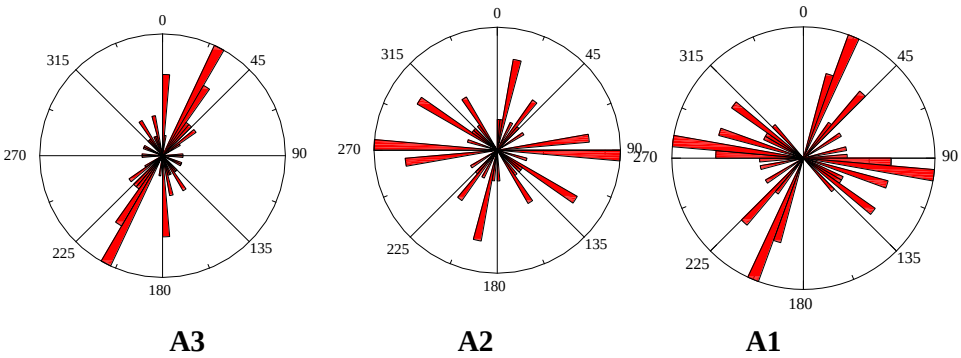
در ایران و بسیاری از نقاط دیگر جهان، فاجعه آمیزترین و دلخراش‌ترین زمین لغزش‌ها با زلزله‌های شدید، تحریک و آغاز می‌شوند. تأثیر زلزله بر ناپایداری شیب‌ها علاوه بر اعمال نیروهای اینرسی اضافی در توده دارای توان بالقوه لغزش باعث تغییرات ویژگی مقاومتی مصالح (عمدتاً کاهش) حین بارگذاری زلزله و افزایش فشارهای منفذی می‌شود. هم‌چنین فعالیت‌های زمین‌ساختی و گسل خوردگی‌های ناشی از زلزله در دراز مدت در یک منطقه، شرایط را برای ایجاد شکستگی، کاهش مقاومت و افزایش مقدار آب که خود موجب ایجاد ناپایداری شیب‌ها

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

می‌شود فراهم می‌سازد. وقوع زلزله‌ای شدید نه تنها زمین‌لغزش‌های زیادی را به‌طور هم‌زمان تحریک می‌کند بلکه تا سال‌ها بعد نیز اثر خود را به‌صورت افزایش تعداد زمین‌لغزش‌ها در منطقه برجای می‌گذارد [۱۹].




**شکل٤. عکس ماهواره‌ای از منطقه که در آن سه رخنمون سنگی برداشت شده مشخص شده است**



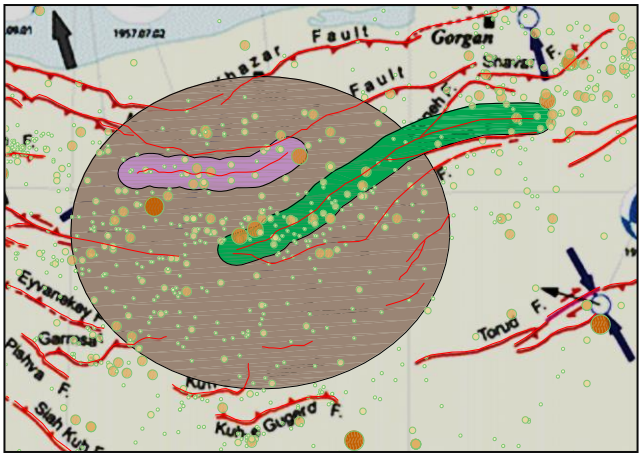

**شکل ۵. نمودار گل سرخی مربوط به درزه‌های سه رخنمون سنگی**

در تحلیل خطر زمین لرزه سعی می‌شود برآوردی از بیشینه شتاب وارد بر شیروانی تعیین شود. این مهم با دو روش، تحلیل خطر زمین‌لرزه با رهیافت تعیینی[1] یا روش DSHA و تعیین

1. Deterministic Seismic Hazard Analysis

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

خطر زمین‌لرزه با رهیافت احتمال اندیشه[1] یا روش PSHA انجام می‌شود، هدف هر دو روش به‌دست آوردن پارامترهای اساسی جنبش زمین مانند بیشینهٔ شتاب زمین[2] یا همان PGA است. در این تحقیق سعی شده است بر اساس روابط مختلف که طبق ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی البرز ارائه شده با رهیافت تعیینی بیشینه شتاب زمین لرزه در ناحیه محاسبه شود [۲۰]–[۲۷]. در پژوهش‌های در شعاع ۱۰۰ کیلومتری روستا دو چشمهٔ خطی مشخص و به‌عنوان مبنای تحلیل استفاده شد. چشمه خطی شمارهٔ یک با طول ۸۰ کیلومتر سبزرنگ و چشمه شمارهٔ دو با طول ۸۵ کیلومتر به رنگ بنفش مشخص شده است (شکل ٦).




**شکل٦. چشمه‌های لرزه‌ای در محدوده‌ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتر به‌همراه گسل‌ها و زمین‌لرزه‌ها**

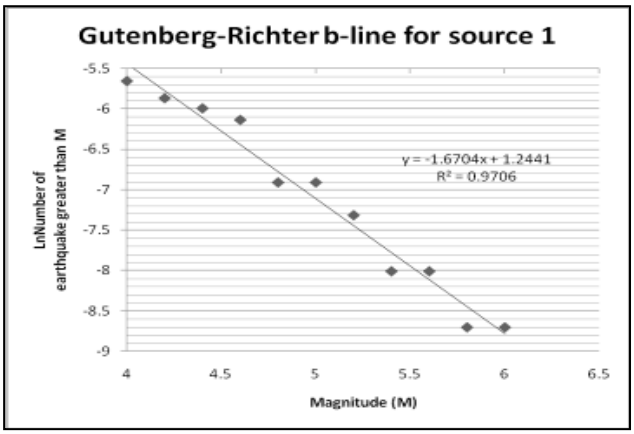
چشمه لرزه‌ای شمارهٔ ۱ ادامه گسل آستانه است و به شش قطعه تقسیم می‌شود. این قطعات گسلی در فواصل ۳/٤، ۵/۳۱، ۹/٤۵، ۱۷/۹، ۳۰/۸٦، ٤۳/٦۷ و ۵٦/۸۹ کیلومتر از سایت قرار دارند و بزرگ‌ترین زلزله محتمل از جابه‌جایی مجدد این قطعات، بزرگای (Mw) ٦ را دارد.

چشمه لرزه‌ای شمارهٔ ۲ نیز از شاخه‌های گسل البرز است و در فاصلهٔ دورتری نسبت به سایت قرار دارد. قطعات گسلی در فواصل ۳٤، ٦۵، ۵٤، ٤۳، ۳۵، ۳۵ و ٤۲ کیلومتری روستا قرار داشته و در اثر فعالیت مجدد سبب حداکثر زمین لرزه‌ای با بزرگای (Mw)۵/۲ می‌شوند.

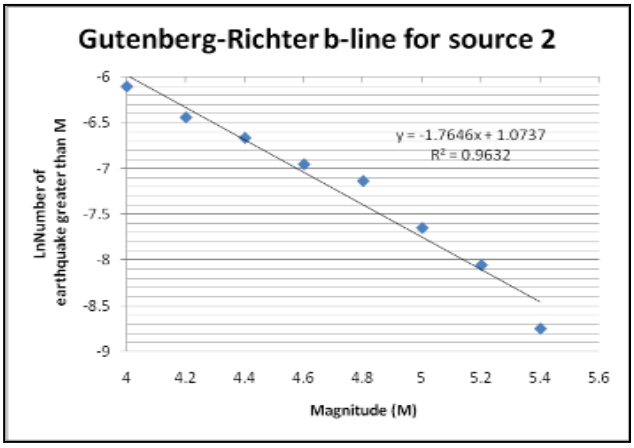
در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار گوتنبرگ–ریشتر رابطهٔ بین بزرگی و فراوانی زلزله و تفاوت سرشت لرزه‌ای در این دو چشمه لرزه‌ای را نشان می‌دهد.

1. Probabilistic Seismic Hazard Analysis
2. Peak Ground Acceleration

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]




**شکل ۷. نمودار گوتنبرگ ـ ریشتر، چشمه شمارهٔ یک**



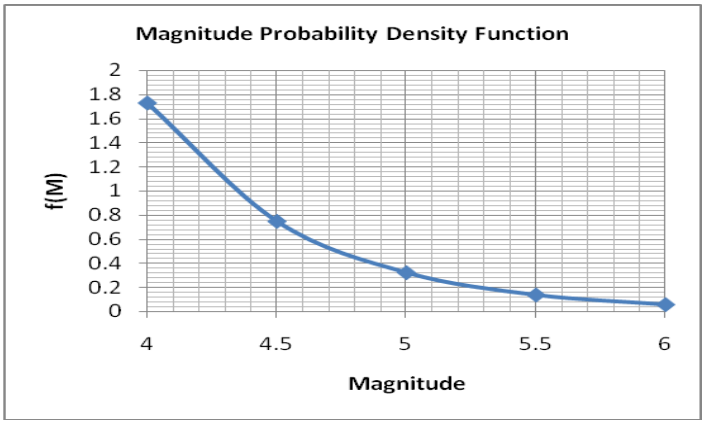

**شکل ۸. نمودار گوتنبرگ ـ ریشتر، چشمهٔ شمارهٔ دو**

### پارامتر جنبش نیرومند زمین

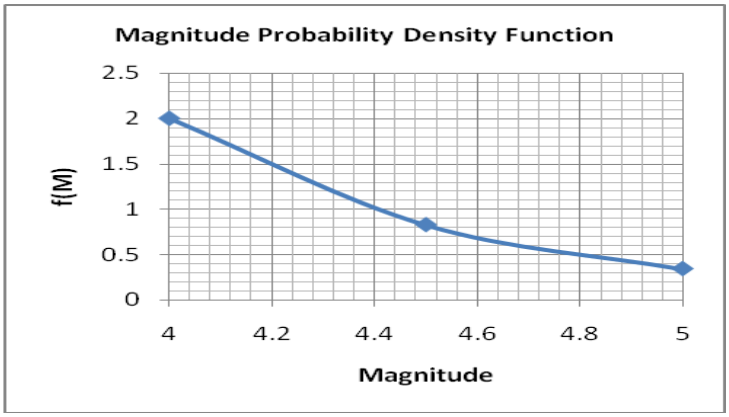
بیشینه بزرگی چشمه‌های خطی بر اساس روابط تجربی بین طول گسل و بزرگی زلزله، دورهٔ بازگشت زلزله‌ها و یا بزرگ‌ترین زلزله گزارش شده در دورهٔ آماری طولانی به‌دست می‌آید، در این تحقیق بیشینهٔ زلزله برای چشمه شمارهٔ یک ٦ و برای چشمه شمارهٔ دو، ٦/٨ ریشتر تعیین شده است. مقادیر بزرگا را می‌توان با تابع توزیع احتمال زمین لرزه مرتبط دانست. این تابع متأثر از کوچک‌ترین زمین‌لرزه، بزرگ‌ترین زمین‌لرزه و ضریب لرزه‌خیزی هر چشمه است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار تابع چگالی احتمال برای چشمه‌های لرزه‌ای در بردارنده سایت کمرود را نشان می‌دهد.




**شکل۹. نمودار تابع چگالی احتمال چشمه شمارهٔ یک**




**شکل۱۰. نمودار تابع چگالی احتمال چشمه شمارهٔ دو**

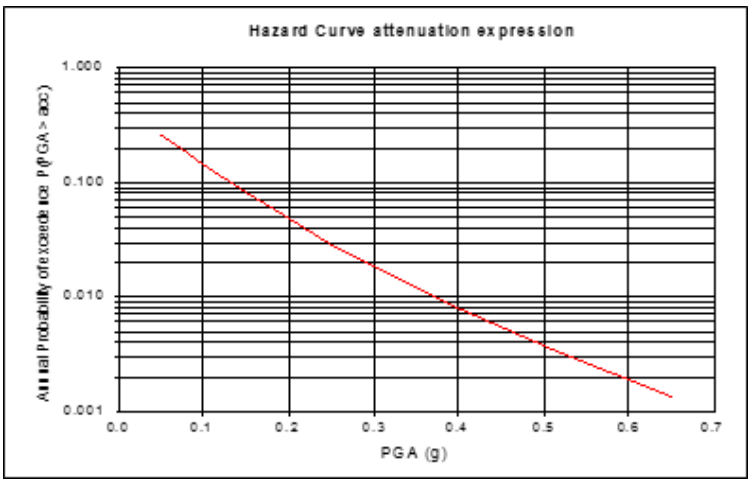
پارامتر جنبش نیرومند زمین در سایت کمرود با استفاده از رابطهٔ کاهندگی (زارع، ۲۰۰٤) [۲۸] در بازه‌های مورد نظر محاسبه و در جدول ۱ و شکل‌های ۱۲ و ۱۱ نشان داده می‌شود.

Log(SA)=a1.M+a2.M^2+b*Log(R)+ci.Si+s.P ( Zare, 2004) (۱)

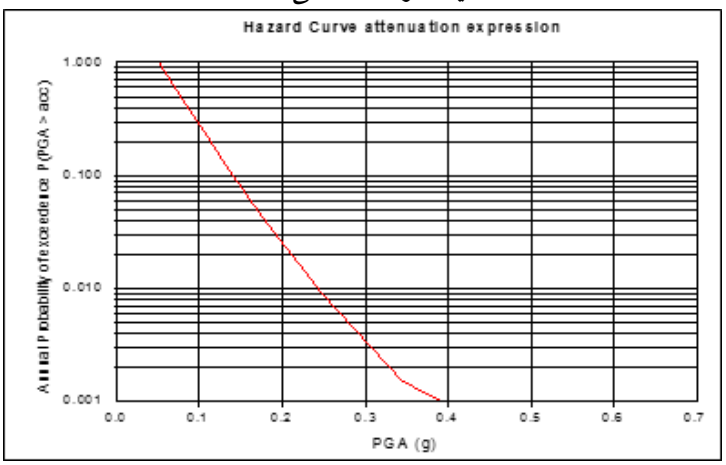
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

**جدول ۱. پارامترهای جنبش نیرومند زمین در سایت کمرود با استفاده از رابطهٔ کاهندگی زارع ۲۰۰٤**

| PGA | a1 | a2 | b | c1 | c2 | c3 | c4 | s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AL.V | ۰/۲۸۹۹ | −۰/۰۰۱۵ | −۰/۷۵۸٤ | −۱/٦۹۵ | −۱/۸٤۹۳ | −۱/٦۹٦۳ | −۱/۸۳۱٤ | ۰/۲۳۰۹ |
| AL.H | ۰/۲۳۳۸ | ۰/۰۰۰۳ | −۰/٤۹۳۲ | −۱/۷۰۸۱ | −۱/٦٤٤۵ | −۱/۵۰۸۷ | −۱/۷۲٤۹ | ۰/۲٤۲۱ |




**شکل۱۱. نمودار خطر نهایی بر حسب PGA و احتمال رخ‌داد سالیانه زمین‌لرزه در چشمهٔ شمارهٔ یک در حالت افقی**




**شکل۱۲. نمودار خطر نهایی بر حسب PGA و احتمال رخ‌داد سالیانه زمین لرزه در چشمهٔ شمارهٔ دو در حالت افقی**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

با ادغام جدول‌های مربوط به شتاب‌های مختلف در هر دو چشمه لرزه‌ای، منحنی خطر لرزه‌ای برای گستره سایت کمرود تحت تأثیر هر دو چشمه به‌دست می‌آید (جدول ۲ و شکل۱۳). با توجه به شکل ۱۳ برای یک دورهٔ بازگشت ۵۰ ساله مقدار PGA سایت در حالت افقی برابر با ۰/۲۹۳g است.

**جدول ۲. ترکیب حداکثر شتاب‌های به‌دست آمده در ۲ چشمه در حالت افقی**

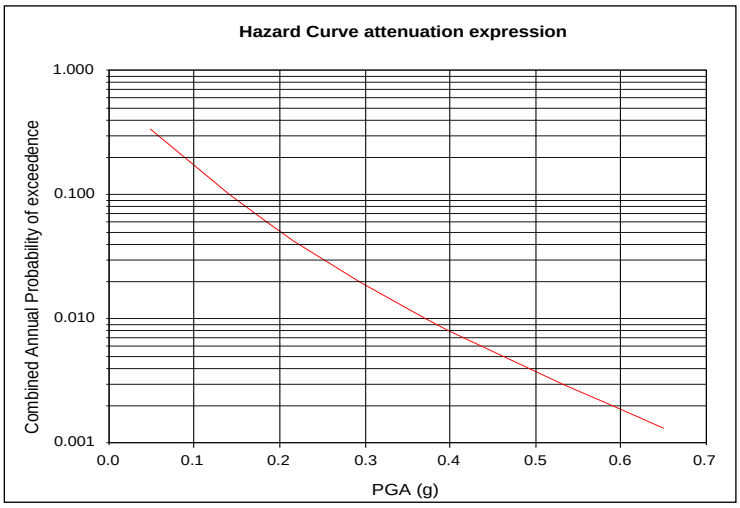
| Acc | P (PGA > acc) S1 | P (PGA > acc) S2 | P (PGA > acc) Combined |
|---|---|---|---|
| ۰/۰۵ | ۰/۲۲۷٤۵۰۲ | ۰/۰۹٤۷۸۱۵۵٦ | ۰/۳۳۱۹٤۰۵۷۳ |
| ۰/۱ | ۰/۱۳۵۳۲٦۳۱۱ | ۰/۰۲۷۷٤۳۷۲۳ | ۰/۱٦۹٤٤۷۸۹۱ |
| ۰/۱۵ | ۰/۰۷۸۷٤۳۲۹۳ | ۰/۰۰۸۰۷۹۷۳۵ | ۰/۰۸۹٤٦۳۷٤۵ |
| ۰/۲ | ۰/۰٤٦۹۰۲۵۹٦ | ۰/۰۰۲٦۰٦۹۳۷ | ۰/۰۵۰۵۲۳۱۱۸ |
| ۰/۲۵ | ۰/۰۲۸۷۷۸۰۳ | ۰/۰۰۰۹۳۱۷۲۹ | ۰/۰۳۰۱۰۵۱۸۱ |
| ۰/۳ | ۰/۰۱۱۸۱۷۸۰۱ | ۰/۰۰۰۳٦۳٦۲۱ | ۰/۰۱۸۷۰۲۲۷۵ |
| ۰/۳۵ | ۰/۰۱۱۷۹۳۲۷۵ | ۰/۰۰۰۱۵۲۸۰٦ | ۰/۰۱۲۰۱٤۳۷۲ |
| ۰/٤ | ۰/۰۰۷۸۳۷۰۱۹ | ٦/۸۳۵۲۹E-۰۵ | ۰/۰۰۷۹۳۵۷۰۷ |
| ۰/٤۵ | ۰/۰۰۵۳۲۰٦۹۹ | ۳/۲۲٤۸۲E-۰۵ | ۰/۰۰۵۳٦٦۹۸۱ |
| ۰/۵ | ۰/۰۰۳٦۸۱۹۲۵ | ۱/۵۹۲۹۱E-۰۵ | ۰/۰۰۳۷۰٤۵۹ |
| ۰/۵۵ | ۰/۰۰۲۵۹۱٦۹۳ | ۸/۱۸۹۳٤E-۰٦ | ۰/۰۰۲٦۰۳۲۲۵ |
| ۰/٦ | ۰/۰۰۱۸۵۲۳۷۵ | ٤/۳٦۰۹۱E-۰٦ | ۰/۰۰۱۸۵۸٤٤٦ |
| ۰/٦۵ | ۰/۰۰۱۳٤۲۳۰٦ | ۲/۳۹۵۷۹E-۰٦ | ۰/۰۰۱۳٤٤۵٦۰۱ |

## ویژگی‌های ژئوتکنیکی سایت

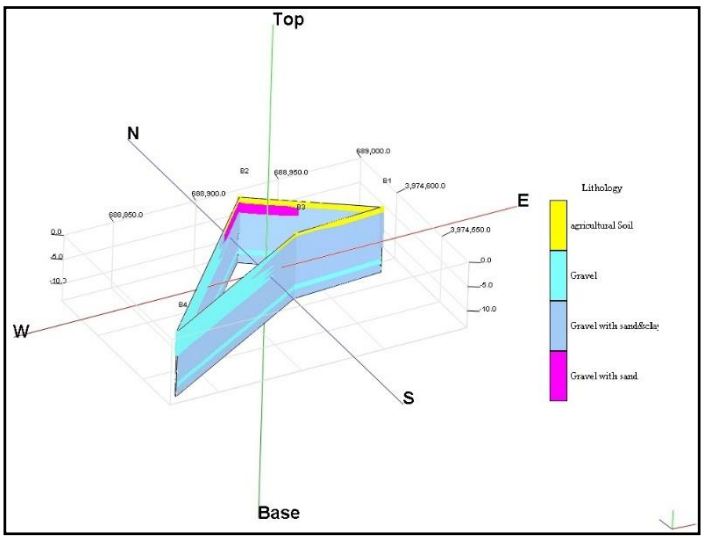
برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح در سایت علاوه بر برداشت نمونه از رخنمون‌ها، چهار گمانه حفر و ویژگی و تنوع جنس لایه‌ها در این گمانه‌ها برسی می‌شود (جدول ۳ و شکل ١٤). بر این اساس در بخش جنوب‌غربی سایت، از سطح زمین تا عمق ۵ متری، گراول درشت‌دانه و به‌سمت شرق، ماسه و رس به گراول افزوده می‌شوند. در بخش شمالی سایت، در عمق کم، ابتدا فقط ماسه به‌همراه گراول دیده می‌شود و پس از آن رس نیز افزوده می‌شود. در

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

بخش میانی سایت در عمق حدود ۱۱ متری، گراول تمیز با ضخامت حدود ۱ متر در بین لایه‌های گراول به همراه ماسه و رس، دیده شده است.




**شکل۱۳. نمودار تلفیق خطر نهایی بر حسب PGA افقی و احتمال رخ داد سالیانه زمین لرزه در گسترهٔ سایت متأثر از چشمه‌های لرزه‌ای**




**شکل ١٤. نمودارهای نرده‌ای در راستای جنوب‌غرب ـ شمال و شرق‌جنوب‌شرق ـ شمال با بزرگ‌نمایی عمودی ۳**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

**جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی مصالح درگیر در لغزش سایت کمرود**

| Id | Depth (m). | USCS | γt (gr/cm3). | γd (gr/cm3). | γsat (gr/cm3) | W% | SPT (N). |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TP1 | ۱ | SW | --- | --- | | --- | --- |
| | ۳/۵ | SW | ۱/٦٤ | ۱/٥۳ | ۱/۹٦ | ۷/٥۰ | ٦۳/٦ |
| | ٥/۳ | SW | --- | --- | --- | --- | --- |
| | ٥/۸ | SP-SC | --- | --- | --- | --- | --- |
| TP2 | ۰/٥ | SP | ۱/٥۸ | ۱/٥۳ | ۱/۹٦ | ۳/۲۷ | --- |
| | ۲ | SP | ۱/٦۲ | ۱/٥٤ | ۱/۹۷ | ٥/٥۰ | ۳۸/۸ |
| | ۳ | GW | --- | --- | --- | --- | --- |
| | ٤ | SP | ۲/۱۰ | ۱/۹٤ | ۲/۲۲ | ۸/۱٥ | ۳۸/۸ |
| | ٥ | SW | --- | --- | --- | --- | --- |
| Tp3 | ۲ | SP | ۱/٥۹ | ۱/٤۱ | ۱/۸۹ | ۱۲/٤٥ | ٤۲ |
| | ۳/۳ | GP | ۱/٤٦ | ۱/۲۹ | ۱/۸۱ | ۱۲/۹٦ | --- |
| | ٤/۲ | GP | ۱/٦۱ | ۱/٤۲ | ۱/۸۹ | ۱۳/٥٦ | ۲۳/٦ |
| | ٦ | SW-SC | ۱/۷۰ | ۱/٥۱ | ۱/۹٥ | ۱۲/٦۷ | ۱٦ |
| | ۸ | GP | ۱/۷٦ | ۱/٥٦ | ۱/۹۸ | ۱۲/۳۳ | ۲۲/٤ |
| | ۱۰ | SP | ۱/٦۲ | ۱/۳۹ | ۱/۸۷ | ۱٦/٥۰ | ۲۳/۲ |
| | ۱۱ | SC | --- | --- | --- | --- | --- |
| TP4 | ۲/٥ | SP | ۱/٥۷ | ۱/٤۳ | ۱/۹۰ | ۹/۸٦ | ۲۰/٤ |
| | ۳/۳ | SW | ۱/٦۹ | ۱/٥٤ | ۱/۹۷ | ۱۰/۲۲ | ۲۸ |
| | ٤ | GW | --- | --- | -- | --- | --- |

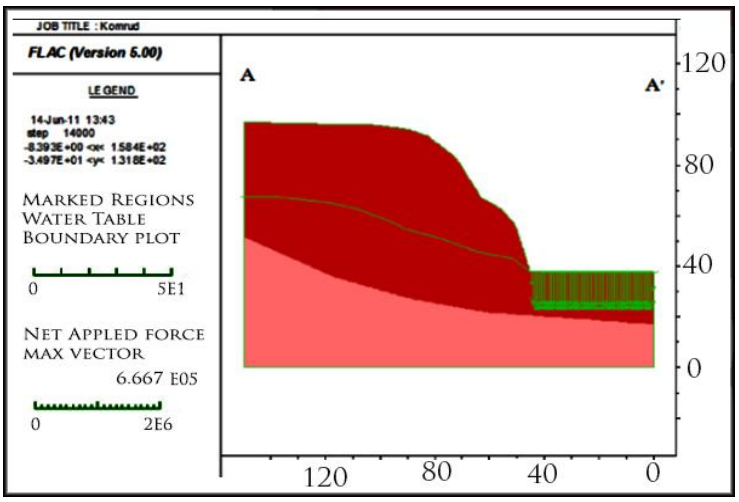
## نتایج و بحث

### اثر شتاب افقی زمین لرزه و تحلیل شبه دینامیک ناپایداری دامنه‌ها

برای تحلیل پایداری و جابه‌جایی زمین سه روش نیمه‌تجربی، تحلیلی و عددی وجود دارد [۲۹]. در این تحقیق از روش شبه دینامیک استفاده و در آن ضریب دینامیکی به‌وسیله بردار بین شتاب گرانش زمین و شتاب افقی زمین لرزهٔ مورد نظر محاسبه و در مدل اعمال شد. مدل‌سازی رفتار تنش_ واتنش خاک، با نرم‌افزار FLAC 2D 5.00 در مدل ساختاری الاستو

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

پلاستیک، به‌همراه معیار گسیختگی موهر-کولمب [۳۰]-[۳۳]. انجام و اثر افزایش شتاب ثقل زمین تا حداکثر شتاب احتمالی بر شیروانی به‌صورت جابه‌جایی افقی موقعیت مبنا محاسبه و ثبت شده است. در مدل‌سازی، ابعاد و هندسه مدل فرضی به‌گونه‌ای انتخاب شد که مرزها در نتایج تحلیلی مدل تأثیرگذار نباشند. مشخصات و پارامترهای ژئوتکنیکی مدل تیپ بر اساس میانگینی از دامنهٔ تغییرات پارامترها و در نهایت با قضاوت مهندسی تعیین شده است. در این مدل سطح فراتیک براساس فشار آب و دانسیتهٔ اشباع تعریف شده است [۱۸] (جدول٤، شکل۱۵). هم‌چنین اثرات کمّی پارامتر شتاب احتمالی زمین‌لرزه احتمالی در زمین‌لغزش کمرود با تحلیل حساسیت با توجه به ارتباط جابه‌جایی افقی زمین و رخداد زمین لغزش انجام شد و تأثیر آن تأئید شد.



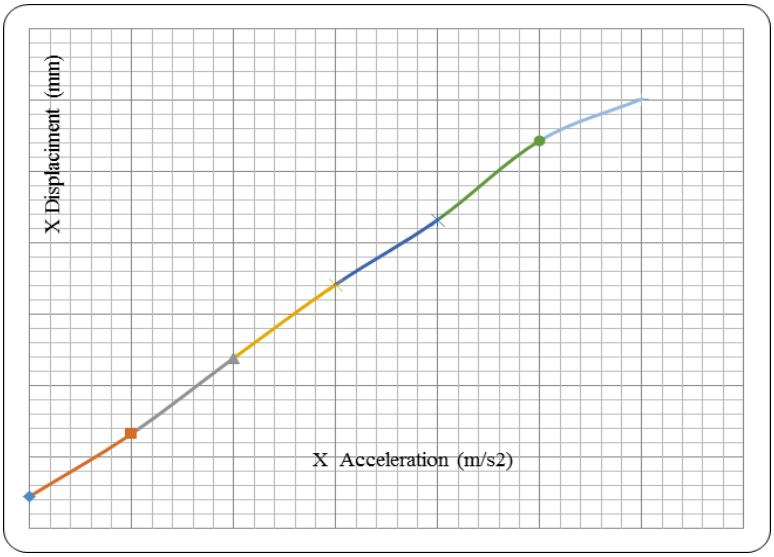

**شکل ۱۵. مقطع تیپ هندسه شیروانی کمرود، سنگ کف به‌رنگ صورتی، مصالح خاکی قرمزرنگ، سطح فراتیک با خط سبز و تنش وارد بر پاشنه شیروانی با پیکان سبز نشان داده شده است.**

**جدول ٤. خصوصیات خاک مقطع تیپ.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| density (Kg/m3). | ۱۷۸۰ | Elastic Modulus (MPa). | ۳۰ |
| Satured Density (Kg/m3). | ۲۰۱۵ | Poisson Ratio | ۰/٤ |
| cohesion Pa | ۲۸۱۷ | Dilation | ۰ |
| friction Angle | ۲۸ | Tension | ۰ |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

در شکل ۱۶ با توجه به مقادیر جنبش نیرومند زمین، میزان جابه‌جایی در اثر نیروی وارد شده بر اثر افزایش شتاب در شرایط شبه دینامیک مدل شده و تغییرات جابه‌جایی افقی موقعیت مبنا نسبت به افزایش شتاب، تا رسیدن به حداکثر شتاب ($۲/۸۷m/s^۲$) را نشان می‌دهد.




**شکل ۱۶. نمودار اثر شتاب ثقل افقی زمین بر جابه‌جایی افقی زمین در شیروانی کمرود.**

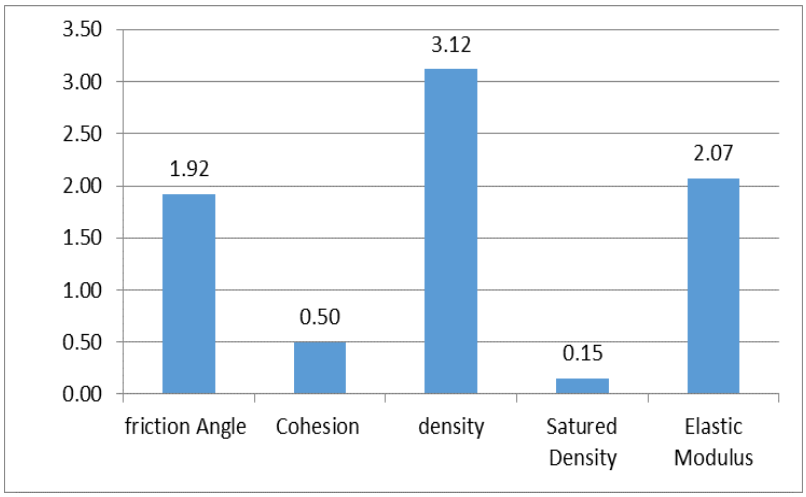
**تأثیرگذازی پارامترها بر ناپایداری دامنه‌ها**

در این تحقیق برای ارزیابی حساسیت رانش زمین نسبت به پارامترهای فیزیکی و مقاومتی خاک، پنج پارامتر زاویهٔ اصطکاک، چسبندگی، دانسیتهٔ طبیعی، دانسیتهٔ اشباع، مدول الاستیسیته تعیین و برای مشخص کردن اثر کمی هر پارامتر، شاخص حساسیت (SI) و شاخص اثر (EI) سنجیده شد (شکل‌های ۱۷و۱۸).

شاخص اثر (EI) نمایانگر تغییر جابه جایی و در نهایت پایداری تحت تأثیر هر پارامتر می‌باشد. شاخص اثر برای وزن مخصوص ۳/۱۲ ، مدول الاستیسیته ۲/۰۷ ، زاویه اصطکاک ۱/۹۲ و برای چسبندگی و دانسیته اشباع زیر سطح فراتیک به ترتیب ۰/۵۰ و ۰/۱۵ درصد می‌باشد. این نتایج نشان می دهد که افزایش وزن مخصوص مواد رانشی منجر به افزایش

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

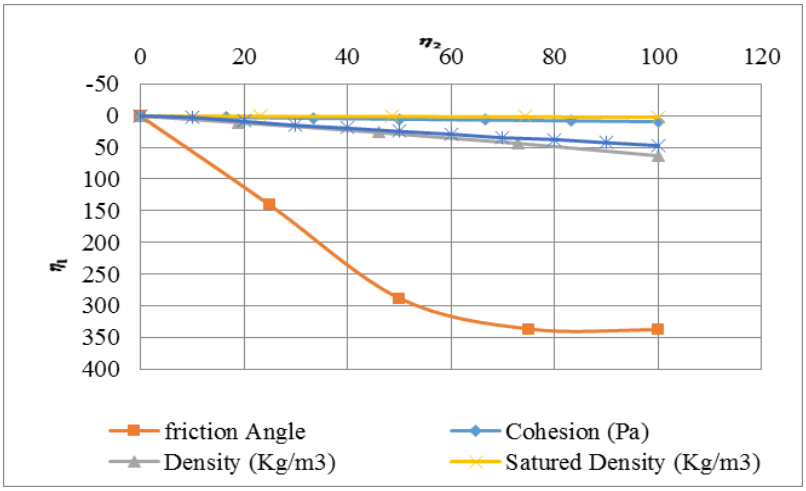
اعمال نیروی رانش زمین می‌گردد و افزایش وزن مخصوص توده، قابل اعتناترین وجه وقوع رانش زمین در این ناحیه است.




**شکل ۱۷. نمودار شاخص اثر برای پارامترهای مقاومتی و فیزیکی**

نمودار شکل ۱۸ نشان‌دهندهٔ هم‌بستگی بین نسبت تغییرات جابه‌جایی افقی و پارامترهای تأثیرگذار در وقوع لغزش است. در این نمودار، شیب هر منحنی بیان‌گر شاخص حساسیت (EI) است. در محدودهٔ این پارامترها، میزان جابه‌جایی افقی و رانش زمین بسیار حساس به زاویهٔ اصطکاک، متعاقب آن وزن مخصوص، مدول الاستیسیته، چسبندگی و وزن مخصوص ناحیهٔ اشباع است. شیب منحنی زاویهٔ اصطکاک با افزایش ٦٠٪ پارامتر (۳۲ درجه) ثابت و سپس کاهش می‌یابد و شاخص حساسیت آن تا پایان کاهش می‌یابد. چهار پارامتر دیگر، شیب تقریباً یک‌سانی را طی می‌کنند و شاخص حساسیت و دامنهٔ تغییرات هر پارامتر یک‌نواخت است. برای مشخص کردن حساسیت رانش زمین نسبت به پارامتر شتاب زمین‌لرزه، شاخص حساسیت (SI) و شاخص اثر (EI) برای این پارامتر تعیین و شاخص اثر شتاب افقی ۷۰ درصد به‌دست آمد، این مقدار نشان‌دهندهٔ تأثیرپذیری زیاد ناپایداری شیروانی نسبت به شتاب افقی زمین‌لرزه است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]




**شکل ۱۸. نمودار شاخص حساسیت برای پارامتر های مقاومتی و فیزیکی**

## نتیجه‌گیری

منطقه کمرود از لحاظ فرآیندهای ریخت زمین‌ساختی فعال است و تشکیل شیروانی مرتفع و ناپایدار، مربوط به فرایندهای تکتونیکی کواترنر و رخداد کوهرفت عظیم ناشی از زمین لرزه‌های منطقه است. برای تحلیل پایداری شیروانی به‌روش شبه دینامیک، بار دینامیکی PGA در حالت افقی معادل ۰/۲۹۳g به مدل اعمال و مدل به‌صورت استاتیکی تحلیل شد. به‌دلیل این‌که بار اعمالی به‌صورت ثابت به کل مقطع وارد می‌شود، نتایج این روش نسبت به‌روش دینامیکی، محافظه کارانه‌تر است. با توجه به تحلیل صورت گرفته میزان جابه‌جایی افقی موقعیت مبنا در برابر بیشینه شتاب ۰/۲۹۳g حدود سه متر برآورد شده است. این مقدار جابه‌جایی شکست قطعی شیروانی را سبب می‌شود، بنابراین تنشی که شتاب افقی زمین لرزه به شیروانی وارد می‌سازد، دارای شاخص اثر و شاخص حساسیت زیادی است که نشان‌دهندهٔ ناپایداری شدید شیروانی در مقابل زمین‌لرزه است. سطح تراز آب زیرزمینی پس از شتاب زمین لرزه دارای بیش‌ترین شاخص حساسیت و هم‌چنین بیش‌ترین شاخص اثر است. در نتیجه اقدامات تثبیت شیروانی برای کاهش سطح آن مؤثر واقع می‌شود. شاخص حساسیت زاویهٔ اصطکاک بیش‌تر از وزن مخصوص و مدول الاستیسیته هستند، ولی شاخص اثر وزن مخصوص بیش‌تر

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

از مدول الاستیسیته و زاویهٔ اصطکاک است. بین پارامترهایی که مشخصات فیزیکی مدل را تعیین می‌کنند، وزن مخصوص خاک شاخص اثر بیش‌تری دارد که بیان‌گر این است که وزن شیروانی بیش‌ترین تأثیر را بر ناپایداری دامنه دارد. با توجه به این که وزن دامنه پارامتر تأثیرگذار بر ناپایداری شیروانی است، اقدامات تثبیت شیروانی باید برای کاهش و مهار وزن تودهٔ خاک عمل کند، اما به‌علت شرایط مسکونی بالادست شیب، امکان کاهش وزن شیب یا کاهش ارتفاع وجود ندارد.

## منابع


۱. بقاءدشتکی ب.، خامه‌چیان م .، *بررسی پایداری دامنه‌های سازند گچساران واقع در مخزن سد کتوند تحت تأثیر آبگیری مخزن و انحلال مصالح نمکی*، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، جلد چهارم، شمارهٔ ۱ بهار و تابستان ۱۳۸۹ (۱۳۸۹).

۲. فاطمی‌عقدا س.م .، مهدوی‌فر م ر .، باقری و.، *پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌های سرعین ناشی از زلزله ۱۰ اسفند ۱۳۷۵ با استفاده از روش کیفی*، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلدهشتم ، شمارهٔ ۳ پائیز ۱۳۹۳ (۱۳۹۳).

3. Keefer D.K., "Landslides caused by earthquakes", Bulletin of the Geological Society of America (1984).

4. Jibson R.W., Harp E. L., Michael J.M., "A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps", Engineering Geology (2000).

5. Keefer D.K., "Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution-the 1989 Loma Prieta, California event", Engineering Geology (2000).

6. Uromeihy A., Mahdavifar M.R., "Landslide hazard zonation of Khoreshrostan area, Iran", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol, 58 (3) (2000) 207-213.


[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

7. Del Gaudio V., Pierri P., Wasowski J., "An Approach to Time-Probabilistic Evaluation of Seismically Induced Landslide Hazard", Bulletin of the Seismological Society of America (2003).

8. Lan H.X., Zhou C.H., Wang L.J., Zhang H.Y., Li R.h., "Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed", Engineering Geology, Vol. 76 (1-2) (2004).

9. Glade T., Anderson M.G., Crozier M.J., "Landslide hazard and risk", John Wiley Press (2005).

10. Jibson R.W., "Regression models for estimating coseismic landslide displacement", Engineering Geology (2007).

11. Miles S.B., Keefer D.K., "Comprehensive areal model of earthquake-induced landslides: Technical specification and user guide", U.S. Geological Survey (2007).

12. Pradhan B., Lee S., "Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia", Landslides (2009).

13. Rossi M ., Guzzetti F ., Reichenbach P ., Mondini A.C., Peruccacci S., "Optimal landslide susceptibility Zonation based on multiple forecasts", Geomorphology, Vol,114(3) (2010).

۱٤. مهدویفر م. ر.، *ارزیابی تحلیلی و طراحی سامانه مدیریت ریسک زمین‌لغزش های ناشی از زلزله در کشور*، پایان نامه دکتری. ژئوفیزیک گرایش زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸۵).

۱۵. رجبی ع. م.، *بررسی احتمالی خطر زمین‌لغزش های ناشی از زلزله در ایرا ن*، پایان‌نامهٔ دکتری زمین‌شناسی گرایش مهندسی، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس تهران (۱۳۸۹).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

۱۶. سلطانی‌چیقه ح.، شیردل ن.، *بررسی عوامل ناپایداری شیروانی مشرف بر نوار نقاله مجتمع مس سونگون و پایدارسازی آن*، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلدهفتم ، شمارهٔ ۲ پائیز و زمستان ۱۳۹۲ (۱۳۹۲).

۱۷. نبوی م.ه.، *نقشهٔ زمین‌شناسی سمنان*، مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، وزارت صنعت معدن و تجارت ، سازمان زمین شناسی کشور (۱۳٦٦).

۱۸. اشرفیان م.، *تأثیر پارامترهای زمین شناسی مهندسی بر ناپایداری شیب‌های منطقه کمرود*، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، زمین‌شناسی مهندسی.، دانشگاه آزاداسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (۱۳۹۰).

۱۹. سلیمانی ش.، حسینی س.م.، *تحلیل خطر زمین لرزه با رهیافت تعیینی برای نیروگاه منتظرقائم.*، پژوهشگاه بین‌المللی زلزل‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۷۷).

20. Beavers, J.E., "Advancing mitigation technologies and disaster response for lifeline systems", proceedings of the sixth U.S. Conference and Workshop on Lifeline Earthquake Engineering, August 10-13, 2003, Long Beach, California. 2003: American Society of Civil Engineers (2003).

21. Reiter L., "Earthquake hazard analysis: issues and insights", Columbia University Press (1990).

22. Engineering I.A.f.E., "Earthquake engineering & structural dynamics", 1996: J. Wiley (1996).

23. Day, R.W., "Geotechnical earthquake engineering handbook", McGraw-Hill. (2002).

24. Engineers A.S.C., "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", Asce 7-05. American Society of Civil Engineers (2010).

25. Oliveira C.S., Roca A., Goula X., "Assessing and managing earthquake risk: geo-scientific and engineering knowledge for earthquake risk mitigation: developments, tools, techniques", Springer (2006).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]

26. Papadrakakis M., Stefanou G., Papadopoulos V., "Computational Methods in Stochastic Dynamics", Springer ( 2010).

27. Prasad B.B., "Advanced Soil Dynamics and Earthquake Engineering", PHI Learning Pvt. Ltd. (2004).

۲۸. زارع م.، *مقدمه‌ای بر زلزله‌شناسی کاربردی*، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (۱۳۸٤).

۲۹. حسینی س.، شهریار ک.، منجزی م.، *پیش‌بینی جابه‌جایی زمین اطراف تونل در اثر حفاری با دستگاه EPB (مطالعه موردی قطعه چهارم از خط ۳ متروی تهران)*.، نشریه‌زمین‌شناسی مهندسی، جلد پنجم ، شمارهٔ ۲ پائیز و زمستان ۱۳۹۰ (۱۳۹۰).

30. Wyllie D.C., Mah C.W., Hoek E., "Rock slope engineering: civil and mining", Spon Press. (2004).

31. Day R.W., "Geotechnical engineer's portable handbook", McGraw-Hill., (2000).

32. Li J., Chen J., "Stochastic dynamics of structures", Wiley (2009).

33. Hustrulid W.A., McCarter M., Zyl D.J.A.V., "Slope stability in surface mining", Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (2000).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.1.5 ]

[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3537 ]