

دو فصلنامه کواترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۹، شماره ۲ و ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۲  
ص ۲۵۴ تا ۲۷۰

## اثر مخاطرات طبیعی کواترنری بر پهنه بندی خطر سقوط سنگ به روش سیستم مهندسی سنگ (مطالعه موردی استان تهران)

علی خسرو نژاد؛ دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

محسن پور کرمانی<sup>\*</sup>؛ دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

محمود الماسیان؛ دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

سهیلا بوذری؛ دانشکده علوم زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

علی ارومیه‌ای؛ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۴

### چکیده

سقوط توده‌های سنگی هر ساله خسارات جانی و مالی سنگینی را به بار می‌آورد. استان تهران به عنوان یکی از پر جمعیت ترین استان‌های کشور، دارای سازه‌های پیشرفته بوده و به همین سبب ترانشه‌های بی شماری در توده‌های سنگی احداث شده است. همین مسئله خطر سقوط سنگ را نسبت به دیگر مناطق افزایش داده است. شرایط جوی و تکنیکی که در دوره زمین شناسی کنونی بر کشور ایران حاکم است، اثر ویژه‌ای بر ناپایداری‌های دامنه‌ای دارد. در این راستا، پس از بررسی پارامترهای مؤثر در سقوط سنگ، نقشه مربوط به هر پارامتر با استفاده از نقشه‌های پایه زمین‌شناسی و داده‌های تکمیلی برای استان تهران تهیه گردید. سپس با استفاده از مدل تحلیل سیستم مهندسی سنگ، هر یک از پارامترها متناسب با درجه اهمیت آن‌ها محاسبه و نهایتاً با انجام همپوشانی عوامل وزن دار شده، نقشه سقوط سنگ استان تهران تهیه گردید. در این نقشه ارتباط تعریف شده‌ای بین مناطق کوهستانی، تغییرات شیب و محل گسل‌های اصلی با افزایش خطر سقوط سنگ دیده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد زمین لغزش‌ها و ناپایداری‌های دامنه‌ای قبلی نیز در پهنه‌هایی با خطر بسیار زیاد تا زیاد واقع شده‌اند. توسعه شهری در مناطق کوهستانی نیازمند توجه به مخاطرات زمین شناختی است. خطر سقوط سنگ به عنوان یکی از اصلی ترین پارامترها در این خصوص، نقش مهمی را در کاهش خسارات سنگینی دارد که هر ساله به مردم و دولت اعمال می‌گردد. پیشنهاد می‌گردد تا نتایج این مطالعات پس از بازنگری، به عنوان اطلاعات مبنایی در طراحی‌های آتی استان تهران مد نظر قرار گیرد.

واژگان کلیدی: سقوط سنگ، کواترنر، زمین شناسی، ناپایداری دامنه، سیستم مهندسی سنگ.

## مقدمه

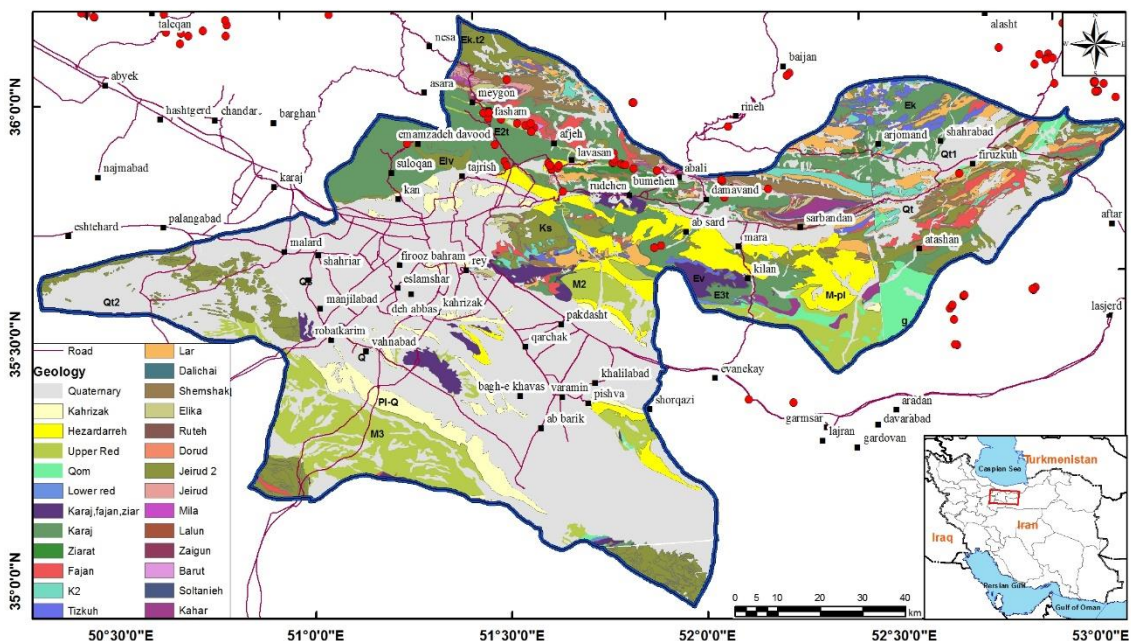
شهر تهران به عنوان مهم‌ترین مرکز سیاسی-اقتصادی و جمعیتی کشور ایران شناخته می‌شود و سنگ ریزش به عنوان مخاطره طبیعی همواره خسارات فراوانی را به همراه داشته که شناسایی عوامل موثر در وقوع این پدیده از اهمیت بسزایی برخوردار است. در اغلب اوقات خطر ناشی از سنگ ریزش را نمی‌توان دفع نمود. زیرا تنوع مکانی و زمانی وقوع این پدیده بسیار بالا می‌باشد. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی پارامترهای دخیل در سقوط سنگ از ارتفاعات در استان تهران است. آنچه در زمین شناسی به عنوان بازه زمانی کواترنر شناخته می‌شود مربوط به ۲.۵ میلیون سال گذشته تا به امروز است. تغییر رژیم تکتونیکی و راستای تنش حاکم بر کشور ایران از یک سو و تغییرات آب و هوایی خصوصاً آب پایان آخرین عصر یخبندان در یانگردریاس، سبب شده تا ناپایداری‌های دامنه‌ای به طور گسترده در ایران نمود یابد. از طرف دیگر خشک شدن ابر دریاچه باستانی ری (Jarahi, 2019; Jarahi, 2021; Jarahi et al., 2022a; Najafian A. et al., 2022) به عنوان اصلی ترین منابع تامین آب و چرخه اقلیم شناختی ایران مرکزی و رشته کوه های البرز جنوبی، موجب تغییر سطح اساس رودخانه ها و کف کنی آن ها شده است. عمیق شدن بستر رودخانه ها و تشکیل تراس های آبرفتی، به تنهایی یکی از عوامل شکل گیری دامنه های ناپایدار، به ویژه در گستره تهران است. سقوط سنگ به عوامل متنوع وابسته است. این عوامل به طور کلی بر ابعاد، سرعت، تعداد، زمان و میزان خسارت وارده ناشی از سقوط سنگ اثر گذار هستند. روش های آمار مبنا که اغلب به کمک مدل سازی نرم افزاری صورت می گیرد، ابزاری قدرتمند برای برآورد خطر سنگ ریزش و طراحی سیستم های حفاظتی به شمار می آید. چنین مدل سازی هایی نیازمند بررسی از هم گسیختگی اجزاء سنگ، ابعاد هر قطعه، خرد شدگی، سرعت و ... دارد (Evans and Hungr, 1993; Guzzetti et al., 2002; Hutchinson, 1988). فارغ از محدودیت ابعاد، سنگ ریزش ها به واسطه انرژی بالا و تحرک زیاد خود شناخته می شوند. فرآیند دینامیکی سنگ ریزش ها، تحت تاثیر ویژگی های زمانی و مکانی مانند وضعیت از هم گسیختگی، شاخص های هندسی و مکانیکی قطعات سنگ و دامنه های سنگی است (Jaboyedoff et al., 2005). به همین رو قابلیت تحلیل نرم افزاری در مدیریت و استفاده با بازدهی بالا از اطلاعات مکانی، نقش بسیار مهمی را در بررسی خطر سنگ ریزش بر عهده دارد. در زمینه بررسی پایداری توده سنگ ها در ترانشه ها و دامنه های طبیعی روش های مختلفی وجود دارد که به دو دسته کلی روش های تجربی و تئوریک قابل طبقه بندی هستند. این روش ها بسته به سازوکار گسیختگی، بسیار متفاوت هستند. از جمله روش های تجربی موجود می توان به روش روما (Romana, 1985) اشاره نمود که روشی نسبتاً مناسب و کامل و پر کاربرد محسوب می شود. روش های تئوریک نیز در ابتدا به تفصیل توسط هوک و بری (Hoek and Bray, 1981) معرفی گردیده اند که بعدها توسط سایر پژوهشگران نیز مطالعات گسترده تری بر روی آن ها صورت گرفته است. تمامی روش های به کار برده شده برای ارزیابی سقوط توده سنگ، پارامترهایی نظیر فرسایش، بلوک دهی، درجه هوازدگی و فاصله داری ناپیوستگی ها را مد نظر قرار می دهند.

ریزش سنگ زمانی اتفاق می افتد که توده های سنگ از صخره جدا می شوند و آزادانه تحت تاثیر گرانش قرار می گیرند (Blahūt et al., 2013; Youssef et al., 2015) و مسیر را با حرکات جهشی، لغزشی و غلشی در امتداد یک سطح شیبدار طی می کند (Jarahi and Seifilaleh, 2016; Leine et al., 2013). این نوع مخاطرات طبیعی بسته به حجم و سرعت بلوک در حال سقوط، می تواند باعث آسیب جدی در مناطق کوهستانی شود و زندگی انسان و ایمنی سازه های مهندسی (مانند راه آهن، جاده ها و بزرگراه ها) را تهدید کند. بنابراین ریزش سنگ در بسیاری از موارد به عنوان یک بلای طبیعی شناخته می شود. اثرات مختلف زمین شناسی، ژئومورفولوژی، اقلیم شناسی و انسانی ممکن است در وقوع ریزش سنگ نقش داشته باشد. مهمترین این عوامل عبارتند از چرخه های انجماد-ذوب (Matsuoka and Sakai, 1999; McCarroll et al., 1998)، شتاب های افقی و عمودی ناشی

از فعالیت‌های زمین‌لرزه، انفجار، حرکت ماشین‌های خاکی سنگین (Abebe et al., 2010; Ding et al., 2001; Dorren, 2003; Vidrih et al., 2001) اختلاف هوازدگی در یک توالی از سنگ‌های ضعیف و سخت (Binal and Ercanoglu, 2010) رشد ریشه درخت (Topal et al., 2011). بنابراین، چندین پارامتر را می‌توان به عنوان عوامل محرک ریزش سنگ فهرست کرد. با این وجود، عوامل زمین‌شناسی، توپوگرافی، و آب و هوا همراه با زمان، پتانسیل وقوع ریزش دامنه‌ها را تعیین می‌کند. به طور کلی برتری پژوهش حاضر در به کار بردن روش تحقیق است. در این روش آن‌طور که اشاره خواهد شد، از روش سیستم مهندسی سنگ جهت وزن‌دهی پارامترها، بهره گرفته خواهد شد. ویژگی این روش در تعامل دو سویه و اثر متقابل هر پارامتر بر پارامتر دیگر و بر عکس است. همین امر سبب شده تا نتایج بیش از پیش واقع بینانه و به ماهیت طبیعی سنگ ریزش‌ها نزدیک باشد. در ادامه به بررسی روش منتخب پژوهش پرداخته خواهد شد. سپس لایه‌های اطلاعاتی مورد بررسی، وزن‌دهی و تحلیل واقع و در نهایت نقشه پهنه‌بندی سقوط سنگ استان تهران تهیه خواهد شد.

### مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل استان تهران به مرکزیت شهر تهران، با وسعتی حدود ۱۲'۹۸۱ کیلومتر مربع، بین ۳۴ تا ۳۶/۵ درجه عرض شمالی و ۵۰ تا ۵۳ درجه طول شرقی واقع شده است. تهران در پهنه‌ای بین دو وادی کوه و کویر و در دامنه‌های جنوبی البرز گسترده شده و ۱۱۹۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد (Maghsoudi, 2021). این شهر از سمت جنوب به کوه‌های ری و بی‌بی‌شهربانو و دشت‌های هموار شهریار و ورامین و از شمال به واسطه کوهستان محصور شده است. حداکثر و حداقل مطلق درجه حرارت تهران ۴۱ تا -۶ درجه سانتی‌گراد است و میزان بارندگی سالیانه آن در حدود ۳۲۷ میلی‌متر می‌باشد (Bafitipour et al., 2022). تهران در سال ۴۰ روز یخبندان دارد. این شهر از نظر لرزه‌خیزی و وقوع زمین‌لرزه جزء نواحی پرخطر به شمار می‌آید. شکل ۱ موقعیت راه‌های دسترسی به نقاط مختلف استان و پراکندگی واحدهای زمین‌شناسی را نشان می‌دهد.



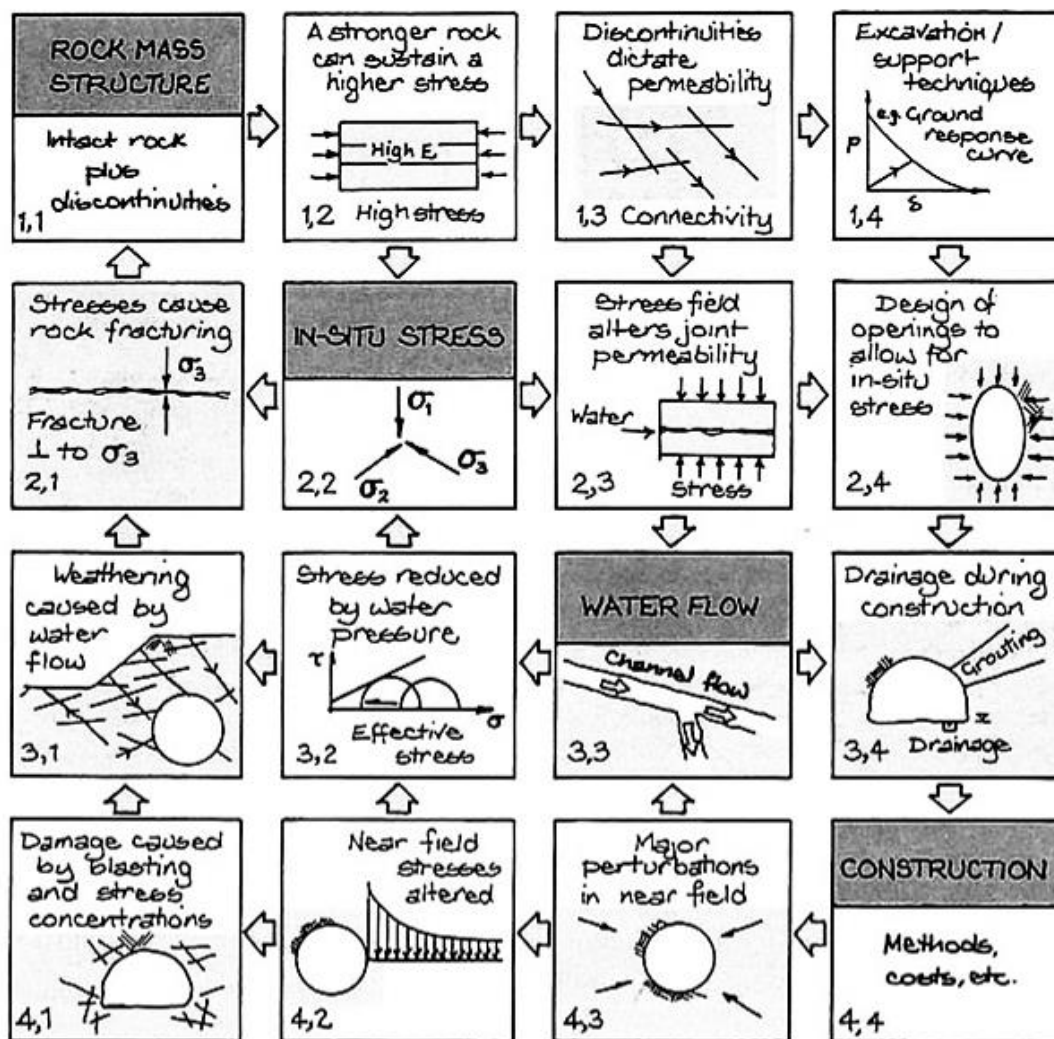
شکل ۱- موقعیت راه‌های ارتباطی، واحدهای زمین‌شناختی و ناپایداری‌های دامنه‌ای (نقاط قرمز) استان تهران

## مواد و روش های تحقیق

### روش سیستم مهندسی سنگ<sup>۱</sup>

سیستم مهندسی سنگ یک روش تحلیلی است که با مطالعه مسئله و تحلیل متغیرهای آن به تهیه یک مدل برای حل آن مسئله می‌پردازد (Hudson and Feng, 2015). ابزار اصلی این روش ماتریس اندرکنش است. این ماتریس باعث می‌شود که تاثیر تمام پارامترها بر روی سیستم و تاثیر سیستم بر روی پارامترها مورد مطالعه قرار گیرد. مدل‌های عددی و تحلیلی تنها قادر به مدل کردن قسمتی از اندرکنش بین پارامترهای مختلف هستند، اما این روش قادر به مدل کردن کامل یک سیستم است. به دلیل خاصیت علت و معلولی این اندرکنش‌ها، سیستم حالت دینامیک دارد، یعنی اینکه تغییر در یک پارامتر می‌تواند در یک رویه زنجیره‌وار مقدار آن پارامتر را کمتر کند. این تغییرات تا زمانی اتفاق می‌افتد که سیستم به تعادل برسد. به عنوان مثال برای بررسی اندرکنش‌های داخل توده‌سنگ، سه پارامتر ساختار سنگ، تنش و جریان آب مطرح است. در صورت حفاری در این توده‌سنگ می‌توان برای این مسئله یک ماتریس ۴ در ۴ رسم کرد که در شکل ۲ آمده است. در هر ردیف این ماتریس تاثیر پارامتر موجود در آن سطر بر دیگر پارامترهای سیستم قرار گرفته است. به عنوان مثال در ردیف دو و سه تاثیر پارامتر تنش برجا بر روی پارامترهای ساختار سنگ، جریان سیال و حفاری قرار گرفته است. از طرفی در هر ستون تاثیر پارامترهای سیستم بر روی پارامتر قرار گرفته در قطر اصلی نوشته شده است.

<sup>1</sup> RES: Rock Engineering System



شکل ۲- ماتریس اندرکنش حفاری در توده سنگ (McCreath, 1990)

بعد از ساخت ماتریس اندرکنش نوبت به کدگذاری خانه‌های ماتریس برای نشان دادن اهمیت‌شان و یا انجام عملیات ریاضی بر روی آن است. پنج روش برای انجام کدگذاری یک ماتریس وجود دارد:

الف) دوتایی<sup>۱</sup>: مکانیزم خانه‌های غیر قطری یا خاموش است و یا روشن، بنابراین کد هر خانه صفر یا یک است.

ب) حرفه‌ای نیمه کمی<sup>۲</sup>: یک عدد بین صفر تا چهار انتخاب می‌شود. (صفر: بدون ارتباط. یک: ارتباط ضعیف. دو: ارتباط عادی. سه: ارتباط قوی. چهار: ارتباط بحرانی.)

ج) بر اساس شیب یک رابطه خطی.

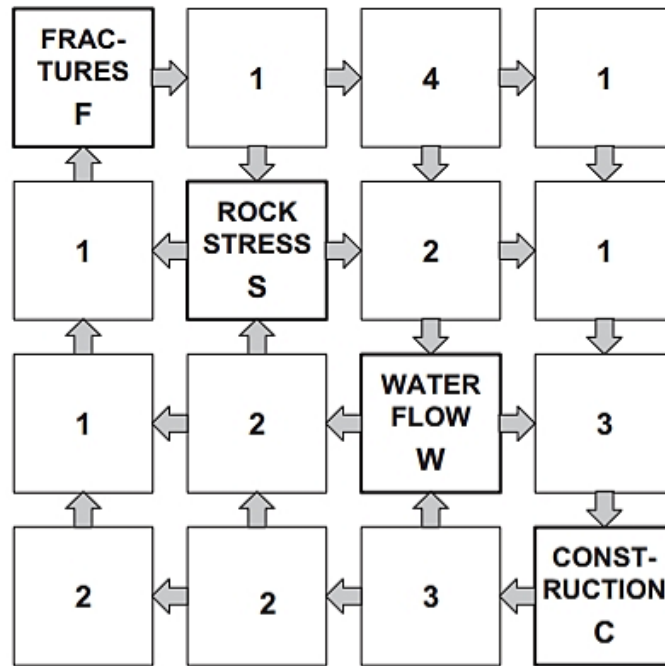
د) بر اساس روش‌های عددی‌تر مانند استفاده از روابط دیفرانسیلی

<sup>1</sup> Binary

<sup>2</sup> Expert Semi-Quantitative (ESQ)

ه) اختصاصاً بر اساس آنالیز عددی کامل سیستم

از بین این روش‌ها، روش دوم بیشتر از روش‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. به این دلیل که روش اول به اندازه کافی تفاوت بین پارامترها قائل نمی‌شود و اطلاعات لازم برای روش‌های سه تا پنج معمولاً به سختی یافت می‌شوند. روش دوم به اندازه کافی دقیق است و ارزش‌های عددی هر خانه می‌تواند توسط یک فرد یا ترجیحاً توسط گروهی از افراد آشنا به موضوع انتخاب شود. ماتریس شکل ۳ با استفاده از روش حرفه‌ای نیمه کمی کدگذاری شده است (Hudson and Feng, 2015).



شکل ۳- کدگذاری ماتریس اندرکنش (Hudson and Feng, 2015)

در ردیف اول ماتریس تاثیر شکستگی بر روی تنش برجا، جریان آب و حفاری به صورت اعداد ۱، ۴، ۱ آمده است (شکل ۳). ردیف اول شامل تاثیر شکستگی بر روی سایر پارامترهای سیستم است که جمع کدگذاری آن عدد ۶ می‌شود. از طرفی در ستون یک تاثیر دیگر پارامترها بر روی شکستگی به ترتیب ۱، ۱، ۲ که جمع آن‌ها ۴ می‌شود آمده است. جمع ردیف یک علت ۱ و جمع ستون یک معلول ۲ نام‌گذاری می‌شود. بنابراین مختصات علت معلولی اولین پارامتر ۶-۴ است. با انجام این کار برای پارامترهای دیگر، مختصات بقیه پارامترها نیز به دست می‌آید. قدم بعدی تهیه جدولی از این اعداد و رسم این مختصات‌ها است. لازم به ذکر است که در این جدول حاصل جمع علت و معلول نشان‌دهنده فعال بودن آن پارامتر در سیستم است، به این صورت که هرچه این عدد بزرگتر باشد آن پارامتر در سیستم فعال‌تر است. از طرفی حاصل تفریق معلول از علت نشان‌دهنده تاثیر پذیری پارامتر است. به این صورت که اگر این پارامتر مثبت باشد یعنی تاثیر پارامتر بر روی سیستم بیشتر از تاثیر سیستم بر روی پارامتر و بالعکس است (جدول ۱). در مرحله بعد هر یک پارامترها توسط مختصات C-E در نموداری رسم می‌شوند (شکل ۴). هدف از رسم این نمودار

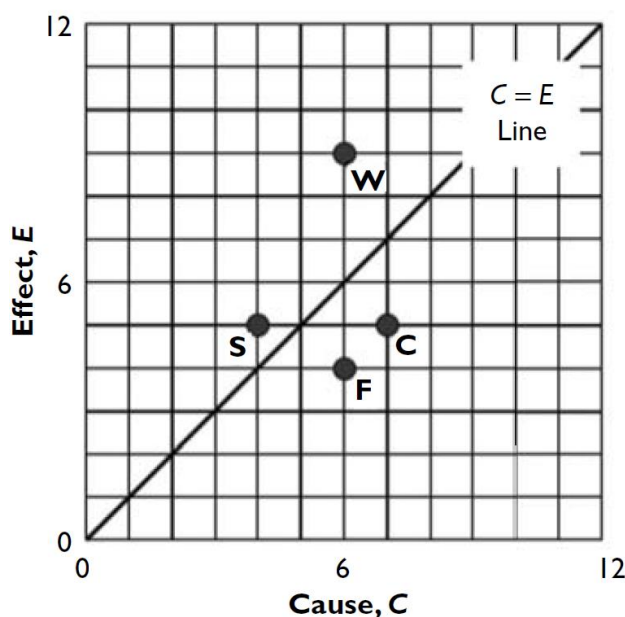
<sup>1</sup> Cause

<sup>2</sup> Effect

بررسی بهتر ارتباط متغیرها و میزان تاثیرگذاري آنها بر روی سیستم است (Hudson and Feng, 2015).

جدول ۱- پارامترهای سیستم حفاری در توده سنگ (Hudson and Feng, 2015)

پارامترهای سیستم	علت	معلول	علت + معلول	علت - معلول
	شدت اندرکنش	تاثیر گذاري/تاثیر پذيري		
شکستگی	۶	۴	۱۰	۲
تنش برجا	۴	۵	۹	-۱
جریان آب	۶	۹	۱۵	-۳
حفاری	۷	۵	۱۲	۲



شکل ۴- نمودار علت و معلول (Hudson and Feng, 2015)

به عنوان مثال با بررسی خوشه‌ای که پارامترها در نمودار می‌سازند می‌توان نوع سیستمی که مورد مطالعه قرار گرفته است را تشخیص داد. چهار نوع سیستم وجود دارد:

الف) متغیرها در اطراف نقطه ثقل نقطه‌ها متمرکز شدند.

ب) متغیرها در اطراف نقطه ثقل نقطه‌ها پخش شده‌اند.

ج) در منطقه بیضوی اطراف خط  $C = E$  قرار گرفته‌اند.

د) در منطقه بیضوی قطر مخالف قرار گرفته‌اند.

در مرحله آخر با استفاده از رابطه ۱ وزن هر یک از پارامترها محاسبه می‌شود.

$$\frac{C_i + E_i}{(\sum C_i + \sum E_i)} \times 100$$

رابطه ۱

روش سیستم مهندسی سنگ یک ابزار تصمیم‌گیری مناسب برای حل مشکلات مهندسی در مکانیک سنگ است که

محققین بسیاری از آن برای حل مسائل مختلف استفاده کرده‌اند (Frough et al., 2014; Huang et al., 2013; Rozos et al., 2011).

## یافته‌ها و نتایج

همانطور که قبلاً اشاره شد پارامترهای متفاوتی در سقوط حائز اهمیت هستند و به همین دلیل لایه‌های اطلاعاتی متعددی برای پهنه‌بندی سقوط سنگ مورد نیاز هستند. این لایه‌های اطلاعاتی شامل شیب زمین<sup>۱</sup>، رلیف نسبی<sup>۲</sup>، توزیع بارش<sup>۳</sup>، پوشش گیاهی<sup>۴</sup>، زمین لرزه<sup>۵</sup>، هوازدگی<sup>۶</sup> و بلوک دهی<sup>۷</sup> هستند که در سه دسته پارامترهای (۱) توپوگرافی و مورفولوژیکی، (۲) اقلیمی و (۳) زمین‌شناسی مهندسی قرار می‌گیرند. این لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از روش‌های متناسب، به صورت رقومی در محیط GIS تهیه شدند. در این بخش تلاش می‌گردد با ترکیب و همپوشانی و وزن‌دهی به این لایه‌های اطلاعاتی، نقشه سقوط سنگ با روشی مناسب و با در نظر گرفتن کلیه پارامترهای مؤثر تهیه گردد.

### ۱- عوامل توپوگرافی

عوامل توپوگرافی و مورفولوژیکی در نحوه رخداد بسیاری از پدیده‌های زمین‌شناسی مانند انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای مؤثر هستند. نقشه‌های توپوگرافی استان تهران با مقیاس ۲۵۰۰۰ به صورت رقومی برای کل منطقه در دسترس می‌باشند. همچنین مدل ارتفاعی زمین<sup>۸</sup> برای منطقه با دقت تفکیک ۱۰ متر در دسترس است. با استفاده از این اطلاعات می‌توان نقشه سه بعدی زمین<sup>۹</sup>، نقشه شیب زمین و نقشه رلیف نسبی را تهیه کرد. نقشه‌های مورد نظر برای استان تهران با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار ArcGIS و به کمک اطلاعات رقومی توپوگرافی، تهیه و در شکل ۵ ارائه گردیده‌اند.

### ۲- عوامل اقلیمی

عوامل اقلیمی مانند میزان بارندگی و پوشش گیاهی نیز نقش مهمی در وقوع پدیده‌های مخرب زمین‌شناسی و در نتیجه سقوط سنگ دارند. این عوامل در وقوع پدیده هوازدگی که نقش مهمی در تولید خاک دارد و همچنین در میزان پایداری خاک‌ها بسیار تأثیر گذار هستند.

### الف- بارندگی

مهم‌ترین عامل که نقش مهمی در پایداری دامنه‌های طبیعی دارد، وجود آب در مصالح است. نزولات جوی مهم‌ترین تأمین کننده آب موجود در قشر سطحی سنگ‌ها و خاک‌ها هستند. وجود آب کافی در بخش‌های سطحی مصالح می‌تواند از طریق افزایش فشار آب منفذی یا کاهش مقاومت برشی مصالح در ایجاد ناپایداری‌ها بسیار مؤثر باشد. میزان بارندگی همچنین می‌تواند در نوع هوازدگی (فیزیکی یا شیمیایی) تأثیر جدی داشته باشد. شکل ۵ توزیع بارندگی

<sup>1</sup> Slope

<sup>2</sup> RF: Related Relief

<sup>3</sup> RI: Rainfall intensity

<sup>4</sup> Vegetation

<sup>5</sup> Seismicity

<sup>6</sup> Weathering

<sup>7</sup> Blocking

<sup>8</sup> DEM: Digital Elevation Model

<sup>9</sup> Hill shade



سالانه در استان تهران برای متوسط سالانه ۱۴۰۰ را نشان می دهد.

#### ب- پوشش گیاهی

شاخص پوشش گیاهی به منظور توصیف تراکم گیاهان و توسعه یافتگی آن‌ها، با استفاده از تفاوت بین مادون قرمز نزدیک (که توسط گیاهان بازتابش می شود) و نور قرمز (که توسط گیاهان جذب می شود) می تواند نقاط دارای پوشش گیاهی را نمایان سازد. در این مطالعه نقشه شاخص پوشش گیاهی استان تهران با استفاده از نرم افزار ENVI و تصویر ماهواره ای مودیس تهیه و در شکل ۵ ارائه شده است.

#### ۳- عوامل زمین شناسی

##### الف- زمین لرزه

یکی از لایه های مورد نیاز در پژوهش حاضر، نقشه خطر زمین لرزه است. در این راستا، نقشه ارائه شده در آیین نامه طراحی ساختمان در برابر زمین لرزه، ویرایش پنجم مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۶ وضعیت توزیع خطر نسبی زمین لرزه در محدوده استان تهران نقشه نشان داده شده است. باید توجه داشت که برای تدقیق این تحلیل ها، می بایست ابتدا نقشه خطر زمین لرزه بر اساس جدیدترین مطالعات ( Baftipour et al., 2022; Jarahi, 2016a, b, ) 2019; Jarahi, 2020, 2021; Jarahi et al., 2015; Jarahi et al., 2022a, b; Jarahi et al., 2016; Jarahi et al., 2022c; Jarahi et al., 2022d; Najafian A. et al., 2022 روز رسانی گردد. با این حال در پژوهش حاضر به منظور تمرکز بر روی موضوع اصلی، از این امر اجتناب گردید.

##### ب- پتانسیل هوازگی

هوازگی سنگ ها از جمله پارامترهایی است که می تواند نقش اساسی در ویژگی های مقاومتی سنگ ها داشته باشد. با کاهش مقاومت سنگ در اثر هوازگی، پتانسیل وقوع پدیده هایی مانند سقوط سنگ، افزایش می یابد. برای ارزیابی پتانسیل هوازگی سنگ ها، راه های زیادی وجود دارد. یک روش ساده توجه به لیتولوژی سنگ ها و کانی های تشکیل دهنده آن ها و مقایسه نسبی سنگ ها و کانی های با پایداری متفاوت می باشد. با استفاده از این روش، همراه با تجارب حاصل از مطالعات صحرایی در منطقه، پتانسیل نسبی هوازگی در واحدهای زمین شناسی (شکل ۱) مختلف قابل تخمین می باشد. این پارامتر یکی از پارامترهای ورودی اصلی برای محاسبه شاخص سقوط سنگ است. پتانسیل هوازگی توده سنگ ها در جدول ۲ و نقشه مربوط به آن در شکل ۶ ارائه شده است.

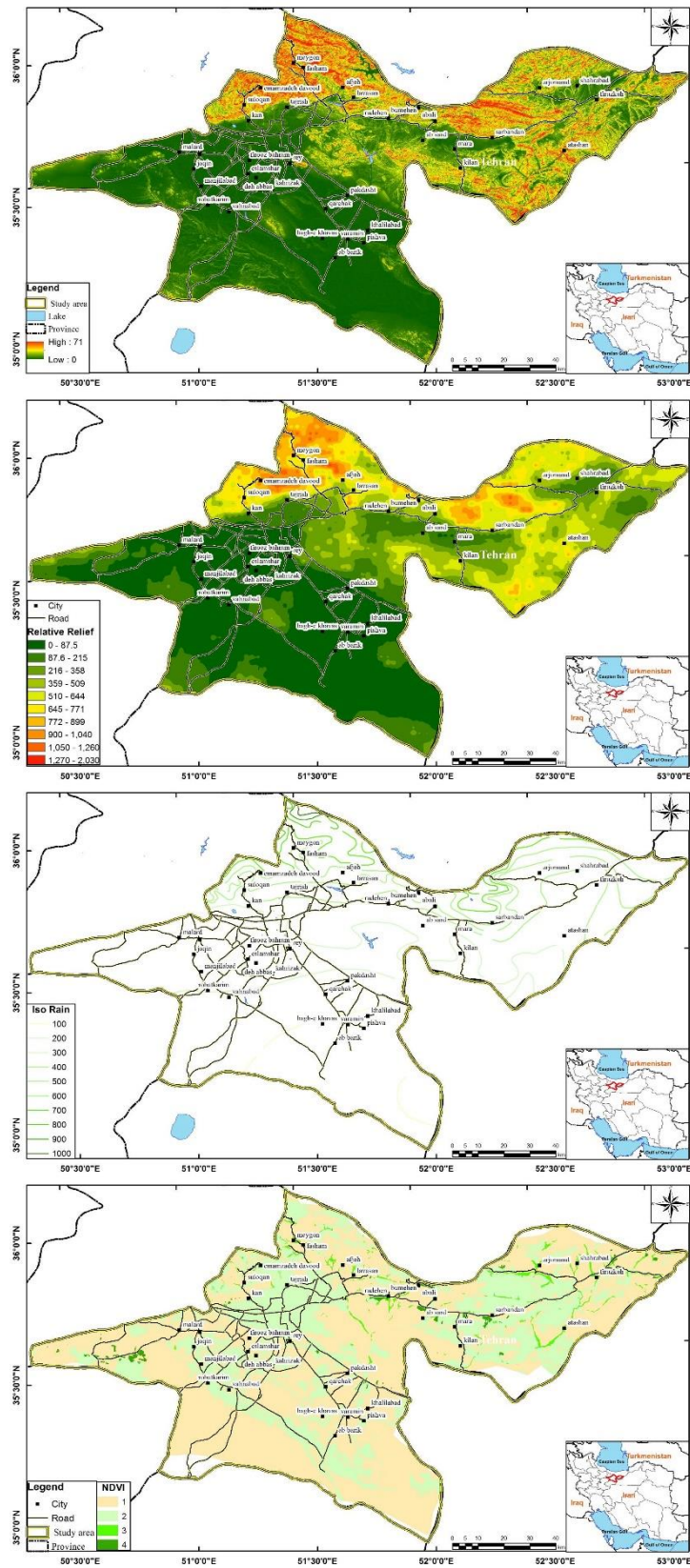
##### ج- بلوک دهی توده سنگ ها

بلوک دهی توده سنگ ها نیز پارامتر مهمی است که در پتانسیل سقوط سنگ نقش اساسی دارد. هرچه بلوک های سنگی که در دامنه تشکیل می شوند بزرگتر باشند، خطر سقوط سنگ جدی تر می باشد. بلوک دهی توده سنگ ها به فاصله داری و تعداد دسته ناپیوستگی های موجود در توده سنگ وابسته است. بنابراین ساختار توده سنگ (که در جدول ۲ برای واحدهای زمین شناسی مختلف تعیین شده است) بازگو کننده وضعیت بلوک دهی توده سنگ نیز می باشد. باید توجه داشت که حساسیت یک سازند به هوازگی، تنها مشخصه برای تعیین پتانسیل هوازگی آن سازند نیست. چرا که در تعامل زمین ساخت و اقلیم، اثرات عمده ای بر میزان هوازگی رخ می دهد. به همین سبب میزان حساسیت سازند ها به هوازگی نیز مورد توجه قرار گرفته است. در شکل ۶ نقشه توزیع وضعیت بلوک دهی، که به شکل توصیفی

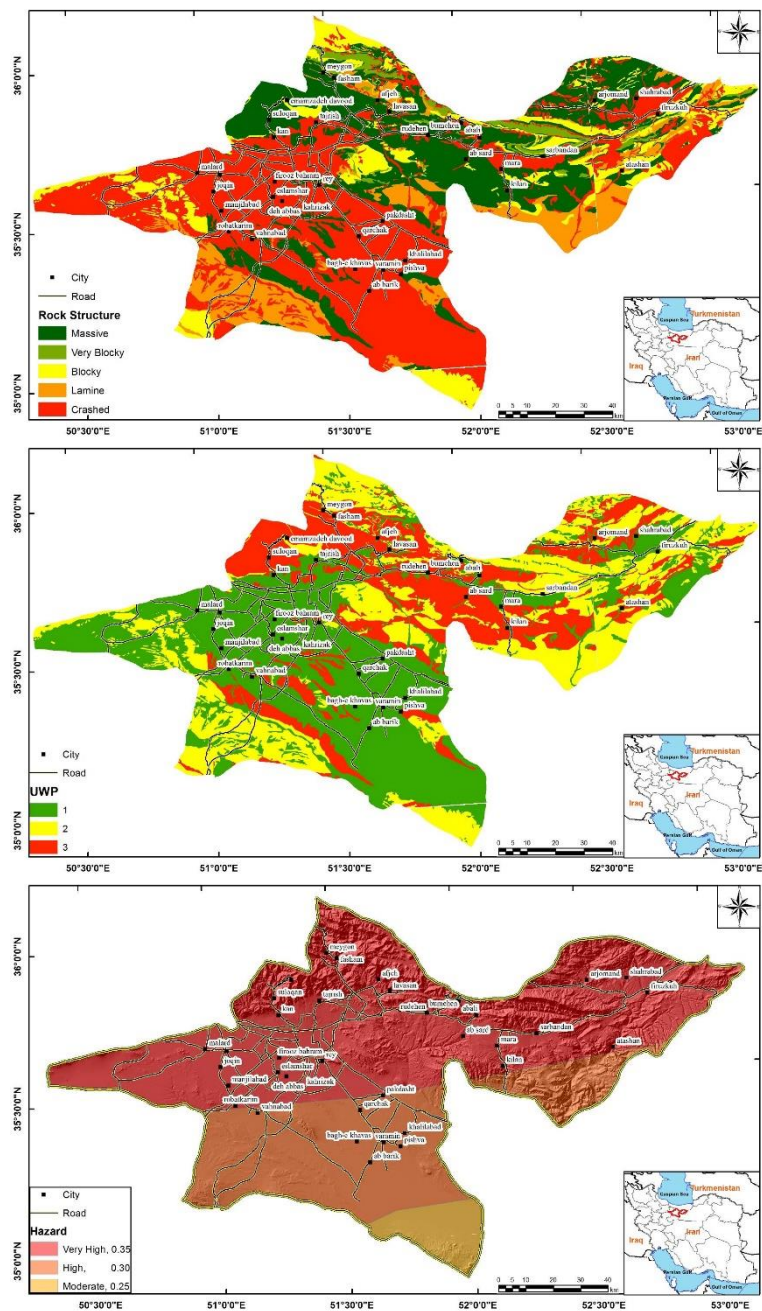
از ساختار کلی توده‌سنگ‌های واحدهای زمین‌شناسی مهندسی استان تهران تهیه شده، به نمایش در آمده است.

جدول ۲- خواص زمین‌شناسی عمومی سازندهای منطقه

نام سازند	حساسیت به هوازگی یا آلتراسیون	پتانسیل هوازگی	فواصل ناپیوستگی‌ها یا اندازه بلوک	نفوذپذیری
کهر	ندارد	کمی هوازده	بلوکی	کم
سلطانیه	ندارد	کم	بلوکی	کم تا نفوذپذیر
باروت	متوسط	کم	ورقه‌ای تا خیلی بلوکی	کم
زاگون	متوسط	کم	خیلی بلوکی	کم
لالون	ندارد	کم	خیلی بلوکی	متوسط
میلا	متوسط	کم تا متوسط	ورقه‌ای تا بلوکی	متوسط تا
لشکرک	متوسط	کم	ورقه‌ای تا بلوکی	کم
چیرود	متوسط	کم	ورقه‌ای تا بلوکی	متوسط
مبارک	ندارد	کم	بلوکی	نفوذپذیر
درود	متوسط	کم تا زیاد	بلوکی تا خیلی بلوکی	کم
روته	ندارد	کم	توده‌ای	نفوذپذیر
نسن	ندارد	کم	بلوکی	نفوذپذیر
البکا	متوسط	هوازده	خیلی بلوکی	نفوذپذیر
پالند	متوسط	کم	ورقه‌ای تا بلوکی	کم
شمشک	حساسیت بالا	هوازده	ورقه‌ای تا بلوکی	کم تا متوسط
دلیچای	حساس	هوازده	ورقه‌ای	نفوذناپذیر
لار	کمی حساس	کم	توده‌ای تا بلوکی	نفوذپذیر
آبناک	ندارد	کم	توده‌ای تا بلوکی	نفوذپذیر
تیزکوه	ندارد	کم	بلوکی تا توده‌ای	نفوذپذیر
فجن	حساس	هوازده	ورقه‌ای	کم
زیارت	کمی حساس	کم	توده‌ای	نفوذپذیر
آذراواری کرج	ندارد	ندارد	خیلی بلوکی - بلوکی تا	کم
شیل‌های سازند	حساس	هوازده	ورقه‌ای تا خیلی بلوکی	کم
قم	متوسط	هوازده	ورقه‌ای	کم
سرخ بالایی	حساس	هوازده	ورقه‌ای	کم
هزاردره	متوسط	متوسط	توده‌ای	متوسط
سنگ‌های اذرین	ندارد	ندارد	توده‌ای	کم
سنگ‌های آذرین	ندارد	ندارد	توده‌ای	کم



شکل ۵- به ترتیب از بالا به پایین نقشه شیب زمین، رلیف (توپوگرافی) نسبی، توزیع بارندگی و پوشش گیاهی استان تهران



شکل ۶- به ترتیب از بالا به پایین نقشه وضعیت ساختمانی و بلوک دهی و پتانسیل هوازدگی توده سنگ و خطر نسبی زمین لرزه

## پتانسیل سقوط سنگ -

به منظور تهیه نقشه پتانسیل سقوط سنگ، می بایست از ۷ لایه مختلف شامل لایه شیب زمین، رلیف نسبی، توزیع بارش، پوشش گیاهی، لرزه خیزی، درجه هوازدگی و بلوک دهی سنگ‌ها، کمک گرفت. از این رو ابتدا نقشه‌های مذکور به طور جداگانه رده بندی شده‌اند. سپس لازم است تا با وزن دهی به هر یک از لایه‌ها، نقشه پتانسیل سقوط سنگ تهیه شود. در این پژوهش برای وزن دهی به پارامترهای فوق از روش سیستم مهندسی سنگ استفاده شده است (جدول ۳ و ۴ و شکل ۷). بر همین اساس وزن‌های هر یک از لایه‌ها محاسبه گردید و مطابق با رابطه ۲ (برگرفته از جدول ۴) به لایه‌های اطلاعاتی اعمال گردید. بر مبنای این محاسبات نقشه پهنه‌بندی سقوط سنگ مطابق شکل ۸ ارائه شده است.

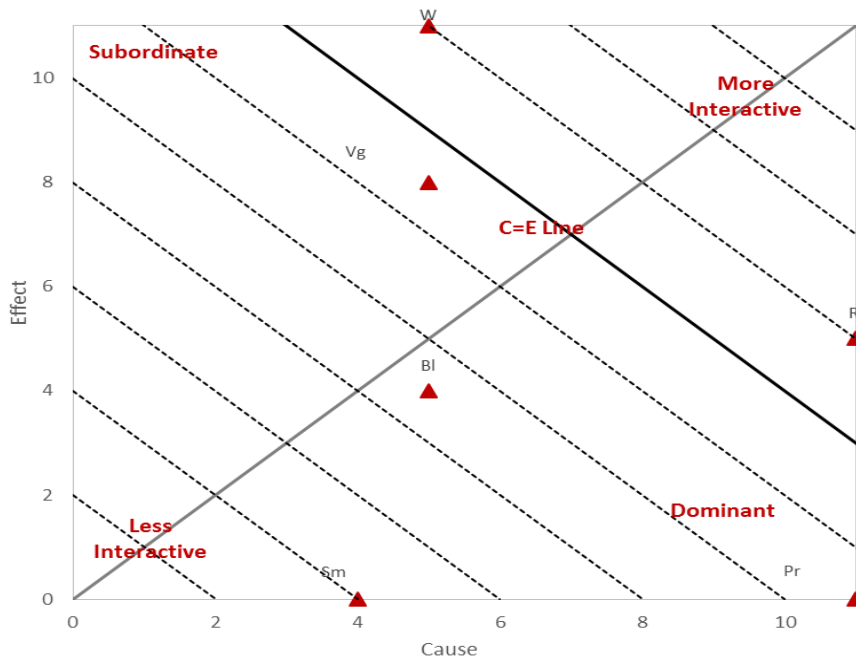
رابطه ۲  $RF = 0.20 SI + 0.19 RI + 0.13 Pr + 0.15 Vg + 0.05 Sm + 0.19 W + 0.11 Bl$

جدول ۳- ماتریس اندرکنش برای پارامترهای سقوط سنگ

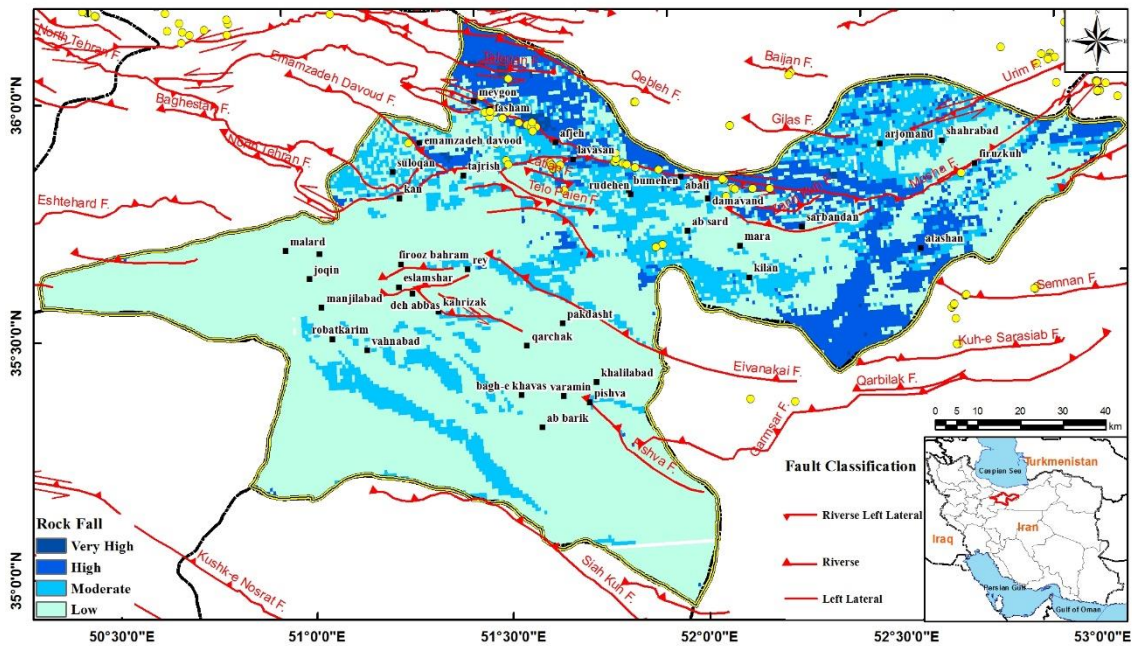
SI	۴	۰	۳	۰	۱	۰	۴
۴	RI	۰	۱	۰	۱	۱	۴
۰	۰	Pr	۳	۰	۴	۱	۳
۰	۰	۰	Vg	۰	۳	۱	۱
۰	۰	۰	۰	Sm	۰	۰	۴
۱	۱	۰	۱	۰	W	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۲	Bl	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	RF

جدول ۴- علت و معلول پارامترهای ماتریس اندرکنش سقوط سنگ

ضریب پارامتر	علت - معلول تأثیر گذاری/تأثیر پذیری	علت + معلول شدت اندرکنش	معلول	علت	پارامترهای سیستم
۰.۲۰	۷	۱۷	۵	۱۲	SI
۰.۱۹	۶	۱۶	۵	۱۱	RI
۰.۱۳	۱۱	۱۱	۰	۱۱	Pr
۰.۱۵	-۳	۱۳	۸	۵	Vg
۰.۰۵	۴	۴	۰	۴	Sm
۰.۱۷	-۶	۱۶	۱۱	۵	W
۰.۱۱	۱	۹	۴	۵	Bl
			۳۱	۵۳	



شکل ۷- نمودار علت و معلول که بر مبنای جدول ۴ تهیه شده است



شکل ۸- نقشه پتانسیل سقوط سنگ استان تهران. نقاط ناپایداری‌های دامنه‌ای با رنگ زرد نمایش داده شده است.

### نتیجه گیری

در این بررسی نقشه پتانسیل سقوط سنگ با استفاده از ۷ لایه اطلاعاتی و وزن دهی هر یک به روش سیستم مهندسی سنگ، تهیه گردید. در این نقشه ارتباط کاملاً تعریف شده‌ای بین مناطق کوهستانی و افزایش خطر سقوط سنگ دیده می‌شود. همچنین در موقعیت گسل‌های اصلی گستره مورد مطالعه، افزایش چشم گیری در میزان خطر سقوط سنگ دیده می‌شود. جدای از این دو،

می توان افزایش شیب توپوگرافی را در تغییرات میزان خطر سقوط سنگ موثر دانست. به طور کلی از آن جا که پهنه بندی سقوط سنگ بر اساس ۷ لایه اطلاعاتی اصلی تهیه شده، تک تک این لایه ها در تغییرات میزان خطر موثر هستند. باید توجه داشت که نقش گسل ها به دو صورت یکی در میزان خردشدگی سنگ ها یا همان بلوک دهی و دیگری در شتاب زمین لرزه به درستی در نظر گرفته شده است. موقعیت زمین لغزش ها و ناپایداری های دامنه ای نیز با نقشه خطر سقوط سنگ مقایسه گردید. بر این اساس مشخص شد تمامی این موقعیت ها در پهنه هایی با خطر بسیار زیاد تا زیاد واقع شده اند. این مورد تا حدودی صحت تحلیل های حاضر را تایید می کند. از نتایج این تحقیق برای نشان دادن مناطق در معرض خطر استفاده می شود. به طور کلی می توان گفت که در اکثر مطالعات مربوط به سقوط و ریزش سنگ، هدف اصلی کاهش خطر وقوع این پدیده است. برای کاهش خطر سقوط سنگ باید سازوکار غالب شناسایی شود و سپس با تشریح عامل مهم با اقدامات اصلاحی، خطر این پدیده کاهش یابد. یکی از روش های مورد استفاده برای کاهش ریزش سنگ، کاهش عناصر خطر در منطقه ریزش سنگ است. همچنین در بسیاری از موارد کاهش عناصر خطر و برخی سازه های حفاظتی امکان پذیر نیست و باید برای محافظت از عناصر خطر در برابر بلوک های افتاده، اقدامات اصلاحی انجام شود. برای طراحی کارآمد تأسیسات، برخی از ویژگی های بلوک های افتاده باید در دسترس باشد تا به طراحان در تصمیم گیری در مورد مکان و ظرفیت تأسیسات کمک کند.

## References

- Abebe, B., Fubelli, G., Umer, M., and Asrat, A., 2010, Landslides in the Ethiopian highlands and the Rift margins: *Journal of African Earth Sciences*, v. 56, p. 131-138.
- Baftipour, M., Jarahi, H., Polat, G., and Seifilaleh, S., 2022, Damavand Earthquake of ۲۰۲۰: the Mainshock or an Alarm for Disaster for the Capital of Iran: *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 15, no. 1.
- Binal, A., and Ercanoglu, M., 2010, Assessment of rockfall potential in the Kula (Manisa, Turkey) Geopark Region: *Environmental Earth Sciences*, v. 61, p. 1361-1373.
- Blahůt, J., Klimeš, J., and Vařilová, 2013, Quantitative rockfall hazard and risk analysis in selected municipalities of the České Švýcarsko National Park, northwestern Czechia: *Geografie*, v. 118, p. 205-220.
- Ding, Y., Dang, C., Yuan, G., and Wang, Q., 2011, Characteristics and remediation of a landslide complex triggered by the 2008 Wenchuan, China earthquake-case from Yingxiu near the earthquake epicenter: *Environmental Earth Sciences*, v. 67.
- Dorren, L., 2003, A review of rockfall mechanics and modelling approaches: *Organic Geochemistry - ORG GEOCHEM*, v. 27.
- Evans, S., and Hungr, O., 1993, The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes: *Canadian Geotechnical Journal*, v. 30, p. 620-636.
- Frough, O., Torabi, S., and Yagiz, S., 2014, Application of RMR for Estimating Rock-Mass-Related TBM Utilization and Performance Parameters: A Case Study.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., and Agliardi, F., 2002, STONE: A computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls: *Computers & Geosciences*, v. 28, p. 1079-1093.
- Hoek, E., and Bray, J., 1981, *Rock Slope Engineering: Third Edition*.
- Huang, R., Huang, J., Ju, N., and Li, Y., 2013, Automated tunnel rock classification using rock engineering systems: *Engineering Geology*, v. 156, p. 20-27.
- Hudson, J., and Feng, X.-T., 2015, *Rock Engineering Risk*, Xia-Ting Feng CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 527 p.
- Hutchinson, J. N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, 3-35 p.
- Jaboyedoff, M., Dudt, J.-P., and Labiouse, V., 2005, An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree: *Natural hazards and earth system sciences*, v. 5.
- Jarahi, H., 2016a, Ground-motion scenarios consistent with Probabilistic Seismic Hazard Deaggregation for Karaj city (Iran): *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 9, no. 3, p. 520-529.
- Jarahi, H., 2016b, Probabilistic seismic hazard deaggregation for Karaj City (Iran): *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 9, no. 3, p. 520-529.
- Jarahi, H., 2019, Paleo-Mega Lake Evidence and its Effect on Civilizations Taking Place Case Study SE Tehran, In *Second International Symposium of the Near Eastern Landscape Archaeology*, Volume 1: Turkey, Eurasia Institute of Earth Sciences, p. 12.
- Jarahi, H., 2020, Quaternary fault escarpment or Paleo shoreline, Case study Eslamshahr Metro, Southeast of Tehran: *Geotechnic section*, Zharf Pouya Co., (Persian Language), 56pp.
- Jarahi, H., 2021, Paleo Mega Lake of Rey Identification and Reconstruction of Quaternary Lake in Central Iran: *Open Quaternary*, v. 7, no. 1, p. 1-15.
- Jarahi, H., Madadi, M. R., Nadalian, M., and Bandar, F., 2015, Seismic Hazard Zonation in Terms of Spectral Acceleration at Tehran Region Base on Activity and Slip Rates, 2st National Congress on Construction Engineering and Projects Assessment, Semnan-Iran.



- Jarahi, H., Moghimi, S., Tan, O., Saygılı, O., and Karagöz, O., 2022a, Paleo Mega Lake of Rey Sediments and Its Effect on Earthquake Acceleration Case Study Tehran City., SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA.
- Jarahi, H., 2022b, Revision of Iranian Seismic Design Code for Tehran Region Based on “Paleo Mega Lake of Rey” Theory, SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA.
- Jarahi, H., Naraghiaraghi, N., and Nadalian, M., 2016, Short Period Spectral Acceleration Zonation of Tehran a Comparison between Slip and Activity Rates Data’s: American Journal of Geosciences, v. 6, no. 1, p. 36-46.
- Jarahi, H., Polat, G., and Seifilaleh, S., 2022c, Damavand Earthquake of 2020 the Mainshock or an Alarm for Disaster for the Capital of Iran: American Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 15, no. 1.
- Jarahi, H., Pourkermani, M., Akbarzadeh, R., and Farajpour, Z., 2022d, The re-interpretation of Quaternary faults near Tehran, Based on Paleo Mega Lake of Rey Theory, SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA, p. 7.
- Jarahi, H., and Seifilaleh, S., 2016, Rock fall hazard zonation in Haraz highway: American Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 9, p. 371-379.
- Leine, R., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P., and Gerber, W., 2013, Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape: Multibody System Dynamics, v. 3, p. 241-271.
- Maghsoudi, M., 2021, Desert Landscapes and Landforms of Iran, Springer International Publishing, v. 1.
- Matsuoka, N., and Sakai, H., 1999, Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods: Geomorphology, v. 28, p. 309-328.
- McCarroll, D., Shakesby, R., and Matthews, J., 1998, Spatial and Temporal Patterns of Late Holocene Rockfall Activity on a Norwegian Talus Slope: A Lichenometric and Simulation-Modeling Approach: Arctic and Alpine Research, v. 30, p. 51.
- McCreath, D., 1990, Rock mechanics principles in engineering practice: Canadian Geotechnical Journal, v. 27, no. 3, p. 407-407.
- Najafian A., Jarahi, H., and Bayraktutan M.S., 2022, Challenges Facing Discovery of Largest Lake in World History Geotechnical Investigation, SSA Annual Meeting 2022: Washington D.C., USA.
- Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: proceedings of international symposium on the role of rock mechanics: ISRM, Zacatecas, p. 49-53.
- Rozos, D., Bathrellos, G., and Skillodimou, H., 2011, Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: A case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, GREECE :Environmental earth sciences, v. 63, p. 49-63.
- Topal, T., Akin, M., and Akin, M., 2011, Rockfall hazard analysis for an historical Castle in Kastamonu (Turkey): Natural Hazards, v. 62.
- Vidrih, R., Ribicic, M., and Suhadolc, P., 2001, Seismogeological effects on rocks during the 12 April 1998 upper Soca Territory earthquake (NW Slovenia): Tectonophysics, v. 330, p. 153-175.
- Youssef, D. A., Pradhan, B., Al-Kathery, M., Bathrellos, G., and Skilodimou, H., 2015, Assessment of rockfall hazard at Al-Noor Mountain, Makkah city (Saudi Arabia) using spatio-temporal remote sensing data and field investigation: Journal of African Earth Sciences, v. 101, p. 309–321.