



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

## گزارش نهایی طرح پژوهشی

با عنوان:

**پهنه‌بندی پایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌ییلاق با  
استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)**

مجری طرح:

**دکتر رضا کاکایی**

همکار اصلی طرح:

مسعود زارع نقدهی

تیرماه ۱۳۸۸

## به نام خداوند بخشنده و مهربان

### چکیده

وجود ناپایداری‌های دامنه‌ای مشرف به جاده‌ها یکی از خطراتی است که معابر کوهستانی همواره با آن روبرو هستند. جاده شاهرود- آزادشهر به عنوان جاده اصلی ارتباطی بین استان‌های سمنان و گلستان از نمونه‌هایی است که در معرض جدی چنین خطراتی می‌باشد. شیروانی‌های سنگی متعدد این منطقه به دلایل مختلف دارای پتانسیل ریزش بالایی هستند که همه ساله باعث ایجاد حوادث و اختلال در سیستم حمل و نقل جاده‌ای می‌شوند. بنابراین اطلاع از شرایط، پتانسیل ریزش و نیز میزان پایداری شیروانی‌ها با هدف تحکیم و پایدارسازی آن‌ها بسیار ضروری می‌نماید. علیرغم این خطر، فعالیت‌های انجام شده در جهت ایمن‌سازی

منطقه و گردنه‌ها بسیار محدود بوده است. به طور کلی روش‌های مختلفی به منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و تعیین وضعیت آنها از نظر رده‌بندی توده‌سنگ وجود دارد که از آن میان می‌توان به روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی اشاره نمود. به علت پیچیدگی رفتار توده سنگ و تعداد عوامل موثر بر آن، موضوع تحلیل پایداری شیب‌ها به روش‌های تحلیلی و عددی همواره کاری دشوار به حساب آمده است. روش‌های تجربی نیز در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی از اهمیت فراوانی برخوردارند. در بسیاری از پروژه‌های تحلیل پایداری از رده‌بندی‌های مهندسی سنگ نظیر RMR، Q و SMR بدین منظور استفاده می‌شود که این روش‌ها نیز علیرغم استفاده فراگیر، به دلیل در نظر گرفتن فاکتورهای مشخص و مخصوص به خود، به شرایط ارائه روش محدود بوده و از دقت و کارایی بالا در تمامی موقعیت‌ها برخوردار نیستند.

رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به عنوان یک روش سیستمی در تحلیل‌ها و رده‌بندی‌های پروژه‌های مهندسی سنگ مطرح می‌باشد. در این رویکرد، تأثیر متقابل پارامترهای موثر بر یکدیگر در مقیاسی برابر سنجیده شده و بدین ترتیب اثر هر پارامتر در میزان تولید ناپایداری مورد توجه قرار می‌گیرد. به همین دلیل، رده‌بندی‌های حاصل از روش بسیار قابل اطمینان بوده و نمایی کامل از وضعیت منطقه ارائه می‌گردد.

در این طرح، پس از انجام بازدیدها از منطقه مورد مطالعه و بررسی شرایط محیطی، تعیین ایستگاه‌ها و سنجش وضعیت شیب‌های سنگی، مهمترین پارامترهای موثر بر ایجاد ناپایداری در آنها انتخاب شده‌اند. سپس با تشکیل ماتریس تأثیر متقابل با استفاده از این پارامترها برای شیب‌های منطقه و شناسایی تأثیر هر جفت از پارامترها بر روی یکدیگر، این ماتریس کدگذاری شده است. به این صورت تأثیر نسبی هر پارامتر بر سیستم و بالعکس به صورت عددی محاسبه شده است. مهمترین پارامترها با بیشترین اندرکنش در سیستم مشخص شده و پس از تشکیل منوهای رده‌بندی، اندیس ناپایداری به صورت فرمول ریاضی برای منطقه تعیین شده است. با توجه به شرایط شیب‌های سنگی در هر ایستگاه و به دست آوردن داده‌های مربوط به خواص مکانیکی سنگ‌ها، درزه‌های سنگی و شرایط حاکم بر منطقه، اندیس‌های خاص هر شیب سنگی مورد محاسبه قرار گرفته است. بدین ترتیب رده‌بندی جامعی از ایستگاه‌ها و در نتیجه شیب‌های منطقه ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: رویکرد سیستمی، تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، اثر متقابل، جاده گردنه خوش‌یلاق.

چکیده..... الف

فهرست مطالب..... ج

## فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه..... ۲

## فصل دوم: تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

۱-۲- مقدمه..... ۶

۲-۲- اصول مهندسی شیب‌های سنگی..... ۷

۳-۲- انواع شکست در شیب‌های سنگی..... ۱۰

۳-۲-۱- شکست تک‌صفحه‌ای - سطح..... ۱۱

۳-۲-۲- شکست صفحه‌ای - پله‌ای..... ۱۲

۳-۲-۳- شکست صفحه‌ای چند بلوکی - چند سطحی..... ۱۲

۳-۲-۴- شکست گوه‌ای..... ۱۳

۳-۲-۵- شکست تک‌گوه‌ای - چند سطحی..... ۱۴

- ۲-۳-۶- شکست چند گوه‌ای- چند سطحی..... ۱۴
- ۲-۳-۷- شکست قاشقی یا دایره‌ای..... ۱۵
- ۲-۳-۸- شکست واژگونی..... ۱۶
- ۲-۳-۹- شکست پوسته‌ای..... ۱۶
- ۲-۴-۴- رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی..... ۱۷
- ۲-۴-۱- روش استریوگرافیک..... ۱۹
- ۲-۴-۲- روش‌های تجربی..... ۲۱
- ۲-۴-۳- روش‌های تحلیل تعادل حدی..... ۲۲
- ۲-۴-۳-۱- آنالیز حرکت انتقالی..... ۲۲
- ۲-۴-۳-۲- آنالیز حرکت واژگونی..... ۲۴
- ۲-۴-۳-۳- آنالیز حرکت دایره‌ای..... ۲۵
- ۲-۳-۵- روش‌های عددی..... ۲۶
- ۲-۳-۶- روش‌های احتمالاتی..... ۲۹
- ۲-۳-۷- روش‌های مونیتورینگ..... ۳۰

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| ۳-۱- مقدمه.....                                                    | ۳۴ |
| ۳-۲- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی.....                                | ۳۵ |
| ۳-۳- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES).....                        | ۳۷ |
| ۳-۳-۱- ماتریس‌های اثر متقابل.....                                  | ۳۷ |
| ۳-۳-۲- کدگذاری ماتریس‌های اثر متقابل.....                          | ۴۱ |
| ۳-۳-۳- نمودار علت-اثر.....                                         | ۴۵ |
| ۳-۳-۴- سابقه استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف.....         | ۵۰ |
| ۳-۳-۵- سابقه استفاده از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌ها..... | ۵۵ |
| ۳-۳-۱- مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶).....                               | ۵۵ |
| ۳-۳-۲- کاستالدینی و همکاران (۱۹۹۸).....                            | ۵۸ |
| ۳-۳-۳- ژانگ و همکاران (۲۰۰۴).....                                  | ۵۹ |
| ۳-۳-۴- صادقی و رسولی (۱۳۸۴-۲۰۰۵).....                              | ۶۰ |
| ۳-۳-۵- روزوس و همکاران (۲۰۰۸).....                                 | ۶۲ |
| ۳-۳-۶- جریان و جریان (۲۰۰۸).....                                   | ۶۳ |
| ۳-۳-۷- بودتا و همکاران (۲۰۰۸).....                                 | ۶۳ |

## فصل چهارم: معرفی منطقه و شیب‌های سنگی مورد مطالعه

- ۱-۴- معرفی منطقه خوش‌ییلاق..... ۶۶
- ۱-۱-۴- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه..... ۶۶
- ۲-۱-۴- ریخت‌شناسی و ارتفاعات موجود در منطقه..... ۶۶
- ۳-۱-۴- سازندهای تشکیل دهنده منطقه..... ۶۸
- ۱-۳-۱-۴- سازند خوش‌ییلاق (Dkh)..... ۶۸
- ۲-۳-۱-۴- سازند مبارک (Cm)..... ۶۹
- ۳-۳-۱-۴- سازند پادها (Dp)..... ۷۰
- ۴-۱-۴- گسل‌ها و چین‌های موجود در منطقه..... ۷۰
- ۵-۱-۴- زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک منطقه..... ۷۱
- ۲-۴- شیب‌های سنگی و ایستگاه‌های مورد مطالعه..... ۷۲

## فصل پنجم: تحلیل پایداری شیب‌های سنگی منطقه با استفاده از رویکرد RES

- ۱-۵- مقدمه..... ۷۷
- ۲-۵- عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه..... ۷۸
- ۱-۲-۵- زمین‌شناسی و لیتولوژی..... ۷۸

- ۵-۲-۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها..... ۷۸
- ۵-۲-۳- ناپایداری‌های پیشین..... ۷۹
- ۵-۲-۴- مقاومت سنگ بکر..... ۸۰
- ۵-۲-۵- هوازدگی..... ۸۰
- ۵-۲-۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها..... ۸۰
- ۵-۲-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها..... ۸۱
- ۵-۲-۸- شرایط هیدرولیکی..... ۸۱
- ۵-۲-۹- ابعاد و زاویه شیب‌ها..... ۸۱
- ۵-۲-۱۰- میزان بارندگی..... ۸۲
- ۵-۲-۱۱- چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن..... ۸۲
- ۵-۳- اثرات متقابل میان پارامترهای انتخاب شده..... ۸۳
- ۵-۴- تشکیل منوهای رده‌بندی و به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز..... ۸۸
- ۵-۴-۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی..... ۸۹
- ۵-۴-۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها..... ۹۰
- ۵-۴-۳- ناپایداری پیشین..... ۹۱



- ۹۱ ..... ۴-۴-۵- مقاومت سنگ بکر
- ۹۱ ..... ۵-۴-۵- تعداد دسته‌درزه‌ها و جهت‌یافتگی
- ۹۲ ..... ۶-۴-۵- بازشدگی، تداوم و فاصله‌داری درزه‌ها
- ۹۳ ..... ۷-۴-۵- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها
- ۹۳ ..... ۸-۴-۵- شرایط هیدرولیکی
- ۹۴ ..... ۹-۴-۵- ابعاد و زاویه شیب‌ها
- ۹۴ ..... ۱۰-۴-۵- میزان بارندگی و یخ‌زدگی و آب شدن
- ۹۴ ..... ۵-۵- رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه از نظر میزان ناپایداری

### فصل ششم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- ۱۰۰ ..... ۱-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
- ۱۰۴ ..... فهرست منابع
- ۱۱۵ ..... پیوست الف: داده‌های آزمایشگاهی و برداشت شده از شیب‌های سنگی مورد مطالعه

## ۱-۱- مقدمه

پیش‌بینی و کنترل گسیختگی‌های شیب‌های سنگی طبیعی و ترانشه‌ها از مسائل بسیار با اهمیت در مهندسی سنگ و ژئوتکنیک است. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه مقابله با بروز لغزش و ناپایداری در شیروانی‌ها به انجام رسیده است که نتایج آن از طرفی بسط و گسترش روش‌های ارزیابی پتانسیل لغزش و از طرف دیگر بهبود روش‌های طراحی و مقاوم‌سازی شیب‌ها را به همراه داشته است.

هر پروژه مهندسی سنگ، مسائل مربوط به خود را داشته و قابل پذیرش بودن آن را باید با توجه به مجموعه‌ای از خصوصیات آن طرح، تنوع سنگ، وزن بارهای طراحی، سیمای طرح و هدف از کاربری نهایی سازه مدنظر قرار داد. در اینجا مسئولیت مهندس طراح، یافتن راه حل ایمن و اقتصادی به گونه‌ای است که با کلیه محدودیت‌هایی که نقش مهمی را در پروژه ایفا می‌کنند، سازگار باشد. چنین راه حلی بایستی بر پایه قضاوت مهندسی و مهم‌تر از همه، با پشتوانه مناسبی از مطالعات علمی و کاربردی، مانند تحلیل پایداری یا تغییر شکل‌پذیری توده‌های سنگی (در شرایطی که این تحلیل‌ها قابل اعمال باشند) انجام گیرد. هدف از انجام محاسبات پایداری در سازه‌های سنگی، ارائه ضوابط و معیارهای تحلیل و طراحی سازه نگهدارنده برای شرایط خاص پروژه می‌باشد. برای طراحی سیستم نگهداری و ایمن‌سازی هر دیواره، ابتدا باید وضعیت پایداری آن بررسی شود. به بیان دیگر می‌بایست مشخص کرد که آیا دیواره به خودی خود پایدار است و یا این که نیاز به پایدارسازی دارد.

روش‌های متعددی از قبیل روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی وجود دارد که گذشته از نقاط ضعف و قوت هر روش، ذکر این نکته ضروری است که هیچ یک از آنها قادر به در نظر گرفتن تمام پارامترهای موثر بر مسئله پایداری نبوده و همواره بخشی از فاکتورهای تأثیرگذار از نظر دور می‌افتد. با این اوصاف، رویکردی در مهندسی سنگ مورد نیاز بوده است که با اطمینان بالا، طبیعت بسیار بخصوص سنگ را به عنوان یک نوع ماده مهندسی در نظر گرفته و توانایی وارد نمودن دانش کنونی را در ارزیابی‌ها داشته باشد و نیز قادر باشد که در پروژه‌های مهندسی سنگ با اهداف گوناگون به کار رود. این رویکرد بایستی علاوه بر پارامترهای متعدد موجود در هر مسئله، شرایط اقتصادی و زیست محیطی حاکم بر پروژه را نیز در نظر بگیرد، چرا که همواره در یک پروژه مهندسی، حداقل سازی هزینه‌های مالی و آسیب‌های زیست محیطی از مهمترین اهداف است. به عبارت دیگر و به بیان کلی، سیستم کامل مهندسی سنگ با تمامی اهداف اصلی و فرعی باید در نظر گرفته شود. برای پاسخ مستقیم به این نیازها و همچنین احاطه کامل بر مسائل پیچیده مهندسی سنگ، هادسون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۲ رویکرد جدیدی را با نام سیستم‌های مهندسی سنگ (RES<sup>۲</sup>) ارائه نمود (Hudson, 1992). این رویکرد با در نظر گرفتن مسئله به صورت یک سیستم واقعی و با استفاده از خصوصیات و تفکر سیستمی، امروزه به عنوان راه حلی جدید برای مسائل پیچیده مهندسی سنگ به شمار می‌رود. پروژه‌های تحلیل و طراحی پایداری شیب‌های سنگی به دلیل وجود فاکتورهای تأثیرگذار بسیار زیاد، از جمله این مسائل پیچیده به شمار می‌روند. همان طور که ذکر شد، به دلیل اهمیت بالای موضوع در مهندسی شیب‌های سنگی، تاکنون رویکردهای متعددی به منظور تحلیل پایداری ارائه شده و مورد استفاده

---

<sup>1</sup> Hudson

<sup>2</sup> Rock Engineering Systems

قرار گرفته است که در این میان تنها رویکرد سیستمی توانایی این را داشته است که تمامی اجزای موثر بر پایداری و همین طور مهم‌تر از آن، تأثیر این اجزا بر همدیگر را در تحلیل‌ها مورد توجه قرار دهد.

در این تحقیق سعی بر آن است که پایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌یلاق واقع در مسیر ارتباطی شاهرود- آزادشهر به کمک رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) تحلیل شده و یک رده‌بندی از این شیب‌ها ارائه گردد.

در ادامه این گزارش، در فصل دوم ابتدا در مورد اصول مهندسی شیب‌های سنگی بحث می‌شود. همچنین رویکردهای اصلی و مرسوم تحلیل پایداری شیب‌ها مورد بررسی قرار گرفته و مزایا و محدودیت‌های هر یک آورده می‌شود. در فصل سوم پس از اشاره مختصر به مفهوم سیستم‌ها و تفکر سیستمی، اجزای مختلف در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ معرفی می‌شوند. همچنین در این فصل، سابقه موضوع مورد مطالعه به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد، به طوری که پس از بررسی سابقه استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف علوم مهندسی، سابقه موضوع از منظر کاربرد RES در مطالعات پایداری شیب‌ها نیز بررسی و تحلیل می‌شود. در فصل چهارم، در منطقه مورد مطالعه و شیب‌های سنگی انتخاب‌شده بحث می‌شود. در فصل پنجم، پایداری شیب‌های انتخاب شده با استفاده از رویکرد سیستمی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در نهایت پهنه‌بندی این فاکتور برای مسیر مورد مطالعه ارائه می‌شود. فصل ششم نیز نتیجه‌گیری و جمع‌بندی کوتاهی از گزارش را شامل می‌شود.

## ۲-۱- مقدمه

طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های مهندسی نیاز به ایجاد برش‌هایی در سنگ به نام شیب‌های سنگی دارند. پروژه‌هایی نظیر سیستم‌های حمل و نقل شامل بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی، سدها و نیروگاه‌های برق-آبی و پروژه‌های حفاری صنعتی و شهری از این دست می‌باشند. همچنین معادن روباز بخش قابل‌توجهی از تولید مواد معدنی را در جهان تشکیل می‌دهند که به صورت ذاتی شکل‌گیری چنین معادنی با ایجاد شیب‌های سنگی امکان‌پذیر است. علاوه بر چنین حفاری‌های مصنوعی، در مناطق کوهستانی پایداری شیب‌های سنگی طبیعی بسیار مورد توجه می‌باشد. به عنوان مثال، بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی واقع در دره‌ها معمولاً در پایین دست چنین شیب‌هایی قرار گرفته‌اند.

وقوع شکست در شیب‌های سنگی می‌تواند شامل سقوط سنگ، ناپایداری کل شیب و در نتیجه وقوع زمین لغزش و نیز شکست در شیب‌های معادن روباز باشد. عواقب چنین شکست‌هایی با توجه به نوع و محل پروژه متفاوت بوده و گاهی می‌تواند از نظرات اقتصادی و یا جانی لطمات جبران‌ناپذیری وارد نماید (Abramson et al., 2001).

تحلیل پایداری شیب‌های سنگی عموماً به منظور ارزیابی یک طراحی ایمن و اجرایی برای شیب‌های مصنوعی نظیر شیب‌های معادن روباز و جاده‌ها و نیز آنالیز شرایط تعادلی شیب‌های طبیعی به کار می‌رود. انتخاب

رویکرد قابل استفاده در هر مورد به نوع و شرایط سایت و نوع شکست احتمالی بستگی دارد که در عین حال عواملی همچون تغییر در شرایط مقاومتی مواد و محدودیت‌های ذاتی رویکردها و روش‌های تحلیل پایداری بایستی مد نظر قرار گیرد (Eberhardt, 2003).

با این تفاسیر، اهداف کلی تحلیل پایداری شیب‌های سنگی عبارتند از (Abramson *et al.*, 2001; Chowdhury, 1978):

۱. ارزیابی و تعیین وضعیت پایداری شیب‌ها تحت شرایط بخصوص آنها؛
۲. سنجش و ارزیابی امکان رخداد شکست در شیب‌های سنگی؛
۳. مقایسه تأثیرات ناشی از عملیات پیشگیرانه مانند پایدارسازی‌های مختلف؛
۴. آنالیز حساسیت به منظور ارزیابی تأثیر تغییرات در پارامترهای کلیدی نظیر مشخصات هندسی، خصوصیات مواد و شرایط آب زیرزمینی بر روی پایداری شیب‌ها؛
۵. آنالیز شکست‌هایی که قبلاً رخ داده‌اند، این امر می‌تواند در شناخت مکانیسم‌های شکست در منطقه بسیار سودمند باشد؛
۶. طراحی سازوکارهای علاج‌بخش و یا پیشگیرانه در مورد شکست شیب‌های سنگی، و
۷. ارزیابی تأثیر بارهای اضافی بر روی شیب‌ها در موارد استثنایی مانند زلزله.

## ۲-۲- اصول مهندسی شیب‌های سنگی

در این بخش مسائل اولیه‌ای که در تحلیل و طراحی پایداری شیب‌های سنگی در پروژه‌های عمرانی و معدنی بایستی در نظر گرفته شوند به اختصار تشریح خواهند شد. تفاوت اصلی مابین این دو نوع پروژه در این است که در مهندسی عمران به درجه بالاتری از قابلیت اطمینان به شیب‌های سنگی نیاز است، چرا که در چنین پروژه‌هایی شکست شیب‌ها و یا حتی سقوط سنگ به هیچ وجه قابل قبول نمی‌باشد. در مقابل، میزانی از جابجائی و یا شکست جزئی در شیب‌های معادن روباز به شرط عدم ایجاد وقفه در تولید می‌تواند قابل چشم‌پوشی باشد. در این پروژه‌ها سقوط سنگ اغلب از عواقب کمتری بسیار کمتری برخوردار است. همچنین در معادن روباز، مکان قرارگیری یک شیب تقریباً ثابت و غیرقابل تغییر است، در حالی که در مورد یک جاده این امر صحت نداشته و طراحی مسیر عبور آن در صورت پیش‌بینی مواجهه با مشکلی از نظر پایداری قابل تغییر است. با این حال، پارامترهای طراحی برای پروژه‌های عمرانی و معادن روباز به جز در مواردی مانند شکل و زاویه شیب (و تا حدی ارتفاع شیب) یکسان می‌باشند. از طرفی عمر یک شیب سنگی معدن روباز معمولاً بسیار کوتاه‌تر از عمر در نظر گرفته شده برای شیب‌های عمرانی نظیر شیب‌های جاده است. همین‌طور مسائل اقتصادی در معادن روباز (با حساسیت بر روی هندسه شیب) تا حد بسیار زیادی بااهمیت‌تر از کارهای عمرانی می‌باشد (Ross-Brown, 1972). شکل ۱-۲ نمایی از دو نوع پروژه یادشده را نشان می‌دهد. در ادامه توضیحات بیشتر در مورد انواع پروژه‌های یاد شده ارائه می‌گردد.



(ب)

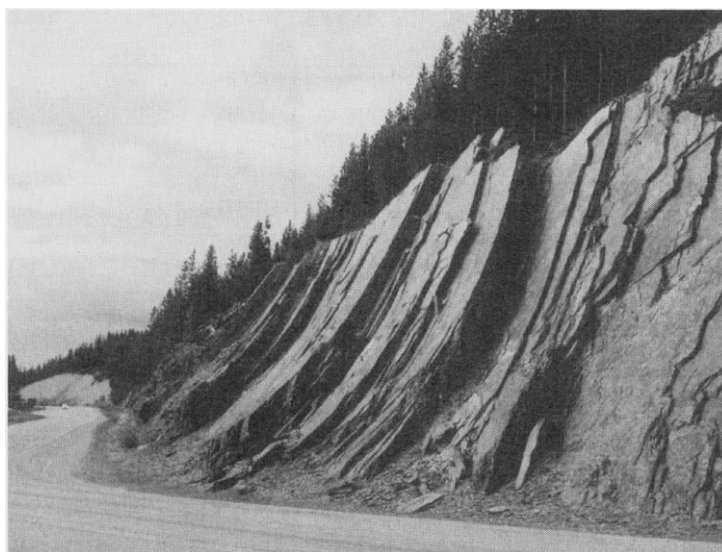


(الف)

شکل ۲-۱- نمایی از پروژه‌های مرتبط با مسائل پایداری شیب‌های سنگی؛ الف- شیب‌های حاشیه جاده‌ها (<http://www.geog.nau.edu>)، ب- معادن روباز (Read, 2005)

مبحث طراحی شیب‌های سنگی در پروژه‌هایی نظیر جاده‌ها، بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی معمولاً با جزئیات زمین‌شناسی ساختمانی در ارتباط است. این مورد شامل جهت‌یافتگی و خصوصیات درزه‌ها (نظیر طول یا امتداد، زبری و مواد پرکننده)، لایه‌بندی و گسل‌ها در زیر رخساره سنگی می‌باشد. به عنوان مثال شکل ۲-۲ یک شیب سنگی شامل صفحات لایه‌بندی از شیل نرم را نشان می‌دهد که در آن لایه‌بندی‌ها در تمام ارتفاع شیب دارای گستردگی بوده و دارای زاویه ۵۰ درجه نسبت به جاده می‌باشد. به دلیل اینکه این ناپیوستگی‌ها دارای زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ تا ۲۵ درجه هستند، هرگونه تلاشی جهت حفاری و ایجاد این شیب سنگی در زاویه‌ای بیشتر از زاویه قرارگیری لایه‌بندی‌ها سبب لغزش بلوک‌های سنگی از رخساره لایه‌بندی‌های شیلی خواهد شد. با این حال اگر جهت مسیر جاده کمی به سمت راست متمایل گردد، با توجه به زاویه بیشتر لایه‌بندی‌ها در آن ناحیه (قسمت سمت راست در شکل ۲-۲)، می‌توان شیب‌های سنگی با زاویه‌های بالاتر را نیز برای این مورد در نظر گرفت (Wyllie & Mah, 2004). چنین مثالی اهمیت مبحث یاد شده را در این نوع پروژه‌ها به طور کامل نشان می‌دهد.





شکل ۲-۲- شیب سنگی با لایه‌بندی شیل پیوسته و صفحه‌ای در بزرگراه ترانس کانادا در آلبرتا  
کانادا (Wyllie & Mah, 2004)

برای بسیاری از شیب‌های سنگی در پروژه‌های عمرانی، تنش‌های موجود در سنگ بسیار کمتر از مقاومت آن بوده و بنابراین نگرانی زیادی نسبت به ایجاد شکست در ماده‌سنگ وجود نخواهد داشت. بدین ترتیب، در طراحی اولیه شیب‌ها، مقاومت بلوک‌های سنگی که در اثر ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها به وجود آمده‌اند، از اهمیت بالاتری برخوردار خواهد بود. در این حالت، مقاومت ماده‌سنگ به صورت غیرمستقیم در تحلیل پایداری شیب به کار رفته و تأثیر آن اغلب با پارامترهایی نظیر مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها و توده‌سنگ در طراحی‌ها و تحلیل‌ها وارد می‌گردد (Wyllie & Mah, 2004).

## ۲-۳- انواع شکست در شیب‌های سنگی

به طور کلی سه نوع متفاوت سطح لغزندگی و ناپایداری را می‌توان در شیب‌های سنگی تصور کرد (شکل

۳-۲). گونه‌های اصلی شکست به صورت زیر است (Wyllie & Mah, 2004):

۱- شکست صفحه‌ای<sup>۳</sup>

۲- شکست گوه‌ای<sup>۴</sup>

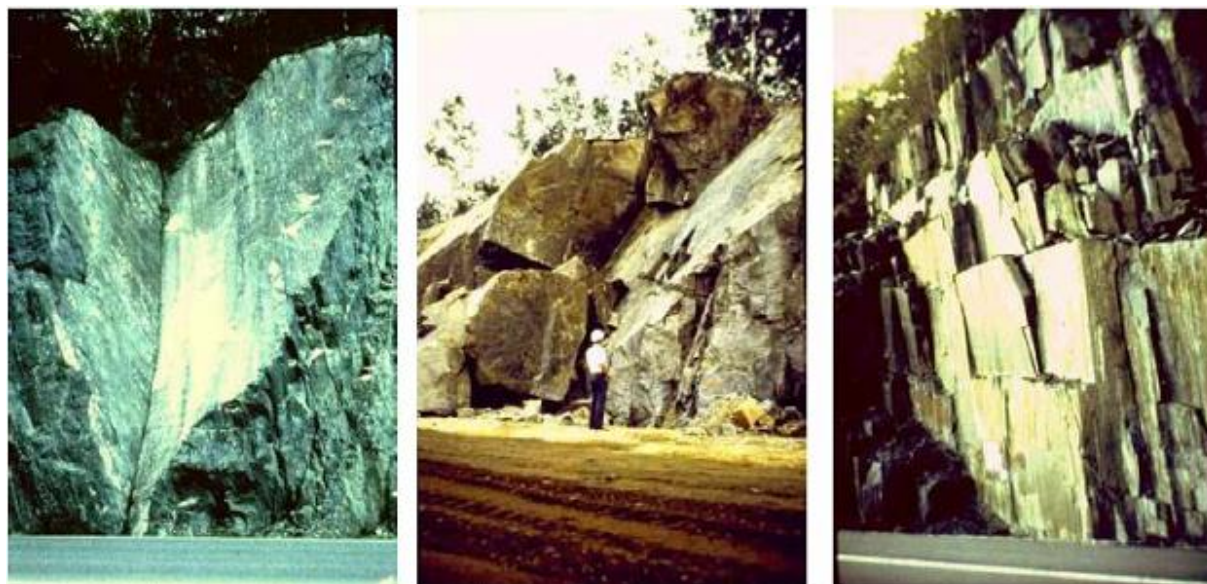
۳- شکست مجموعه‌ای از سطوح لغزش

شکست صفحه‌ای پله‌ای و شکست صفحه‌ای چند بلوکی از اقسام شکست صفحه‌ای می‌باشند. شکست گوه‌ای

چند سطحی و شکست چند گوه‌ای نیز از انواع شکست گوه‌ای می‌باشند؛ و شکست‌های قاشقی یا دایره‌ای و

واژگونی و پوسته‌ای از انواع شکست‌های مجموعه‌هایی از سطوح لغزش هستند (شکل ۳-۲). این شکست‌ها در

ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.



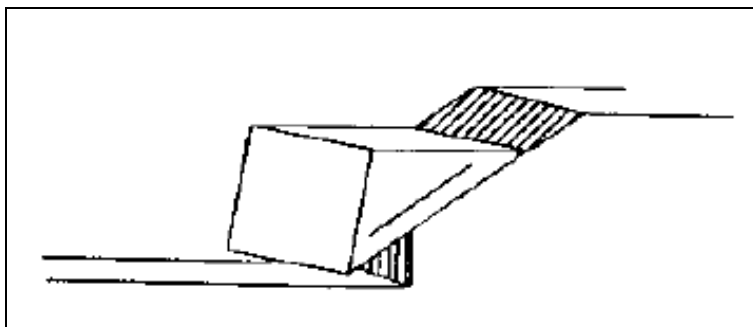
شکل ۳-۲- نمونه‌هایی از شکست در شیب‌های سنگی (Mears, 2000)

<sup>3</sup> Plane failure

<sup>4</sup> Wedge failure

۲-۳-۱- شکست تک صفحه‌ای - مسطح<sup>۵</sup>

شکست صفحه‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که یک ناپیوستگی با شیب کمتر از شیب دیواره و یا تقریباً موازی با آن در توده سنگ وجود داشته باشد و جهت شیب آن به سمت فضای حفر شده باشد (شکل ۲-۴). این شکست ساده‌ترین نوع شکست است. در صورتی که ناپیوستگی سطح شیب را قطع کند و همچنین شیب ناپیوستگی بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی سنگ باشد، رخ دادن شکست قریب‌الوقوع خواهد بود.

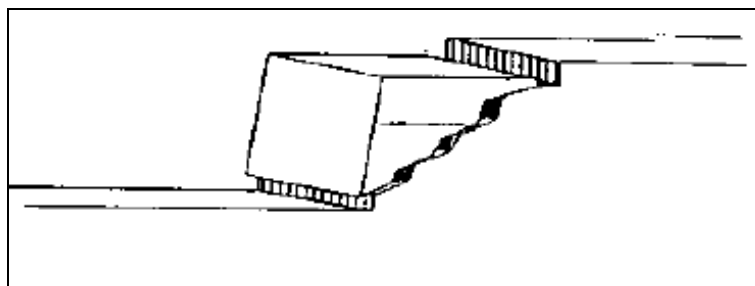


شکل ۲-۴- شکست تک صفحه‌ای - مسطح (Wyllie &amp; Mah, 2004)

۲-۳-۲- شکست صفحه‌ای - پله‌ای<sup>۶</sup>

شکست صفحه‌ای - پله‌ای شبیه شکست صفحه‌ای است؛ اما این شکست زمانی رخ می‌دهد که تعدادی از دسته درزه‌ها با فاصله‌داری کم، امتدادی تقریباً موازی با امتداد شیب و جهت شیبی به سمت فضای حفر شده داشته باشند (شکل ۲-۵).

<sup>۵</sup> Single block- single plane failure<sup>۶</sup> Single block- stepped plane failure

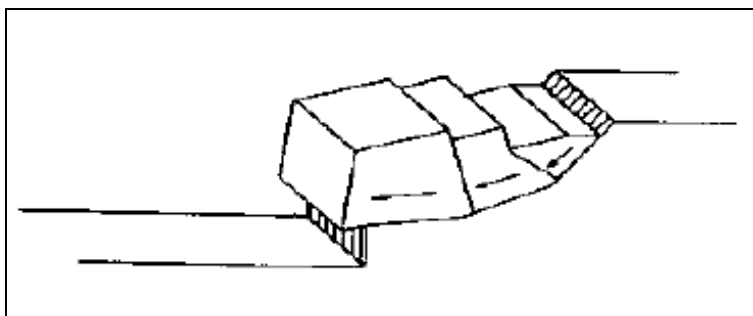


شکل ۲-۵- شکست صفحه‌ای- پله‌ای (Wyllie & Mah, 2004)

## ۲-۳-۳- شکست صفحه‌ای چند بلوکی - چند سطحی<sup>۷</sup>

شکست صفحه‌ای چند بلوکی در طول چند سطح شکست، پیچیده‌ترین نوع شکست صفحه‌ای است (شکل ۲-۶). مکانیزم این شکست با دو یا چند دسته درزه مرتبط است که امتدادی تقریباً موازی با سطح شیب دارند و جهت شیب آنها به سمت فضای حفر شده است. حداقل یکی از دسته درزه‌ها باید سطح شیب را قطع کند. برای وقوع شکست، باید شیب دسته درزه‌ای که در زیر اکثر بلوک‌ها قرار دارد، از زاویه اصطکاک داخلی بیشتر باشد. همچنین، بقیه درزه‌ها باید به گونه‌ای باشند که امتدادشان تقریباً موازی با امتداد سطح شیب و شیب آنها تقریباً نزدیک به قائم یا در جهت مخالف با سطح شیب باشد.

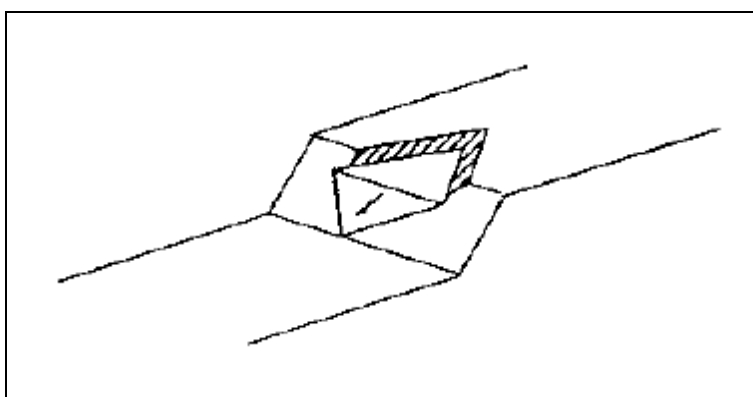
<sup>7</sup> Multiple block- multiple planes failure



شکل ۶-۲- شکست صفحه‌ای چند بلوکی - چند سطحی (Wyllie & Mah, 2004)

## ۲-۳-۴- شکست گوه‌ای

این نوع شکست در توده‌سنگ‌هایی رخ می‌دهد که دارای دو یا چند دسته درزه هستند و امتداد فصل مشترک آنها تقریباً با امتداد سطح شیب یکسان و شیب آن به سمت سطح شیب باشد (شکل ۷-۲). همچنین وقوع شکست گوه‌ای نیازمند این است که زاویه شیب حداقل یکی از فصول مشترک ناپیوستگی‌ها، بزرگتر از زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه باشد و خط فصل مشترک، سطح شیب را قطع کند.

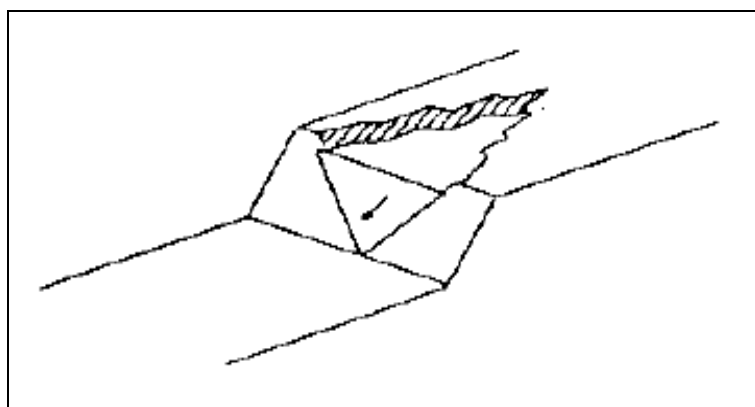


شکل ۷-۲- شکست گوه‌ای (Wyllie & Mah, 2004)

۲-۳-۵- شکست تک‌گوه‌ای - چند سطحی<sup>۸</sup>

شرایط وقوع این شکست، که حداقل از دو دسته درزه با فاصله‌داری کم تشکیل می‌شود، مشابه با شکست

گوه‌ای ذکر شده است، با این تفاوت که سطح شکست ناصاف و پله مانند است (شکل ۲-۸).



شکل ۲-۸- شکست تک‌گوه‌ای - چند سطحی (Wyllie & Mah, 2004)

۲-۳-۶- شکست چند گوه‌ای - چند سطحی<sup>۹</sup>

این شکست می‌تواند با تقاطع چهار یا بیش از چهار دسته ناپیوستگی شکل گیرد (شکل ۲-۹). هر چند

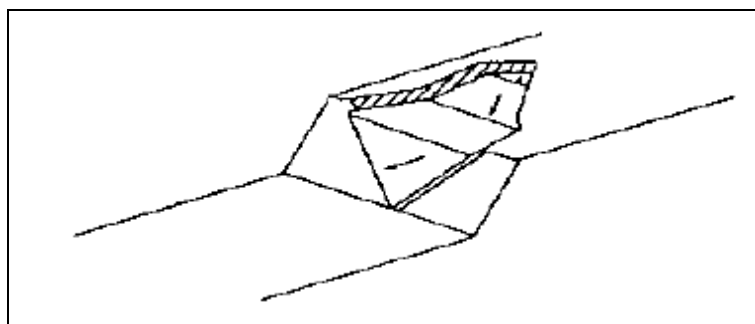
تصور شکست چند گوه‌ای امکان دارد، اما این شکست معمولاً در اثر نیروهای بالقوه وارده از گوه بالایی به گوه

پایدار پایینی رخ می‌دهد و به این ترتیب هر دو گوه از حالت پایدار خارج شده و می‌لغزند. برای به‌وجود آمدن

<sup>۸</sup> Single wedge- multiple intersection failure

<sup>۹</sup> Multiple Wedge-Multiple Intersecting Failure

شرایط فوق، لازم است تا گوه پایینی روی یک ناپیوستگی با شیب کمتر قرار گرفته باشد تا به تنهایی پایدار بماند.

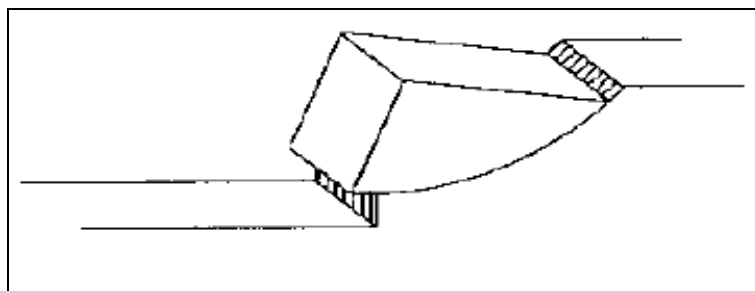


شکل ۲-۹- شکست چند گوه‌ای- چند سطحی (Wyllie & Mah, 2004)

## ۲-۳-۲- شکست قاشقی یا دایره‌ای<sup>۱۰</sup>

این شکست که در طول یک سطح شکست دایره‌ای رخ می‌دهد، معمولاً در دیواره‌های سنگی به شدت درزه‌دار یا هوازده و ضعیف با ارتفاع زیاد و همچنین در شیب‌های خاکی رخ می‌دهد (شکل ۲-۱۰). همچنین، وجود آب در پای شیب و وجود ترک کششی در سطح شیب و پشت لبه شیب می‌تواند موجب شکست قاشقی شود. معمولاً قبل از وقوع این نوع شکست، ترک‌های کششی در بالای سطح پله ایجاد می‌شوند که نشان‌دهنده حرکت توده‌سنگ به سمت فضای حفر شده است.

<sup>10</sup> Circular Path/Spoon Failure



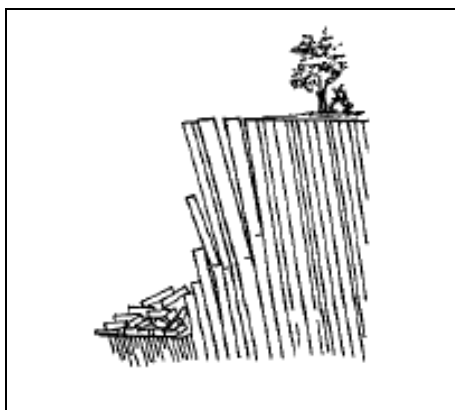
شکل ۲-۱۰- شکست قاشقی یا دایره‌ای (Wyllie & Mah, 2004)

## ۲-۳-۸- شکست واژگونی<sup>۱۱</sup>

شکست واژگونی شامل واژگون شدن یا چرخیدن لایه‌ها و قطعات سنگی است (شکل ۲-۱۱). ناپیوستگی‌های نزدیک به هم و دارای شیب زیاد که جهت شیبی مخالف با سطح شیب دارند و بلوک‌های سنگی با قاعده کم و ارتفاع زیاد را می‌سازند، پیش‌نیاز شکست واژگونی هستند. در غیاب سیستم‌های متقاطع ناپیوستگی، لایه‌ها تمایل دارند تا بر اثر نیروی وزن خود به سمت پایین شیب خم شوند، بنابراین ترک‌های موجی شکل را به وجود می‌آورند. اما در صورتی که ناپیوستگی‌های متقاطع وجود داشته باشند، لایه‌ها می‌توانند به صورت قطعات صلب، واژگون شوند.

<sup>11</sup> Toppling Failure



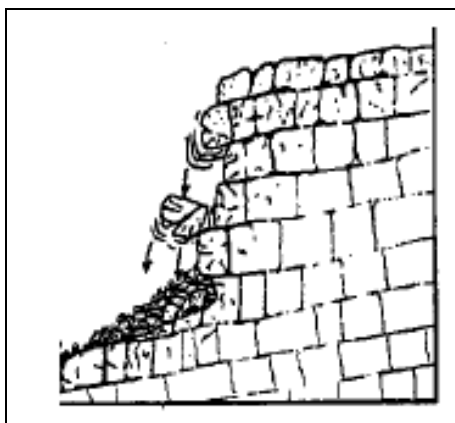


شکل ۱۱-۲- شکست واژگونی (Wyllie & Mah, 2004)

## ۲-۳-۹- شکست پوسته‌ای<sup>۱۲</sup>

این شکست، معمولاً همراه با شکست واژگونی و یا سقوط موضعی سنگ‌های تخریب شده در اثر سیکل‌های متناوب هوازگی رخ می‌دهد (شکل ۱۲-۲). این نوع شکست معمولاً از اهمیت بالایی برخوردار نیست، چرا که خسارات آن بسیار محدود و وقوع آن به صورت موضعی است. برای شکست پوسته‌ای و شکست واژگونی نمی‌توان فاکتور ایمنی را محاسبه کرد، به همین دلیل برای تعیین پایداری آنها از راه حل‌های تحلیلی استفاده می‌شود.

<sup>12</sup> Sloughing/Raveling failure



شکل ۲-۱۲- شکست پوسته‌ای (Wyllie & Mah, 2004)

## ۲-۴- رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

زمانی که صحبت از تحلیل پایداری یک شیب سنگی به میان می‌آید، تقریباً همواره در تمامی رویکردهای موجود، عامل برش در امتداد سطح لغزش ناپیوستگی و یا در یک زون در پشت رخساره شیب به عنوان پارامتر اصلی در نظر گرفته می‌شود. اگر نیروی برشی (نیروی جداکننده) بزرگتر از مقاومت برشی سنگ (نیروی مقاوم) در سطح لغزش باشد، شیب ناپایدار خواهد بود. ناپایداری یک جابجایی در شیب سنگی ایجاد می‌نماید که در نتیجه آن، ممکن است با ریزشی ناگهانی و یا تدریجی مواجه باشیم. تعریف ناپایداری وابستگی زیادی به نوع پروژه و کاربرد شیب‌های سنگی مورد نظر دارد. به عنوان مثال، یک شیب معدن روباز ممکن است جابجایی‌های بسیاری را بدون تأثیر منفی روی عملیات معدنی تحمل نماید. در حالی که برای شیب‌های سنگی نگهدارنده پایه‌های یک پل، معمولاً بایستی مقادیر بسیار پایینی از جابجایی را داشته باشیم (Sjoberg, 1999).

بر مبنای چنین مفاهیمی از پایداری شیب، این پدیده می‌تواند توسط پارامترهایی به صورت عددی بیان گردد

(Wyllie & Mah, 2004):

الف- فاکتور ایمنی<sup>۱۳</sup>: نشان دهنده میزان تعادل و پایداری یک شیب است و چنانچه  $FS > 1$  باشد، وضعیت آن پایدار می‌باشد.

ب- جابجایی یا کرنش<sup>۱۴</sup>: شکست می‌تواند توسط کرنش‌ها و جابجایی‌های شروع شود که به اندازه‌ای بزرگ هستند که قادرند یک شرایط ناامن را برای انواع فعالیت‌ها ایجاد نمایند.

ج- احتمال شکست<sup>۱۵</sup>: پایداری می‌تواند به وسیله توزیع احتمال تفاضل بین نیروهای جداکننده و مقاوم به صورت عددی درآید. در این حالت، هر یک از نیروها نیز دارای توزیع احتمال جداگانه‌ای خواهند بود.

امروزه استفاده از فاکتور ایمنی مرسوم ترین روش در تحلیل پایداری شیب‌ها بوده و در انواع پروژه‌های مرتبط با شرایط مختلف زمین‌شناسی تجارب موفقی از اعمال این پارامتر در طراحی‌ها و تحلیل‌ها موجود است. معمولاً فاکتور ایمنی مورد قبول برای هر نوع از پروژه‌ها را به صورت جداگانه طی بازه‌هایی از اعداد بیان می‌کنند که حدود بالا و پایین این بازه‌ها با توجه به اهمیت پروژه و انتظارات متصور از آن تعیین می‌شود. به عنوان مثال می‌توان به موارد پیشنهادی توسط ترزاقی<sup>۱۶</sup> و پک<sup>۱۷</sup> (Terzaghi & Peck, 1967) و انجمن ژئوتکنیک کانادا (Canadian Geotechnical Society, 1992) اشاره نمود.

در این بخش به معرفی رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی پرداخته شده و در هر مورد به مزایا و محدودیت‌های آنها اشاره می‌شود. شایان ذکر است که در این قسمت، مبحث شیب‌های سنگی با تعریف

<sup>13</sup> Factor of Safety (FS)

<sup>14</sup> Strain

<sup>15</sup> Probability of Failure

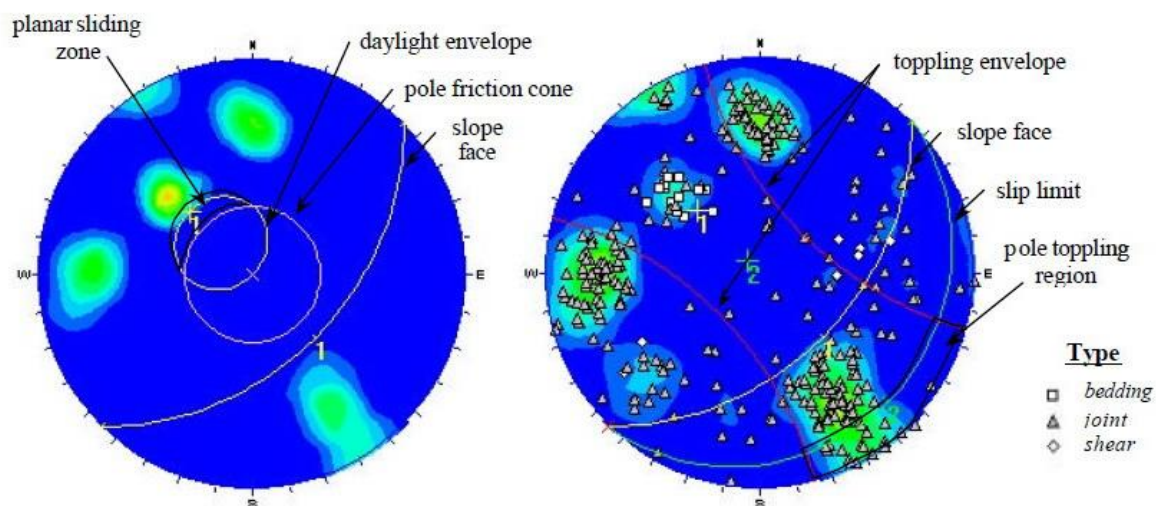
<sup>16</sup> Terzaghi

<sup>17</sup> Peck

مهندسی و واقعی خود و بدون توجه به کاربرد خاصی مورد بحث قرار می‌گیرد. کلیه رویکردهای اشاره شده صرف نظر از کاربرد در پروژه‌های مهندسی و یا شیب‌های طبیعی مورد توجه بوده است.

## ۲-۴-۱- روش استریوگرافیک

روش‌های استریوگرافی اصولاً بر مبنای امکان‌سنجی شکست در نتیجه ایجاد حرکت گوه‌ها یا صفحات لغزش در شیب‌های سنگی می‌باشند. در این روش‌ها، نیاز است که ساختار توده‌سنگ و هندسه دسته درزه‌های موجود که ممکن است باعث ناپایداری در بلوک‌ها شوند، مورد ارزیابی قرار گیرند. این کار می‌تواند با استفاده از شبکه‌های استریونت (شبکه‌های ولف، اشمیت و یا قطبی) و یا نرم‌افزارهای کامپیوتری صورت گیرد که در هر حال تأکید بر ارزیابی امکان ایجاد گوه‌ها و صفحات در توده‌سنگ می‌باشد (Eberhardt, 2003). به عنوان مثال، نرم‌افزار DIPS (Rocscience, 2002) قادر است با به تصویر کشیدن داده‌های وارد شده مربوط به مشخصات درزه‌ها، پوش‌های شکست در یک شیب سنگی را به صورت گرافیکی بر روی صفحه استریونت نمایش دهد (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳- تصاویر استریوگرافیک برای تحلیل شکست‌های صفحه‌ای (چپ) و واژگونی (راست)  
(Eberhardt, 2003)

از مزایای روش‌های استریوگرافی می‌توان به سادگی نسبی آن اشاره کرد که در عین حال یک دید اولیه از پتانسیل شکست در شیب سنگی ارائه می‌دهد. این روش همچنین اجازه شناسایی و تحلیل بلوک‌های کلیدی بحرانی را با استفاده از تئوری بلوکی می‌دهد. همین طور، در صورت ترکیب روش با تکنیک‌های آماری، می‌توان احتمال شکست را نیز تعیین نمود. از طرفی، این روش تنها برای طراحی‌ها و تحلیل‌های اولیه و طراحی شیب‌های غیر بحرانی به کار برده می‌شود. در این روش، ناپیوستگی‌های مهم و تعیین‌کننده در شیب سنگی باید معلوم گردند. علاوه بر اینها، این روش تنها از داده‌های مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها استفاده کرده و از سایر مشخصات مهم درزه‌ها صرف‌نظر می‌شود؛ بنابراین تنها برای یک ارزیابی اولیه از وضعیت پایداری شیب‌های سنگی به کار می‌رود (Eberhardt, 2003).

## ۲-۴-۲- روش‌های تجربی

طی چند دهه اخیر، سیستم‌های متعددی برای طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ ارائه شده‌اند که از میان

آنها طبقه‌بندی‌هایی مانند <sup>۱۸</sup>RMR (Bieniawski, 1989)، <sup>۱۹</sup>RMS (Selby, 1980)، <sup>۲۰</sup>SMR (Romana, 1985)،

<sup>۲۱</sup>SRMR (Robertson, 1988)، <sup>۲۲</sup>CSMR (Chen, 1995)، <sup>۲۳</sup>GSI (Hoek *et al.*, 1995)، <sup>۲۴</sup>RDA (Nicholson, 2002)،

<sup>۲۵</sup>SSPC (Hack *et al.*, 2003)، <sup>۲۶</sup>VRFSR (Singh & Connolly, 2003) و <sup>۲۷</sup>FRHI (Singh, 2004) در تحلیل پایداری

شیب‌های سنگی کاربرد داشته‌اند. برخی از این سیستم‌ها حالت کلی داشته و برخی دیگر اصولاً جهت کاربرد

در مسائل مربوط به شیب‌ها ارائه شده‌اند.

سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ از نتایج تجربیات در نقاط خاصی از دنیا و نوع بخصوصی از توده‌سنگ‌ها در

شرایط محلی خاص بدست آمده‌اند (Pantelidis, 2008). اگر چه بسیاری از این سیستم‌ها در نقاط دیگر نیز

توسط افراد مورد اعتبارسنجی قرار گرفته و اغلب ارتقا یافته‌اند، همچنان مورد ذکر شده از مهمترین معایب

این روش‌ها است. علاوه بر این، این رده‌بندی‌ها بر پایه تئوری مجموعه‌های کلاسیک ارائه شده‌اند. رده‌بندی‌های

---

<sup>18</sup> Rock Mass Rating

<sup>19</sup> Rock Mass Strength

<sup>20</sup> Slope Mass Rating

<sup>21</sup> Slope Rock Mass Rating

<sup>22</sup> Chinese Slope Mass Rating

<sup>23</sup> Geological Strength Index

<sup>24</sup> Rockslope Deterioration Assessment

<sup>25</sup> Slope Stability Probability Classification

<sup>26</sup> Volcanic Rock Face Safety Rating

<sup>27</sup> Falling Rock Hazard Index

مبتنی بر تئوری مجموعه‌های کلاسیک به علت ناتوانی در ارائه تعریف مناسب در محدوده رده‌بندی‌ها، خصوصاً در مرزها، باعث بروز مشکلات و اشتباهاتی در طراحی‌ها می‌شوند (Pantelidis, 2008).

## ۲-۴-۳- روش‌های تحلیل تعادل حدی

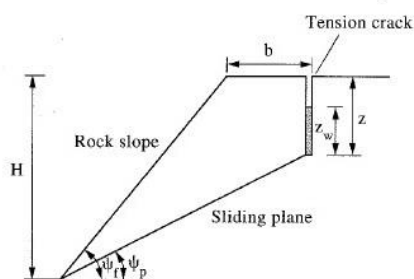
روش‌های تعادل حدی در تحلیل پایداری و حرکت انتقالی یا دایره‌ای صفحات جداشده از شیب‌ها کاربرد بسیار مرسوم دارند. این تحلیل‌ها یا به یک فاکتور ایمنی ختم شده و یا با استفاده از آنالیز برگشتی، پارامترهای برشی در لحظه شکست را به دست می‌آورند. علیرغم اینکه بسیاری از شکست‌ها در شیب‌ها در اثر تغییرشکل‌ها و جابجایی‌های پیچیده داخلی روی می‌دهند، با این حال، این تحلیل‌ها معمول‌ترین روش در حل مسائل مهندسی شیب‌های سنگی به شمار می‌روند. با این وجود، تحلیل‌های تعادل حدی تنها قادر به تحلیل شکست در امتداد ناپیوستگی‌ها و یا شیب‌های سنگی با ساختار بسیار هوازده و دارای شکستگی‌های زیاد (با رفتاری شبیه به محیط خاکی) می‌باشند (Aryal, 2006).

تمام تکنیک‌های تعادل حدی از رویکردی بر مبنای مقایسه نیروهای مقاوم با نیروهای وارده و شروع‌کننده جابجایی استفاده می‌کنند. این روش‌ها با توجه به مکانیسم شکست شیب به سه دسته آنالیز حرکت انتقالی، واژگونی و یا دایره‌ای شکستگی تقسیم می‌شوند که در این بخش اصول هر یک به اختصار شرح داده شده و در مورد مزایا و محدودیت‌های آنها بحث می‌شود.

## ۲-۴-۳-۱- آنالیز حرکت انتقالی

روش‌های تعادل حدی برای شکست‌های صفحه‌ای و گوه‌ای در تحلیل‌هایی که ناپایداری شیب‌های سنگی در کنترل ناپیوستگی‌ها است، به کار می‌روند. در شکست صفحه‌ای، لغزش بر روی یک سطح اتفاق می‌افتد. این سطح لغزش می‌تواند گسل، لایه‌بندی و یا درزه باشد. همین طور، شکست گوه‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که دو صفحه ناپیوستگی بصورت مورب در لبه و دامنه شیب گسترش یافته و همدیگر را قطع نمایند. این فرضیات، مسئله را از نظر استاتیکی در حالت معین قرار داده و محاسبه نسبت نیروهای مقاوم بر نیروهای وارده (فاکتور ایمنی) را ممکن می‌سازد. نیروهای مقاوم در اثر مقاومت برشی صفحه یا صفحات لغزش (مانند چسبندگی و اصطکاک) ایجاد شده و نیروهای وارده نیز متأثر از مولفه عمودی وزن بلوک در حال لغزش و نیز فشار آب در امتداد مرز بلوک می‌باشد (Hoek & Bray, 1981; Sharma *et al.*, 1995). این نیروها به همراه فرمول‌بندی فاکتور ایمنی برای مسائل پایداری صفحه‌ای و گوه‌ای به ترتیب در شکل‌های ۲-۱۴ و ۲-۱۵ نشان داده شده‌اند.

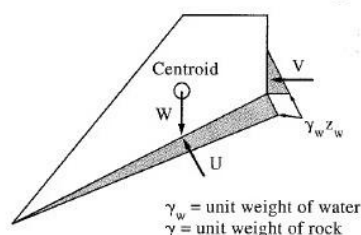




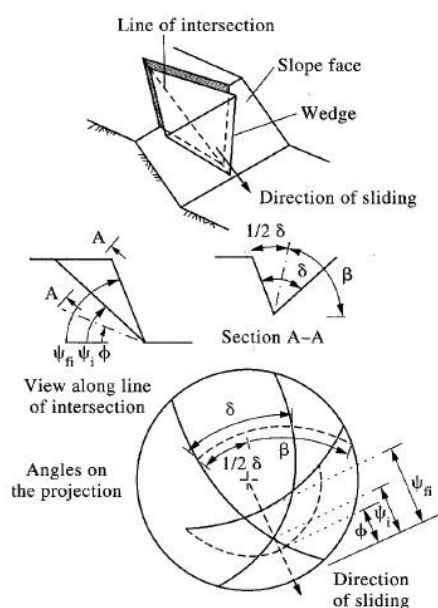
$$SF = \frac{c' (H - z) \csc \psi_p + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'}{V \cos \psi_p + W \sin \psi_p}$$

Where:

- $SF$  = safety factor
- $c'$  = effective cohesion
- $\phi'$  = effective friction angle
- $\psi_p$  = dip of slide plane
- $W$  = weight of block
- $U$  = uplift force due to water pressure along slide plane
- $V$  = force due to water pressure in tension crack
- $H$  = slope height
- $z$  = tension crack depth

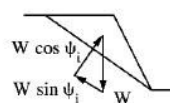


شکل ۲-۱۴- تحلیل تعادل حدی برای شکست صفحه‌ای (Hudson & Harrison, 1997)

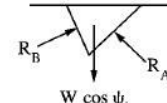


#### Forces on wedge

View perpendicular to line of intersection



View along line of intersection



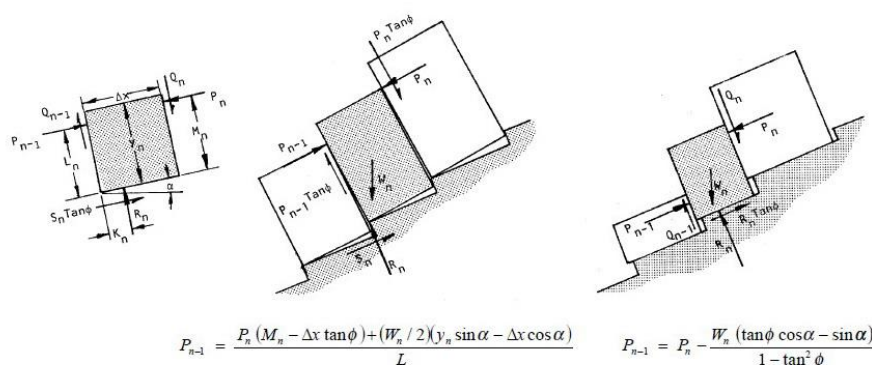
$$SF = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i}$$

$$\text{and } R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin(0.5 \delta)}$$

- Where:  $SF$  = safety factor
- $\phi$  = friction angle
- $\psi_i$  = dip of the line of intersection
- $W$  = weight of block
- $\beta, \delta$  = wedge geometry factors

شکل ۲-۱۵- تحلیل تعادل حدی برای شکست گوه‌ای در شرایط خشک (Hudson & Harrison, 1997)

اگر بلوکی که بر روی سطح شیب‌دار قرار دارد، دارای ارتفاع زیاد و قاعده کم باشد، بلوک سنگی علاوه بر لغزش تمایل به واژگونی نیز دارد. حرکت واژگونی می‌تواند خود ترکیبی از لغزش و واژگونی باشد که در اینصورت تحلیل تعادل حدی مربوط به آن در چند قسمت انجام می‌شود (Hoek & Bray, 1981). تحلیل نیروهای وارده بصورت گرافیکی و فرموله در شکل ۱۶-۲ آورده شده است.



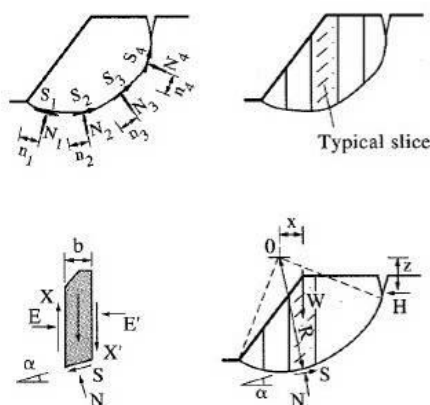
شکل ۱۶-۲- شرایط تعادل حدی برای شکست واژگونی (Hoek & Bray, 1981)

## ۲-۴-۳- آنالیز حرکت دایره‌ای

برای سنگ‌های بسیار ضعیف و دارای درزه و ترک‌های بسیار زیاد، ساختار توده‌سنگ نوع شکست و یا پایداری شیب را کنترل نکرده و در این حالت با شکستی مشابه آنچه در خاک‌ها دیده می‌شود، روبرو هستیم. این نوع از شکست به نام شکست دایره‌ای معروف است. در تحلیل پتانسیل شکست این محیط‌ها، آنچه بایستی در نظر گرفته شود، سطح لغزش بحرانی و تعیین فاکتور ایمنی در امتداد آن است (Hoek & Bray, 1981). برای این کار، شیب به چندین قطعه تقسیم شده و وضعیت نیروها برای هر قطعه محاسبه می‌شود (شکل ۱۷-۲). برای این نوع تحلیل، روش‌های مختلفی با توجه به فرضیات متفاوت ارائه شده است. از جمله این روش‌ها

می‌توان به روش بیشاپ اصلاح‌شده (Bishop, 1955)، روش ساده‌شده جانبو (Janbu, 1968)، روش سوئدی

اصلاح‌شده (U.S. Army Corps of Engineers, 1970)، روش سارما (Sarma, 1973) و ... اشاره نمود.



$$SF = \frac{\sum SF (S \sec \alpha)}{\sum (W \sin \alpha) + H z / R}$$

Where:  $SF$  = safety factor

$S$  = effective shear strength  
(i.e.  $S/\Delta b = c' + \sigma_n \tan \phi$ )

$\alpha$  = dip of base of slice

$W$  = weight of slice

$H$  = hydrostatic thrust from tension crack

$z$  = depth of tension crack (relative to  $O$ )

$R$  = length of moment arm.

شکل ۲-۱۷- تحلیل تعادل حدی برای شکست دایره‌ای (Hudson & Harrison, 1997)

یکی از مزایای روش‌های تعادل حدی، وجود طیف گسترده‌ای از نرم‌افزارهای توسعه‌یافته برای انواع شکست‌های

صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی است. همچنین این روش‌ها قابلیت انجام آنالیز حساسیت فاکتور ایمنی برای تغییر

در هندسه و ابعاد شیب و خصوصیات مواد را دارند. همین‌طور با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه می‌توان

شیب‌هایی متشکل از چند نوع سنگ با جنس‌های مختلف را مورد تحلیل قرار داد. با این حال، فاکتور ایمنی

که در روش‌های مربوط به تعادل حدی تنها پارامتر خروجی به حساب می‌آید، به هیچ وجه نشان‌دهنده

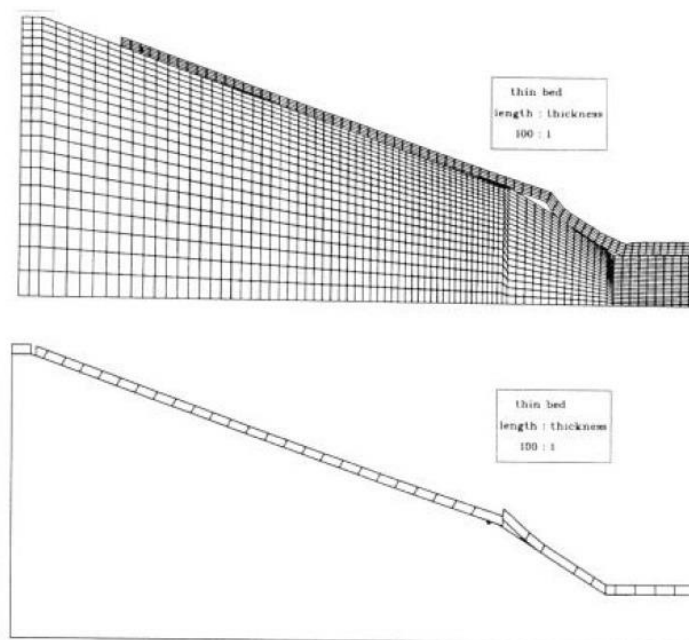
مکانیسم ناپایداری نیست. همچنین در تحلیل تعادل حدی دو پارامتر جابجایی‌ها و شکست در سنگ بکر هرگز

در نظر گرفته نمی‌شوند. ساده‌سازی‌های اعمال‌شده در تئوری این روش‌ها، اصلی‌ترین عامل چنین

محدودیت‌هایی است که باعث می‌شود تحلیل تعادل حدی در برخی موارد با مشکلات اساسی روبرو شود (Aryal, 2006; Eberhardt, 2003).

## ۲-۴-۴- روش‌های عددی

روش‌های سنتی در تحلیل پایداری شیب‌ها محدود به مسائل ساده بوده و تنها عواملی نظیر شیب و شرایط بارهای اولیه را در نظر می‌گیرند. از این رو، این روش‌ها قادر به ارائه مکانیسم شکست نبوده و فقط می‌توانند یک دید جزئی در این زمینه ایجاد نمایند. بسیاری از مسائل پایداری شیب‌های سنگی دارای پیچیدگی‌هایی مرتبط با ابعاد و هندسه، عدم یکنواختی جنس سنگ‌ها، رفتار غیرخطی، تنش‌های برجا و وجود فرآیندهای مرتبط نظیر فشارهای منفذی، بارهای لرزه‌ای و ... می‌باشند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، تکنیک‌های مدل‌سازی عددی ایجاد شده‌اند تا بتوانند برای مسائلی که روش‌های سنتی قادر به حل آنها نیستند، راه‌حلی تقریبی ارائه دهند. پیشرفت‌های حاصل شده در قدرت محاسباتی کامپیوترها، در دسترس بودن کدها و برنامه‌های مدل‌سازی عددی باعث گسترش این روش‌ها و استفاده روزافزون از آنها در مسائل مربوط به پایداری شیب گردیده است (Eberhardt, 2003).



شکل ۲-۱۸- روش‌های مدلسازی عددی پیوسته (بالا) و ناپیوسته (پایین) برای شکست کمانشی در امتداد یک شیب معدن روباز زغال‌سنگ (Stead & Eberhardt, 1997)

روش‌های عددی یادشده را می‌توان به سه رویکرد مختلف تقسیم نمود: مدلسازی پیوسته، مدلسازی ناپیوسته و مدلسازی هیبرید. مدلسازی پیوسته در تحلیل شیب‌هایی متشکل از سنگ‌های بکر، توده‌ای، ضعیف، خاک‌مانند و یا توده‌سنگ‌های به شدت درزه خورده بهترین ابزار به شمار می‌رود. اما مدلسازی ناپیوسته برای شیب‌هایی مناسب است که توسط رفتار ناپیوستگی کنترل می‌شوند (Eberhardt, 2003). شکل ۲-۱۸ کاربرد این دو نوع مدلسازی را در یک مسئله پایداری شیب سنگی واحد (یک شکست کمانشی پیچیده در امتداد یک شیب معدن روباز زغال‌سنگ) نشان می‌دهد. مدلسازی هیبرید نیز در واقع ترکیبی از دو نوع مدلسازی پیوسته و ناپیوسته است که با هدف حداکثر کردن مزایای برجسته آنها ارائه شده است.

در جدول ۱-۲ خلاصه‌ای از مزایا و محدودیت‌های ذاتی روش‌های مختلف مدل‌سازی عددی در تحلیل پایداری

شیب‌ها آورده شده است.

جدول ۱-۲- روش‌های مدل‌سازی عددی در تحلیل پایداری شیب‌ها (Coggan *et al.*, 1998)

| روش مدل‌سازی      | پارامترهای اساسی                                                                                                                       | مزایا                                                                                                                                                                                                                                         | محدودیت‌ها                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| مدل‌سازی پیوسته   | ابعاد و هندسه شیب؛ معیارهای ساختاری (نظیر الاستیسیته، پلاستیسیته، خزش و ...); مشخصات آب زیرزمینی؛ مقاومت برشی مواد؛ وضعیت‌های تنش برجا | اجازه تغییر شکل و شکست در مواد را می‌دهد؛ توانایی مدل‌سازی رفتار و مکانیسم‌های پیچیده؛ توانایی مدل‌سازی فشار منفذی، تغییر شکل خزشی و بارگذاری دینامیکی؛ توانایی ارزیابی اثرات تغییر در پارامترها                                              | نیاز به کاربر ماهر، آموزش‌دیده و باتجربه؛ نیاز به آگاهی از محدودیت‌های مدل و نرم‌افزار (مانند اثرات مرزی، خطاهای مش‌بندی، حافظه سخت‌افزاری و محدودیت‌های زمانی)؛ پارامترهای ورودی نیاز به اندازه‌گیری‌های زیاد دارند؛ عدم توانایی در مدل کردن سنگ‌های به شدت درزه‌دار؛ مشکل بودن انجام آنالیز حساسیت به دلیل زمان‌بر بودن |
| مدل‌سازی ناپیوسته | ابعاد و هندسه شیب و ناپیوستگی؛ معیارهای ساختاری سنگ بکر؛ سختی و مقاومت برشی ناپیوستگی؛ مشخصات آب زیرزمینی؛ وضعیت‌های تنش برجا          | اجازه تغییر شکل و حرکت بلوک‌ها نسبت به یکدیگر را می‌دهد؛ توانایی مدل‌سازی رفتار و مکانیسم‌های پیچیده (رفتار ترکیب مواد و ناپیوستگی‌ها توأم با تحلیل هیدرومکانیکی و دینامیکی)؛ توانایی ارزیابی اثرات تغییر در پارامترها بر روی وضعیت ناپایداری | نیاز به کاربر ماهر و محدودیت‌های کلی همانند موارد مدل‌سازی پیوسته؛ نیاز به اطلاع از اثر مقیاس؛ نیاز به شبیه‌سازی هندسه ناپیوستگی (فاصله‌داری، امتداد و ...); محدودیت اطلاعات در دسترس در مورد خصوصیات درزه‌ها (مانند سختی برشی و سختی نرمال)                                                                              |
| مدل‌سازی هیبرید   | ترکیبی از پارامترهای ورودی در مدل‌سازی‌های بالا                                                                                        | مدل‌های توأم المان محدود/مجزا قادرند گسترش شکست در سنگ بکر و تغییر شکل سنگ درزه‌دار را همزمان شبیه‌سازی نمایند.                                                                                                                               | مسائل پیچیده نیاز به میزان حافظه بالا دارند؛ تجربه کم استفاده عملی؛ مدل‌ها نیاز به شرایط و کالیبراسیون خاص دارند.                                                                                                                                                                                                         |

۲-۴-۵- روش‌های احتمالاتی

روش‌های تحلیل احتمالاتی برای تحلیل مسائل دارای عدم قطعیت استفاده می‌شوند. اساس این روش‌ها در تعیین پایداری این سیستم‌ها، شناخت و تشخیص آن دسته از فاکتورهایی است که در پایداری سیستم نقش دارند. همگی این پارامترها مقداری تغییرات طبیعی از خود نشان داده و صددرصد ثابت نیستند که به طور ایده‌آل این تغییرات (انحرافات) بایستی در روش طراحی در نظر گرفته شوند (Chowdhury, 1978).

در تحلیل یک شیروانی سنگی بر مبنای روش احتمالاتی، تغییرات و انحرافات طبیعی (واقعی) پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و احتمال شکست برآورد می‌شود. در واقع در این روش، احتمال شکست به جای فاکتور ایمنی به دست خواهد آمد که نسبت به بیان پایداری یک سیستم مانند پایداری شیب با استفاده از فاکتور ایمنی قطعی به واقعیت نزدیکتر است. در تحلیل‌های احتمالاتی از روش‌هایی مشابه که در طراحی قطعی (تحلیل قطعی) استفاده می‌شود، کمک گرفته شده است. همچنین مکانیسم‌های شکست و مدلی که چگونگی این شکست را توضیح دهد، باید شناخته شده باشند. بنابراین مرحله اول تحلیل‌های احتمالاتی در شیب‌های سنگی بر مبنای مدل‌های شکست به کار گرفته شده در روش‌های تعادل حدی است، با این تفاوت که در روش‌های احتمالاتی توزیع‌های آماری پارامترهای ورودی در نظر گرفته خواهد شد. در مرحله بعد بر اساس روابط موجود میان توزیع‌های آماری پارامترهای ورودی و میزان احتمال شکست، این احتمال محاسبه خواهد شد (Wyllie & Mah, 2004).

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که محاسبه دقیق احتمال شکست تنها برای موارد ساده (سیستم‌های ساده) امکان‌پذیر است. پیشرفت و کاربرد روشهای احتمالاتی در کارهای ژئوتکنیکی، به اندازه کارهای سازه‌ای عمرانی که در آن از مواد و مصالح استاندارد با خواص معین استفاده می‌شود، نیست. یکی از

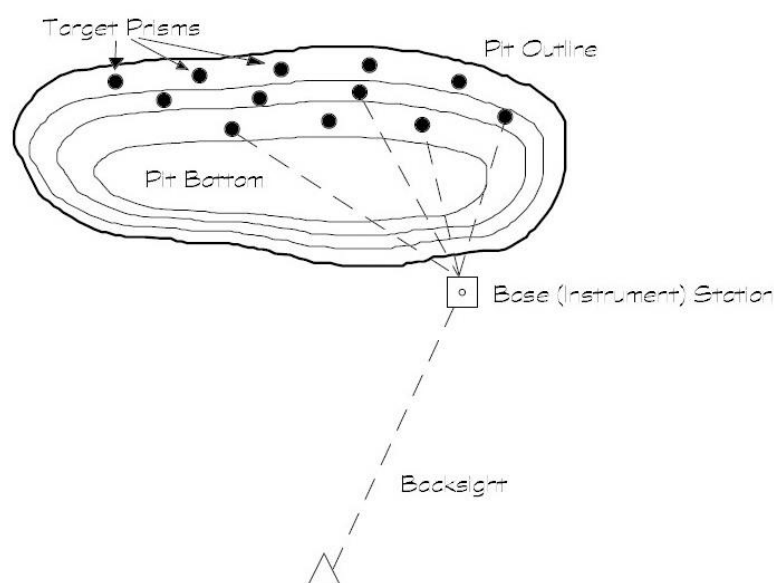
دلایل آن را می‌توان مشکلات مربوط به بیان کمی و عددی یک توده‌سنگ و همچنین تعیین یک مدل معرف جهت تحلیل میزان نیروی مقاوم و بار اعمالی روی هر المان از توده‌سنگ دانست (Young, 1993). همان طور که گفته شد، روش‌های احتمالاتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ذاتی در خواص مکانیک سنگی قادرند ریسک وقوع ریزش یا شکست را برای شیب‌های سنگی بسیار بهتر از یک فاکتور ایمنی واحد تحلیل نمایند. با این حال، این روش‌ها به داده‌ها و اطلاعات ورودی بسیار زیادی به منظور استفاده در توزیع‌های احتمال پارامترها نیازمندند. از طرفی، اصول روش‌های احتمالاتی بر اساس مدل‌های شکست قطعی (و بخصوص روش تعادل حدی) بوده و بدین ترتیب از محدودیت‌ها و کاستی‌های اشاره شده برای این روش‌ها نیز برخوردارند (El-Ramly, 2002).

## ۲-۴-۶- روش‌های مونیتورینگ

با وجود استفاده از روش‌های دقیق تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و وجود حساسیت خاص در این زمینه، به دلیل عدم توانایی برای در نظر گرفتن تمامی پارامترها و رفتارها، همواره شکست‌ها و ریزش‌های غیر قابل انتظار در این پروژه‌ها وجود داشته است. جهت فائق آمدن بر این موارد غیر قابل پیش‌بینی، روش‌های مونیتورینگ و ابزاربندی در پروژه‌های مربوط به شیب‌های سنگی به وجود آمده‌اند تا از این طریق بتوان تغییرات بسیار جزئی در وضعیت شیب‌ها را مورد اندازه‌گیری و سنجش قرار داد (Call, 1982). در این زمینه، ساده‌ترین روش استفاده از وسایل ابزار دقیق و نصب حسگرها و جابجایی‌سنج‌ها در نقاط مختلف شیب با یک



شبکه و چیدمان حساب شده است (شکل ۲-۱۹). علاوه بر این، تکنولوژی‌های استفاده از دوربین و منشور، دوربین‌های لیزری و رادارهای پایداری شیب ( $SSR^{28}$ ) هم اکنون در معادن روباز و سایر پروژه‌های مهم کاربرد روزافزونی یافته‌اند (Little, 2007). شکل ۲-۲۰ نمونه‌ای از نصب این تجهیزات را در یک معدن روباز نشان می‌دهد. این تجهیزات جهت مونیتور کردن سطح شیب‌ها و دیواره آنها به کار رفته و برای اطلاع از وضعیت سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای مونیتور کردن زیر سطح شیب‌ها از جابجایی سنج‌های گمانه استفاده می‌شود (Call, 1982; Call & Savely, 1990).



شکل ۲-۱۹- شبکه سیستم مونیتورینگ برای یک معدن روباز (Call, 1982)

<sup>28</sup> Slope Stability Radar



شکل ۲-۲۰- نمونه‌ای از جانمایی نصب تجهیزات SSR در معدن روباز Sandsloot آفریقای جنوبی (Little, 2007)

این روش آگاهی از پایداری شیب‌های سنگی امروزه جزء بهترین و موثرترین روش‌ها بخصوص در معادن روباز (به دلیل مجتمع بودن شیب‌ها و امکان نصب تجهیزات و انجام مونیتر) به شمار می‌رود. با این حال، هزینه بالای خرید و نصب تجهیزات مربوط به این روش و همین‌طور نیاز به نگهداری دقیق و پرسنل ماهر از جمله معایب اساسی هر سیستم ابزار دقیق به شمار می‌رود (Call *et al.*, 1993; Sjoberg, 1999). از طرفی داده‌های خروجی سیستم‌های مونیترینگ اعم از میزان جابجایی‌ها و یا فشار آب زیرزمینی نیاز به تفسیرها و تحلیل‌هایی دارد تا مورد استفاده قرار گیرد. همین‌طور می‌توان گفت که نگاشت جابجایی‌ها در نقاط مختلف پروژه برای انجام تحلیل‌های کامل و طراحی‌های بعدی به هیچ وجه کامل نمی‌باشد (Martin & Mehr, 1993; Sjoberg, 1999).

## ۳-۱- مقدمه

با پیچیده‌تر شدن مسائل مهندسی سنگ در کاربردهای گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع درمی‌یابیم که روش‌های مرسوم عددی و تحلیلی هرگز قادر به در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذار بر یک مسئله خاص نبوده و همواره از بسیاری ساده‌سازی‌ها در آنها استفاده شده و در نتیجه با محدودیت‌های بیشماری در مواجهه با مسائل مختلف روبرو هستند. هنگام طراحی یک ساختار در یک توده‌سنگ، لازم است که علاوه بر در نظر گرفتن تک تک فاکتورهایی نظیر سنگ بکر، شکستگی‌ها، تنش در سنگ، نفوذپذیری، حفریات و نگهداری‌ها، نحوه تأثیر متقابل این عوامل بر روی هم نیز در نظر گرفته شود. به عنوان ابزاری برای برقراری ارتباط میان اصول مکانیک سنگی و کاربردهای مهندسی سنگ، بایستی قادر باشیم چنین اثرات متقابلی را مورد ارزیابی قرار دهیم. بنابراین برای مدلسازی مکانیک سنگی و طراحی مهندسی سنگ در یک پروژه بخصوص، نیاز است که متغیرهای فیزیکی مرتبط و نیز مکانیسم‌های ارتباط‌دهنده میان آنها شناسایی شوند. همچنین باید این اطمینان حاصل شود که تمامی فاکتورهای تأثیرگذار و اثرات متقابل مابین آنها در نظر گرفته شده باشد.

به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام تأثیرات متقابل، می‌توان آنها را در یک ماتریس لیست نمود. این کار به عنوان ابزاری پایه‌ای به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار

می‌گیرد (Hudson, 1992). پارامترهای اصلی مرتبط با مسئله مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس لیست شده و اثرات متقابل هر جفت از پارامترها در سایر درایه‌ها شکل می‌گیرند. مراحل مانند کدگذاری اثرات متقابل و عملیات جبری برای سطرها و ستون‌ها اعمال شده و با خروج نمودارهایی روش ادامه می‌یابد.

هدف از ارائه این فصل از گزارش، تشریح اصول کلی سیستم‌ها و بخصوص رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ می‌باشد که لازمه آن اشاره به اجرای تشکیل‌دهنده آن از قبیل ماتریس اثر متقابل، نحوه کدگذاری آن، نمودار علت-اثر و نحوه تفسیر این نمودارها است. البته ذکر این نکته ضروری است که یک کاربرد واقعی از RES در یک پروژه نیازمند اطلاعات دیگری از جمله نحوه تعریف اندیس‌ها، تشکیل منوهای رده‌بندی پارامترها و ... است که در موقعیت‌های بعدی به آنها اشاره خواهد شد. بنابراین در ادامه این فصل پس از اشاره‌ای به مفهوم کلی سیستم‌ها، به تشریح نحوه تشکیل ماتریس‌های اثر متقابل، روش‌های کدگذاری، نمودارهای علت-اثر خروجی و تفسیر آنها پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی

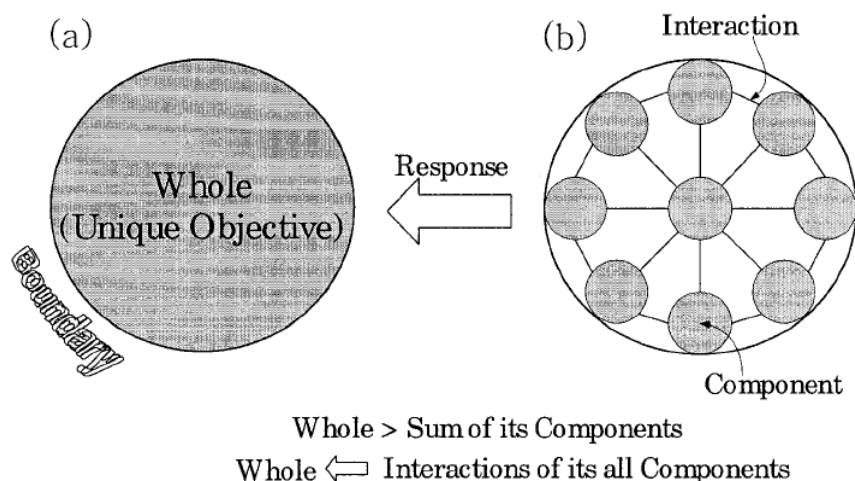
آلن‌بی<sup>۲۹</sup> سیستم را به صورت گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اثر متقابل بر روی همدیگر تعریف می‌کند که این اثرات باعث تغییر در انرژی، ماده و یا اطلاعات می‌شوند. طبق نظر وی، همیشه کل یک سیستم از جمع تک تک اعضای آن بزرگتر است (Allenby, 1999). این تفکر به نام تفکر سیستمی شناخته

---

<sup>29</sup> Allenby

می‌شود و روش‌هایی که به نوعی از این تفکر استفاده می‌کنند، روش‌های سیستمی نام دارند. طبق نظر جیائو<sup>۳۰</sup>، استفاده از رویکرد سیستمی زمانی بسیار ضروری است که با مسائلی روبرو هستیم که از پیچیدگی زیادی برخوردارند، آنچنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آنها نمی‌باشند (Jiao, 1995).

بنا به تئوری سیستم‌ها که همزمان توسط برتالانفی<sup>۳۱</sup> و راپوپورت<sup>۳۲</sup> ارائه شده است، یک سیستم به عنوان یک کل هدفی یکتا در محدوده یک مرز مشخص دارا است (شکل ۱-۳ (a)). بدین ترتیب می‌توان سیستم را متشکل از اجزای موثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد (شکل ۱-۳ (b)). بنابراین، کل را می‌توان به صورت پاسخ سیستم ناشی از اثرات متقابل تمام اجزا (و نه با جمع ساده آن اجزا) تعریف نمود (Bertalanffy, 1968; Rapoport, 1968).



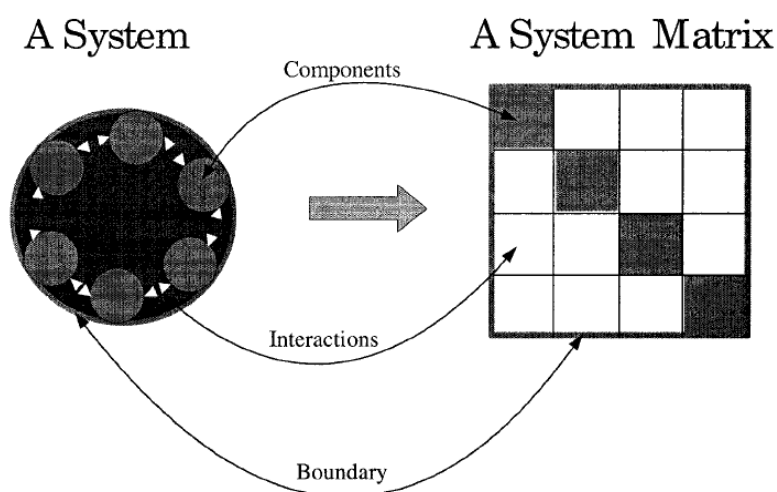
شکل ۱-۳- مفهوم تفکر سیستمی (Rapoport, 1968)

<sup>30</sup> Jiao

<sup>31</sup> Bertalanffy

<sup>32</sup> Rapoport

سیستم‌ها در کاربردهای مختلف معمولاً به صورت ماتریس‌هایی با نام ماتریس آن سیستم نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزا، اثرات متقابل و مرز مشخص را دارا هستند (Hill & Warfield, 1972). این مفهوم در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲- مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (Hill & Warfield, 1972)

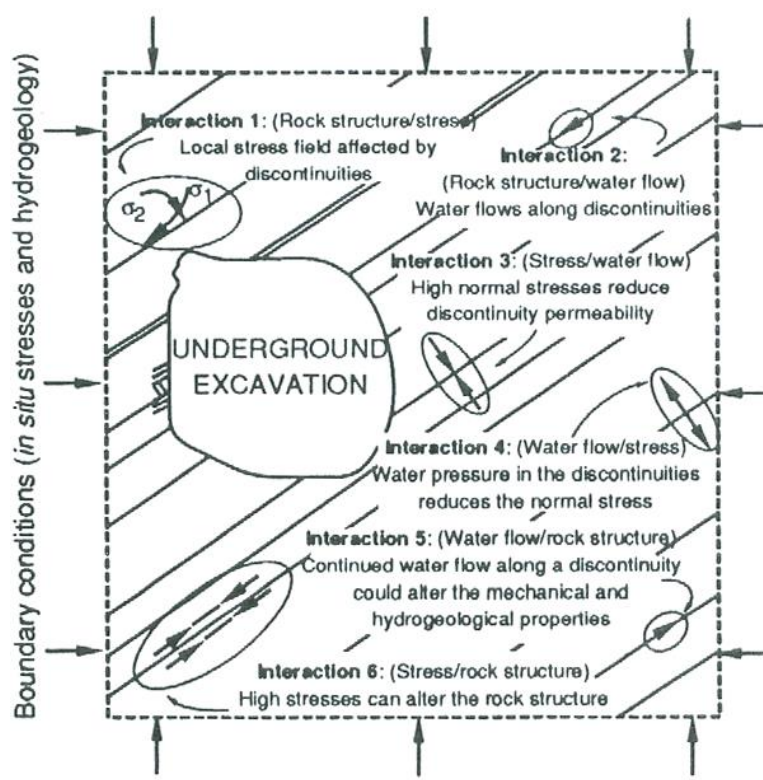
### ۳-۳- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

#### ۳-۳-۱- ماتریس‌های اثر متقابل

به عنوان مثالی از اثرات متقابل در یک توده‌سنگ درزه‌دار، شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در این شکل سه موضوع و فاکتور اساسی در نظر گرفته شده‌اند: ساختار سنگ، تنش در سنگ و جریان آب. به این

ترتیب شش ترکیب دوتایی از این سه پارامتر حاصل می‌شود که به نام اثرات متقابل شناخته می‌شوند (Hudson

& Harrison, 1997; Hudson, 1992).



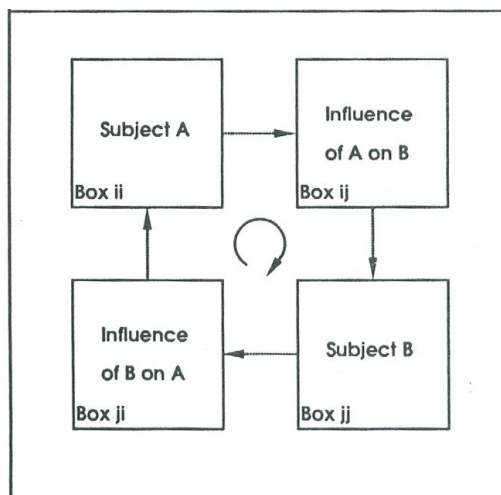
شکل ۳-۳- شش اثر متقابل دوتایی میان ساختار سنگ، تنش‌ها در سنگ و جریان آب در اطراف یک فضای زیرزمینی (after Hudson & Harrison, 1997)

در اثر متقابل اول، ساختار سنگ (ناپیوستگی‌ها)، تنش محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، زیرا اندازه و جهت تنش‌های اصلی دگرگون می‌شود. در اثر متقابل ۲، چگونگی اثر ساختار سنگ بر جریان آب در نظر گرفته می‌شود. نفوذپذیری اولیه تابعی از سنگ بکر و نفوذپذیری ثانویه تابعی از شکستگی‌ها می‌باشد. در ساختارهای مهندسی و موارد کاربردی، نفوذپذیری ثانویه معمولاً از اهمیت بالاتری برخوردار است، بنابراین این ناپیوستگی‌ها هستند که میزان نفوذپذیری و در نتیجه جریان آب در توده سنگ و در حفاریات را تعیین می‌کنند.

در اثر متقابل شماره ۳، چگونگی تأثیر تنش‌ها بر جریان آب در نظر گرفته می‌شود. به دلیل اینکه آب از ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها جریان پیدا می‌کند، هرگونه بسته‌شدگی القا شده در اثر تنش، به احتمال زیاد تأثیر مهمی بر روی جریان آب دارد. در اثر متقابل ۴، تأثیر جریان آب بر روی تنش‌ها نشان داده می‌شود. فشار آب در ناپیوستگی‌ها، تنش نرمال (قائم) را کاهش می‌دهد. چنین تأثیری کاملاً شناخته شده بوده و مفهوم تنش‌های موثر می‌تواند به تحلیل این اثر متقابل کمک نماید. در اثر متقابل ۵، چگونگی تأثیر جریان آب بر ساختار سنگ در نظر گرفته می‌شود. جریان آب پیوسته در امتداد یک ناپیوستگی می‌تواند تا حد زیادی خصوصیات مکانیکی و هیدروژئولوژیکی توده‌سنگ را دگرگون کند. در نهایت در اثر متقابل ۶، تأثیر تنش‌ها بر ساختار سنگ مورد انتظار است. وجود ناپیوستگی‌های زیاد نشان دهنده تغییر در تنش و کرنش توده‌سنگ در دوره‌های زمانی می‌باشد (Hudson, 1992).

با توجه به مطالب ذکر شده واضح است که نیاز به برخی ابزار و روش‌ها احساس می‌شود تا به خوبی بتواند این اثرات متقابل را در نظر گرفته و نشان دهد. روش مرسوم در ارائه و نشان دادن اثرات متقابل در سیستم‌ها استفاده از ماتریس‌های اثر متقابل می‌باشد (شکل ۳-۴). پارامترهای اصلی مورد نظر در طول قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند. همان گونه که در شکل ۴-۳ دیده می‌شود، پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست ماتریس قرار گرفته است. درایه بالا سمت راست نشان دهنده تأثیر A روی B و درایه پایین سمت چپ نشان دهنده تأثیر B روی A می‌باشد. بدین ترتیب، در واقع اصول پایه‌ای ماتریس اثر متقابل لیست کردن پارامترهای اصلی در طول قطر اصلی و در نظر گرفتن اثرات متقابل در درایه‌های غیراصلی است (Hill & Warfield, 1972; Hudson, 1992).





شکل ۳-۴- مفهوم ماتریس اثر متقابل برای سیستمی با دو پارامتر A و B (Hudson, 1992)

بدین ترتیب، برای سیستمی نظیر آنچه در شکل ۳-۳ نشان داده شد، نیاز به ماتریسی  $3 \times 3$  است که دارای

سه درایه در قطر اصلی شامل ساختار سنگ، تنش‌ها و جریان آب و همچنین شش درایه غیراصلی می‌باشد.

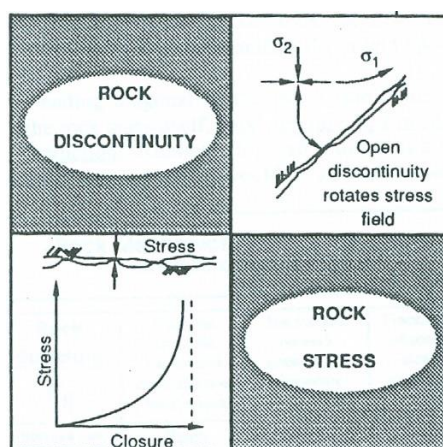
چنین ماتریسی در شکل ۳-۵ قابل مشاهده است.

|                                                            |                                                              |                                                                      |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Rock Structure</b>                                      | Fractures affect the values and orientations of the stresses | The fracture network governs the secondary permeability              |
| <b><math>F_{ij}</math></b>                                 |                                                              |                                                                      |
| Stresses can open or close fractures, and also create them | <b>Rock Stress</b>                                           | In general, the higher the normal stress, the lower the permeability |
|                                                            | <b><math>\sigma_{ij}</math></b>                              |                                                                      |
| Continual water flow in fractures affects their properties | Normal stresses reduced by water pressure                    | <b>Water Flow</b>                                                    |
|                                                            |                                                              | <b><math>K_{ij}</math></b>                                           |

شکل ۳-۵- ماتریس اثر متقابل  $3 \times 3$  برای پارامترهای مکانیک سنگی در نظر گرفته شده

(after Hudson, 1992)

روش‌های گوناگونی برای نشان دادن و ارائه اطلاعات در درایه‌های غیراصلی وجود دارد. این درایه‌های اثر متقابل می‌توانند شامل آنالیز مکانیسم‌های حاکم بر اثرات به وجود آمده باشند. همین طور می‌توان این مکانیسم‌ها را به صورت گرافیکی نمایش داد (شکل ۳-۶). راه دیگر برای این منظور، استفاده از یک ابزار کدگذاری درایه‌ها و اثرات متقابل بین پارامترها می‌باشد که از مباحث اصلی رساله پیشنهادی است (فصل ۵). قابل ذکر است هر یک از روش‌های یادشده از مزایای بخصوصی در شرایط مختلف برخوردارند.



شکل ۳-۶- نمایش گرافیکی اثرات متقابل میان پارامترهای یک ماتریس شامل ناپیوستگی‌ها و تنش‌ها در سنگ (Hudson, 1992)

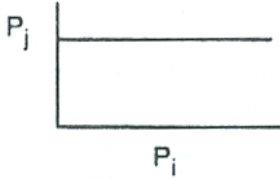
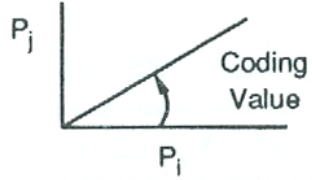
### ۳-۲- کدگذاری ماتریس‌های اثر متقابل

در بخش قبل، ماتریس‌های اثر متقابل به عنوان ابزاری قوی به منظور استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و نشان دادن مکانیسم‌های تأثیر عوامل اصلی بر یکدیگر معرفی شدند. در شکل‌های ۳-۵ و ۶ دیدیم که این مکانیسم‌ها می‌توانند به صورت تحلیلی یا گرافیکی به خوبی نمایش داده شوند. با این حال، بایستی چگونگی عددی‌سازی اهمیت پارامترها در نظر گرفته شود. برای این منظور نیاز به روشی برای کدگذاری ماتریس اثر متقابل است که از این طریق چگونگی تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر به سبب مکانیسم‌های موجود به صورت عددی بیان گردد.

طبق نظر هادسون، معرفی‌کننده رویکرد RES، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اثر متقابل وجود دارد (شکل ۳-۷) (Hudson, 1992). روش اول به روش دوتایی<sup>۳۳</sup> معروف است. در این شیوه کدگذاری، مکانیسم مابین هر دو پارامتر به صورت یکی از دو حالت روشن یا خاموش در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتی که روشن باشد، درایه مورد نظر مقدار واحد را قبول کرده و در صورتی که مکانیسم مورد نظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه مربوط به آن قرار می‌گیرد. در یک ماتریس  $12 \times 12$  مانند ماتریس مربوط به اطلس مکانیسم‌های مهندسی سنگ برای حفاریات زیرزمینی (Hudson, 1991)،  $132$  درایه غیراصولی وجود دارد که روش اول (دوتایی) می‌تواند در این گونه موارد برای شروع مناسب باشد. به عنوان مثال، اگر برای چنین ماتریسی پس از کدگذاری با روش دوتایی تنها  $9$  درایه با مقدار واحد به دست آید و  $123$  درایه به اصطلاح خاموش باقی بماند، درخواهیم یافت که سیستم از نظر تعامل و فعل و انفعالی بودن در حد پایینی قرار دارد. بالعکس، اگر تعداد درایه‌های روشن زیاد باشد، سیستم تا حد زیادی تعاملی به شمار می‌رود.

---

<sup>33</sup> Binary

| Matrix Coding Methods                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 Binary - Mechanisms are switched on or off: (1,0)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                      |
| 2 Expert Semi-Quantitative (ESQ):                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <b>Main coding method<br/>described and used<br/>in this book</b> </div> |
| 0 - No Interaction<br>1 - Weak Interaction<br>2 - Medium Interaction<br>3 - Strong Interaction<br>4 - 'Critical' Interaction                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                      |
| 3 According to the slope of the $P_i$ vs. $P_j$ relation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                      |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p><math>P_j</math></p> <p><math>P_i</math></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><math>P_j</math></p> <p><math>P_i</math></p> <p>Coding Value</p> </div> </div> |                                                                                                                                                      |
| 4 More numerically via solution to partial differential equations, e.g. solution to first order PDE is exponential or negative exponential                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                      |
| 5 Explicitly via complete numerical analysis of mechanism                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                      |

شکل ۳-۷- روش‌های مختلف کدگذاری ماتریس اثر متقابل در رویکرد RES (Hudson, 1992)

روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره ( $ESQ^{34}$ ) معروف است که در حقیقت نوع تعمیم‌یافته‌ای از روش دوتایی است که دارای پنج کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ می‌باشد. در این کلاس‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اثر متقابل، ۱ برای اثر متقابل ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود. این روش کدگذاری، از حساسیت بیشتری نسبت به روش قبلی (دوتایی) که به صورت بسیار ساده تنها روشن یا خاموش بودن درایه‌ها را تعیین می‌نمود، برخوردار است. ضعف اصلی روش مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص کلاس‌ها به درایه‌ها می‌باشد که آن را در تشریح کامل مکانیسم‌های

<sup>34</sup> Expert Semi-Quantitative

مربوطه ناتوان ساخته است. با این حال، به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف، و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیشترین کاربرد برخوردار است.

روش سوم از شیب نمودار  $P_i-P_j$  برای کدگذاری استفاده می‌کند (شکل ۳-۷). اگر نمودار  $P_i-P_j$  به صورت یک خط افقی باشد، در این صورت  $P_j$  به  $P_i$  وابسته نیست. ولی اگر رابطه‌ای خطی مابین آنها وجود داشته باشد، مکانیسم مربوطه می‌تواند توسط شیب خط کدگذاری شود که در حقیقت سرعت تغییرات  $P_j$  به عنوان تابعی از  $P_i$  را نشان می‌دهد. به منظور استفاده از این روش، بایستی نمودارهای  $P_i-P_j$  برای تمامی درایه‌های غیراصلی ماتریس مشخص شوند. بدون شک، عدم خطی بودن روابط میان پارامترها مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت. با این حال، اگرچه این روش تعمیمی علمی‌تر از دو روش پیشین به نظر می‌رسد، احتمال مواجهه با اطلاعات ناکافی در مورد بسیاری از کاربردها وجود خواهد داشت.

روش چهارم، تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم می‌باشد. در این روش، فرض بر این است که تمام مکانیسم‌ها در درایه‌های ماتریس اثر متقابل می‌توانند به صورت یک معادله مشتقات جزئی بیان شوند. به عنوان مثال، اگر فرض کنیم که تمام مکانیسم‌های موجود در ماتریس بتوانند توسط معادلات مشتقات جزئی مرتبه اول بیان شوند، در این صورت توابع نمایی و نمایی منفی قادر خواهند بود که روابط  $P_i-P_j$  را توصیف نمایند. این روش نیز از ضعفی مشترک با آنچه برای روش سوم بیان شد برخوردار است. علاوه بر این، با وجود اینکه اعمال معادلات مشتقات جزئی مرتبه دوم راه حلی واقعی‌تر به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ، عملی بسیار سخت و پیچیده به شمار آید.

روش پنجم، روش صریح<sup>۳۵</sup> نام دارد. در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل مکانیسم‌های ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی (numerical) آنها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اثرات متقابل را مورد سنجش قرار داد. چنین آگاهی و اطلاعاتی مسلماً هرگز به طور کامل برای یک ماتریس وجود نخواهد داشت، ولی در صورت استفاده از تمام اطلاعات موجود، می‌تواند با روش‌های دوم و چهارم تلفیق شده و مورد استفاده قرار گیرد.

روش ESQ در میان سایر روش‌ها با وجود ضعف‌های آشکار، از بیشترین کاربرد برخوردار بوده و به صورت اولیه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است. در مورد این کاربردها و سایر موارد مربوط به آنها در بخش‌ها و فصول بعد با تفصیل بیشتری بحث خواهد شد.

### ۳-۳-۳- نمودار علت-اثر<sup>۳۶</sup>

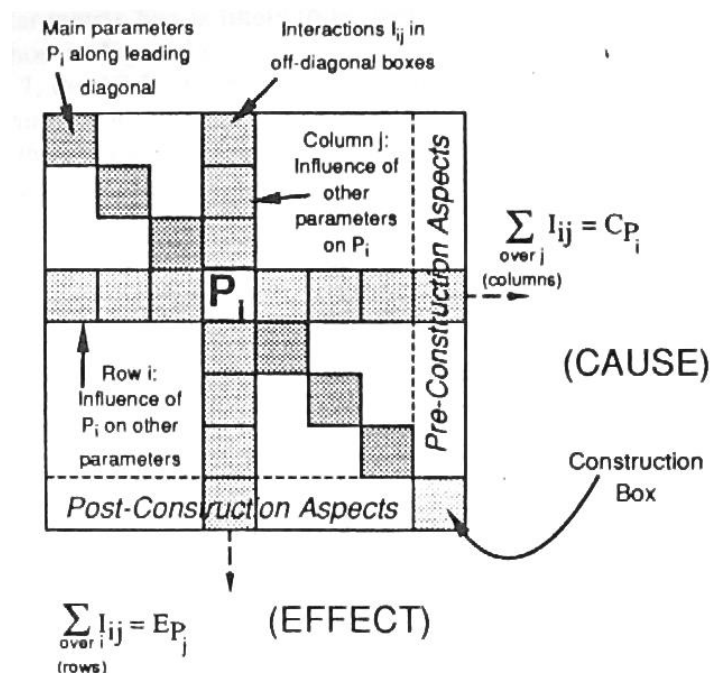
نحوه شکل‌گیری محورهای علت و اثر در دیاگرام شکل ۳-۸ قابل مشاهده است. پارامترهای اصلی ( $P_i$ ) در امتداد قطر اصلی ماتریس لیست شده‌اند. با توجه به نحوه ساخته شدن ماتریس واضح است که هر سطر عبوری از  $P_i$  نشان دهنده تأثیر آن بر تمام پارامترهای دیگر موجود در سیستم است. بالعکس، هر ستون عبوری از  $P_i$  نشان دهنده تأثیر پارامترهای دیگر بر سیستم بر روی آن می‌باشد. به محض اینکه ماتریس به صورت عددی کدگذاری شود، می‌توان جمع هر سطر و هر ستون آن را به دست آورد. مجموع مقادیر عددی هر سطر

<sup>35</sup> Explicit

<sup>36</sup> Cause-Effect Plot

نهایت سبب به وجود آمدن محورهای C و E می‌گردند. بنابراین، C ارائه‌گر نحوه تأثیرات  $P_i$  بر سیستم و E نشان

دهنده تأثیری است که سیستم بر  $P_i$  می‌گذارد.



شکل ۳-۸ نحوه شکل گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اثر متقابل (Hudson, 1992)

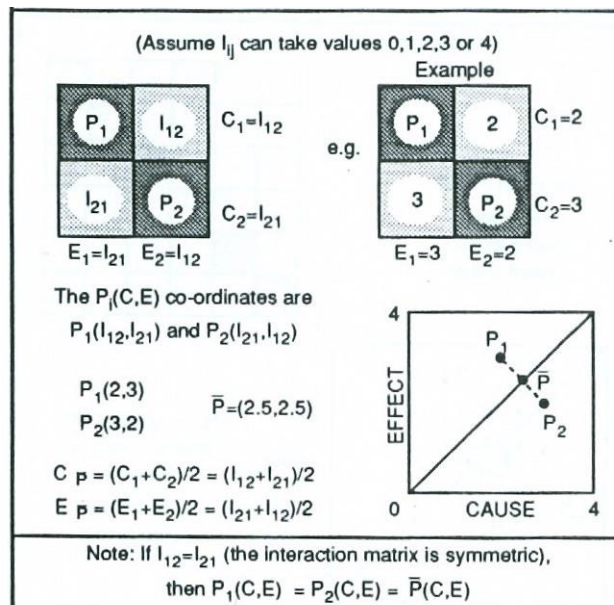
این مفهوم، ابتدا بر روی نمودار (C,E) دو پارامتر بحث می‌شود که در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. برای

چنین ماتریسی، با استفاده از روش کدگذاری ESQ، مجموع مقادیر برای سطرها یا ستون‌ها، عدد ۴ می‌باشد.

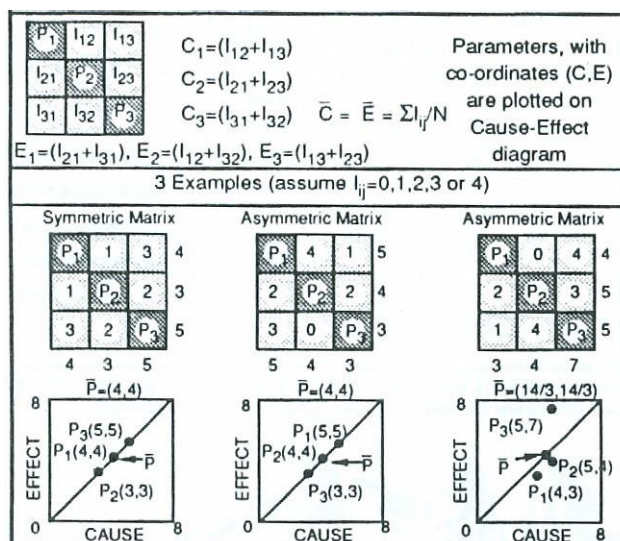
این ماتریس نحوه رسم نمودار یادشده را به صورت بسیار ساده نشان می‌دهد. در شکل ۳-۱۰ نمودار (C,E) به

سه پارامتر تعمیم داده شده است و همراه با مثال‌هایی از ماتریس‌های متقارن و غیرمتقارن ارائه شده است.

همچنین قرارگیری  $\bar{P}$  به عنوان میانگین  $P_i$  ها بر روی خط  $C=E$  قابل توجه است.



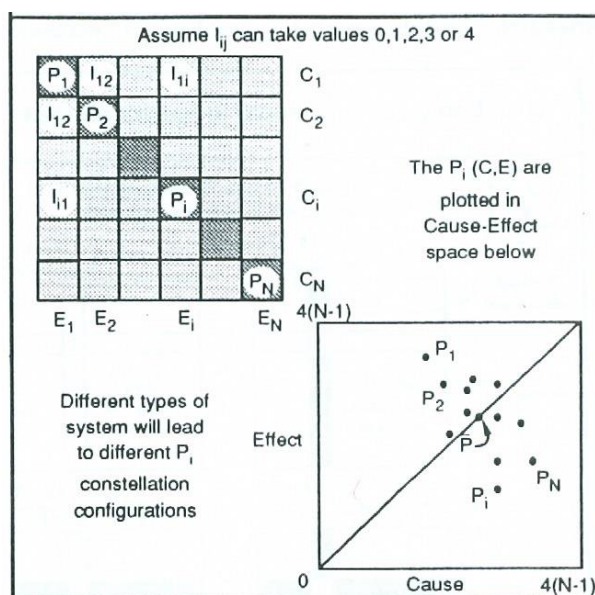
شکل ۳-۹- نمونه‌ای از یک ماتریس اثر متقابل  $2 \times 2$  کدگذاری شده و نمودار علت-اثر آن (Hudson, 1992)



شکل ۳-۱۰- نمودار (C,E) تعمیم داده شده برای سه پارامتر به همراه مثال‌هایی از ماتریس‌های متقارن و غیرمتقارن (Hudson, 1992)

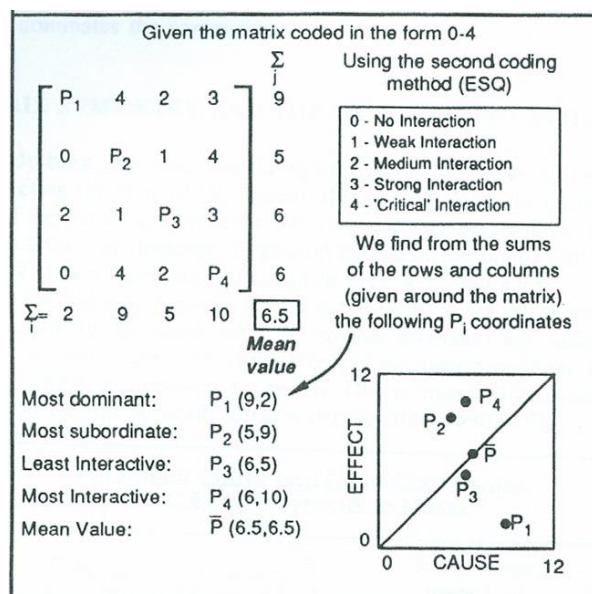


در شکل ۱۱-۳، نمودار (C,E) تعمیم داده شده به N پارامتر قابل مشاهده است. در این مورد کلی، پارامترها به صورت یک ابر در فضای C و E درآمده و از سیستمی پیچیده حکایت دارند. توجه به موقعیت این نقاط که در واقع نماینده پارامترهای اصلی سیستم هستند، در توسعه و سودمندی تئوری سیستمی ارائه شده در این بخش از اهمیت بسیاری برخوردار است.



شکل ۱۱-۳ - نمودار (C,E) تعمیم داده شده به N پارامتر (Hudson, 1992)

در شکل ۱۲-۳، تشکیل نمودار (C,E) به صورت صریح نشان داده شده است. برای مقادیر کدگذاری شده در این شکل، مجموع سطرها و ستون‌ها برای هر پارامتر محاسبه شده و در نمودار وارد شده است.

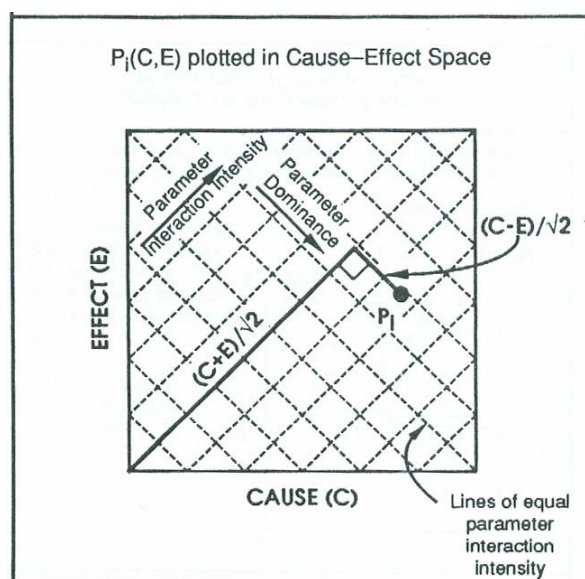


شکل ۳-۱۲- مثالی از یک نمودار علت- اثر برای یک ماتریس ۴×۴ (Hudson, 1992)

موقعیت نقاط در فضای علت- اثر نشان‌دهنده نوع اثر متقابل هر پارامتر است. فعل و انفعالی‌ترین پارامتر  $P_4$  می‌باشد، چرا که دارای بیشترین مقدار C+E است. کمترین فعل و انفعال نیز مربوط به پارامترهای  $P_1$  و  $P_3$  است که دارای کمترین مقادیر C+E هستند. غالب<sup>۳۷</sup>ترین (مسلط‌ترین) پارامتر  $P_1$  به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار C-E می‌باشد. این بدان معنی است که بیشتر از آنکه سیستم بر روی  $P_1$  تأثیرگذار باشد، این پارامتر سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تابع<sup>۳۸</sup>ترین (مغلوب‌ترین) پارامترها نیز  $P_4$  و  $P_2$  می‌باشند که دارای کمترین C-E هستند. چنین تفسیرهایی را می‌توان مستقیماً از نمودار (C,E) نیز انجام داد. شکل ۳-۱۳ مفهوم مربوط به دو خصوصیت شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر را نشان می‌دهد. در این شکل بیان‌کننده این موضوع است که شدت اثر متقابل یک پارامتر در امتداد خط C=E اندازه‌گیری شده و تسلط پارامتر نیز با فاصله عمودی نقطه مربوط به آن تا خط یادشده سنجیده می‌شود.

<sup>37</sup> Dominant

<sup>38</sup> Subordinate



شکل ۳-۱۳- مفهوم شدت اثر متقابل و تسلط پارامتر (Hudson, 1992)

دو مجموعه خطوط ۴۵ درجه در نمودار نشان‌دهنده کنتورهای مقادیر مساوی از هر یک از خصوصیات شدت اثر متقابل و میزان تسلط هستند. نکته مهمی که وجود دارد این است که با افزایش خصوصیت شدت اثر متقابل از صفر تا حداکثر، مقدار حداکثر ممکن برای تسلط پارامتر مربوطه از صفر تا ۵۰ درصد شدت اثر متقابل افزایش یافته و سپس در حداکثر مقدار شدت اثر متقابل، به صفر بازمی‌گردد. در نهایت، همان طور که در شکل نشان داده شده است، مقدار عددی مربوط به خصوصیات یادشده به ترتیب با  $(C + E)/\sqrt{2}$  و  $(C - E)/\sqrt{2}$  قابل محاسبه هستند.

تنها ذکر این نکته ضروری است که رویکرد RES بسته به کاربرد موردنظر و متصور از آن، دارای مراحل دیگری شامل تعریف اندیس با توجه به موضوع کار و تشکیل منوهای رده‌بندی پارامترها نیز می‌باشد که سعی خواهد شد در فصل پنجم همزمان با کاربرد در مورد آنها بحث گردد.

### ۳-۴- سابقه استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف

سیستم‌های مهندسی سنگ از زمان معرفی آن در سال ۱۹۹۲ تاکنون یکی از پرکاربردترین رویکردهای سیستمی در پروژه‌های مختلف بوده است. در مسائلی که تعداد پارامترهای دخیل و موثر بر سیستم زیاد باشد، این رویکرد قابلیت استفاده بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های مرسوم از خود نشان می‌دهد. در این بخش به کلیه کاربردها از ابتدا تا کنون به اختصار اشاره می‌شود.

رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ معرفی شد (Hudson, 1992; Hudson & Harrison, 1992). طی این معرفی، وی اصول اولیه رویکرد و نحوه استفاده از آن را بطور کامل ارائه داد و بدین ترتیب به عنوان نخستین مرتبه تحلیل‌های سیستمی وارد مهندسی سنگ و کاربردهای مشابه گردید. پس از آن، این رویکرد به دلیل مزایای بسیار، به سرعت تبدیل به یک ابزار دارای پتانسیل بالا برای حل مسائل پیچیده مهندسی سنگ شد. همچنین روش مذکور در مباحثی غیر از مهندسی سنگ نیز مطرح شده و کاربرد یافته است که در این بخش سعی شده است به تمامی آنها اشاره گردد.

در سال ۱۹۹۲، هادسون و همکاران با استفاده از روش ارائه شده، به ارزیابی پارامترهای موثر بر چند پروژه مهندسی سنگ، ریسک این پروژه‌ها را مورد تحلیل قرار دادند (Hudson et al., 1992). اسمیت<sup>۳۹</sup> در سال ۱۹۹۴ به ارزیابی زمین‌شناسی مهندسی برای کارهای معدنی کم‌عمق با استفاده از RES پرداخت (Smith, 1994). در ۱۹۹۵، جیائو با بکارگیری روش RES در برخی کاربردهای مهندسی، سعی در رسمی‌سازی استفاده از روش

---

<sup>39</sup> Smith

داشت (Jiao, 1995). مازوکولا<sup>۴۰</sup> و هادسون در ۱۹۹۶ برای اولین بار، روش مذکور را در کارهای تحلیل پایداری شیب‌های طبیعی وارد نمودند (Mazzoccola & Hudson, 1996). در این مطالعه، ناپایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آلپ مرکزی در ایتالیا مورد پیش‌بینی و ارزیابی قرار گرفت. اسکاگیوس<sup>۴۱</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۷ از RES برای سنجش میزان خطرات زیست‌محیطی ناشی از دفع زباله‌های هسته‌ای در سوئد استفاده نمودند (Skagius *et al.*, 1997). در این تحقیق، سیزده پارامتر به عنوان پارامترهای کلیدی موثر بر سیستم در نظر گرفته شده بود. ماتیوس<sup>۴۲</sup> و لوید<sup>۴۳</sup> (۱۹۹۸) نیز به عنوان یک مطالعه زیست‌محیطی، آلودگی‌های حوزه آبریز چند رودخانه را در ناحیه‌ای از انگلستان با رویکرد RES مورد بررسی قرار دادند (Matthews & Lloyd, 1998). کاستالدینی<sup>۴۴</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۸، اثرات ناشی از زلزله را بر پایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آپنینز<sup>۴۵</sup> ایتالیا با روش سیستمی و در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تحلیل نمودند (Castaldini *et al.*, 1998). ون‌دورپ<sup>۴۶</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹، ماتریس‌های اثر متقابل را در بخشی از تحلیل‌های به کار رفته به منظور مدلسازی آلودگی‌های ناشی از انباشت زباله‌های هسته‌ای در چند کشور اروپایی مورد استفاده قرار دادند (Van Dorp *et al.*, 1999). در همین سال، داویس<sup>۴۷</sup> و همکارانش طی مطالعه‌ای محدود، اقدام به بررسی مشکلات ناشی از ریزش مجاری فاضلاب در محیط‌های شهری با استفاده از ماتریس‌های اثر متقابل نمودند (Davies *et al.*, 1999). همچنین در این سال لاتام<sup>۴۸</sup> و لو<sup>۴۹</sup> از روش RES با کدگذاری اصلاح‌شده در

---

<sup>40</sup> Mazzoccola

<sup>41</sup> Skagius

<sup>42</sup> Matthews

<sup>43</sup> Lloyd

<sup>44</sup> Castaldini

<sup>45</sup> Apennins

<sup>46</sup> Van Dorp

<sup>47</sup> Davies

<sup>48</sup> Latham

<sup>49</sup> Lu

ارائه یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده‌سنگ‌ها بهره بردند (Latham & Lu, 1999). آخرین مطالعه در این سال مربوط به استفاده از ماتریس‌های اثر متقابل به منظور ارزیابی میزان مهاجرت برخی عناصر در اکوسیستم‌های جنگلی توسط آویلا<sup>۵۰</sup> و موبرگ<sup>۵۱</sup> می‌باشد (Avila & Moberg, 1999).

در سال ۲۰۰۰، شانگ<sup>۵۲</sup> و همکارانش از روش RES جهت انتخاب بهترین سایت برای ساخت نیروگاه زیرزمینی شیشان-لینگ<sup>۵۳</sup> در چین استفاده کردند (Shang *et al.*, 2000). آنها برای این منظور اندیسی به نام اندیس تناسب جامع را تعریف کردند که در نهایت بهترین مکان را با توجه به آن انتخاب نمودند. در سال ۲۰۰۱، لو و روزنباوم<sup>۵۴</sup> با تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) سعی در تعیین اهمیت فاکتورهای تأثیرگذار در سیستم متشکل از یک فونداسیون در زیر سطح زمین داشتند (Lu & Rosenbaum, 2001). علی<sup>۵۵</sup> و حسن<sup>۵۶</sup> در سال ۲۰۰۲ در کاری کاملاً مشابه با مطالعه مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)، با تعریف اندیس ناپایداری توده‌سنگ، اقدام به ارزیابی ناپایداری شیب‌های طبیعی منطقه بندربان<sup>۵۷</sup> در بنگلادش نمودند (Ali & Hasan, 2002). ژانگ<sup>۵۸</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۴ خطر سقوط سنگ از شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه چنگدو- لاسا<sup>۵۹</sup> به طول ۴۳۰ کیلومتر در چین را در ۱۹ ایستگاه به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ تحلیل نمودند (Zhang *et al.*, 2004). اندیس مورد استفاده

<sup>50</sup> Avila<sup>51</sup> Moberg<sup>52</sup> Shang<sup>53</sup> Shisan-Ling<sup>54</sup> Rosenbaum<sup>55</sup> Ali<sup>56</sup> Hasan<sup>57</sup> Bandarban<sup>58</sup> Zhang<sup>59</sup> Chengdu-Lhasa

آنها اندیس خطر سقوط سنگ نام داشت. در همین سال، بناردوس<sup>۶۰</sup> و کالیامپاکوس<sup>۶۱</sup> در ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی در حفر تمام مقطع تونل متروی آتن یونان از روش RES استفاده کرده و با تعریف اندیس آسیب‌پذیری یا حساسیت به ریزش در ایستگاه‌های مختلف حفاری تونل توانستند این خطرات را برآورد نمایند (Benardos & Kaliampakos, 2004). در سال ۲۰۰۵، شانگ و همکارانش با استفاده از ماتریس اثر متقابل تشکیل شده از فاکتورهای زمین‌شناسی به زون‌بندی زمین‌شناسی مهندسی ناحیه‌ای واقع در حاشیه بزرگراه سیچوان-تیبِت<sup>۶۲</sup> پرداختند (Shang *et al.*, 2005). آنها برای این منظور اقدام به تعریف و تشکیل اندیس زون‌بندی زمین‌شناسی نمودند. بندز<sup>۶۳</sup> و همکاران نیز در ۲۰۰۵ آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از به کار بردن ضایعات صنعتی در مصالح راه‌سازی را به کمک ماتریس‌های اثر متقابل مورد مطالعه قرار دادند (Bendz *et al.*, 2005). همین سال، صادقی و رسولی به عنوان کاربردی از سیستم‌های مهندسی سنگ در تحلیل پایداری شیروانی‌ها، اقدام به تشکیل یک ماتریس اثر متقابل با ۹ پارامتر برای یک شیروانی تنها نمودند (صادقی و رسولی، ۱۳۸۴). در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷، ماورولیدو<sup>۶۴</sup> و همکارانش طی مطالعه‌ای جامع، اقدام به نگاشت آلودگی ناشی از ترافیک هوای شهر گیلفورد<sup>۶۵</sup> انگلستان نمودند (Mavroulidou *et al.*, 2004; Mavroulidou *et al.*, 2005; Mavroulidou *et al.*, 2007). آنها برای این کار علاوه بر استفاده از RES و تشکیل ماتریس اثر متقابل با فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت هوای شهر، از GIS نیز برای نگاشت نهایی استفاده کردند

---

<sup>60</sup> Benardos

<sup>61</sup> Kaliampakos

<sup>62</sup> Sichuan-Tibet

<sup>63</sup> Bendz

<sup>64</sup> Mavroulidou

<sup>65</sup> Guildford

و در نهایت نتایج خود را با نتایج بدست آمده از روش‌های عددی مقایسه نمودند. اندریوکس<sup>۶۶</sup> و حاجیجورجیو<sup>۶۷</sup> در سال ۲۰۰۸ روشی را برای تعیین قابلیت تنش‌زدایی انفجار در پایه‌های معادن زیرزمینی ارائه دادند (Anderiux & Hadjigeorgiou, 2008). آنها با استفاده از روش RES و تعیین اندیسی به منظور رسیدن به هدف یاد شده، توانستند تصحیحاتی در روش مرسوم طراحی پایه‌های بزرگ مقیاس ارائه نمایند. دی پیپو<sup>۶۸</sup> و همکارانش در همین سال برای ارزیابی خطرات مختلف در نواحی ساحلی جنوب ایتالیا و شهر ناپلس از رویکرد سیستمی RES استفاده نمودند (De Pippo *et al.*, 2008). بودتا<sup>۶۹</sup> و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۸ با استفاده از یک الگوریتم بر مبنای GIS و RES، نگاشت خطرات وقوع زمین‌لغزش را برای ناحیه کیلنتو<sup>۷۰</sup> ایتالیا انجام دادند (Budetta *et al.*, 2008). همچنین، پوریان<sup>۷۱</sup> و پوریان با استفاده از ماتریس‌های اثر متقابل به مطالعه و زون‌بندی حساسیت ریزش شیب‌های طبیعی ناحیه دوگانکنت<sup>۷۲</sup> در کشور ترکیه پرداختند (Ceryan & Ceryan, 2008). به عنوان آخرین مطالعه در این زمینه مربوط به سال ۲۰۰۸، روزوس<sup>۷۳</sup> و همکارانش نیز کاری مشابه را برای شیب‌های طبیعی استان کاردیتسا<sup>۷۴</sup> در یونان انجام دادند (Rozos *et al.*, 2008). در نهایت در سال ۲۰۰۹، شین<sup>۷۵</sup> و همکارانش با استفاده از رویکرد RES و تعریف اندیس خطر ریزش تونل، روشی برای ارزیابی کمی خطرات پایداری تونل‌ها در کره جنوبی ارائه دادند (Shin *et al.*, 2009).

---

<sup>66</sup> Anderiux  
<sup>67</sup> Hadjigeorgiou  
<sup>68</sup> De Pippo  
<sup>69</sup> Budetta  
<sup>70</sup> Cilento  
<sup>71</sup> Ceryan  
<sup>72</sup> Dogankent  
<sup>73</sup> Rozos  
<sup>74</sup> Karditsa  
<sup>75</sup> Shin



### ۳-۳-۵- سابقه استفاده از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌ها

در این بخش به بررسی دقیق‌تر سابقه موضوع از جنبه استفاده از روش سیستمی RES در تحلیل پایداری شیب‌ها پرداخته می‌شود.

### ۳-۳-۵-۱- مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶)

مازوکولا و هادسون در سال ۱۹۹۶ برای اولین بار از رویکرد RES به منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی استفاده کردند (Mazzoccola & Hudson, 1996). این مطالعه که بر روی شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آلپ مرکزی در ایتالیا انجام شده است، از جمله مهمترین تحقیقات در این زمینه می‌باشد. هدف اصلی از انجام این تحقیق، ارائه یک روش طبقه‌بندی شیب‌های سنگی نشان‌دهنده پتانسیل ناپایداری بزرگ مقیاس برای منطقه و سپس استفاده از آن جهت رتبه‌بندی شیب‌های سنگی موجود در آنجا بوده است. عوامل موثر بر سیستم در این مطالعه به پنج گروه اصلی تقسیم‌بندی شده که در کل دربرگیرنده ۲۰ پارامتر می‌باشد:

الف- شرایط محیطی حاکم بر منطقه: ۱- زمین‌شناسی؛ ۲- چین خوردگی‌ها؛ ۳- گسل‌ها؛ ۴- میزان بارش؛ ۵-

چرخه‌های یخ‌زدگی و آب‌شدگی؛ ۶- ناپایداری‌های قبلی؛ ۷- مقاومت سنگ بکر؛ ۸- هوازدگی؛

ب- ناپیوستگی‌ها: ۹- تعداد دسته‌درزه‌ها؛ ۱۰- جهت‌یافتگی؛ ۱۱- بازشدگی؛ ۱۲- امتداد؛ ۱۳- فاصله‌داری؛

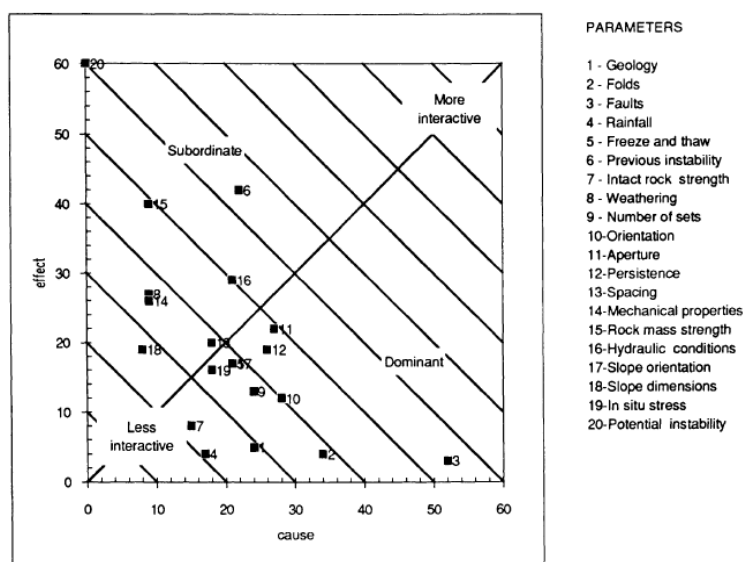
۱۴- خصوصیات مکانیکی؛

ج- توده سنگ: ۱۵- مقاومت توده سنگ؛ ۱۶- شرایط هیدرولیکی؛

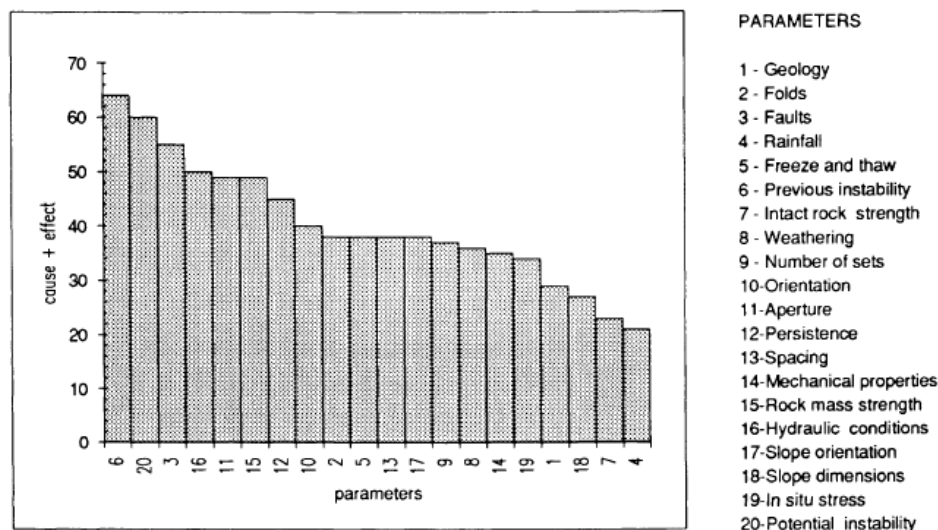
د- شیب‌ها: ۱۷- جهت شیب‌ها؛ ۱۸- ابعاد شیب‌ها؛

ه- سایر: ۱۹- تنش برجا؛ ۲۰- ناپایداری بالقوه.

آنها از روش ESQ جهت کدگذاری ماتریس‌های اثر متقابل  $20 \times 20$  ساخته شده استفاده کردند. نمودار علت-اثر خروجی در شکل ۳-۱۴ آورده شده است. رتبه‌بندی اهمیت پارامترها نیز در شکل ۳-۱۵ قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۴- نمودار علت-اثر خروجی برای ۲۰ پارامتر سیستم (Mazzoccola & Hudson, 1996)



شکل ۳-۱۵- رتبه‌بندی اهمیت پارامترها برای ۲۰ پارامتر سیستم (Mazzoccola & Hudson, 1996)

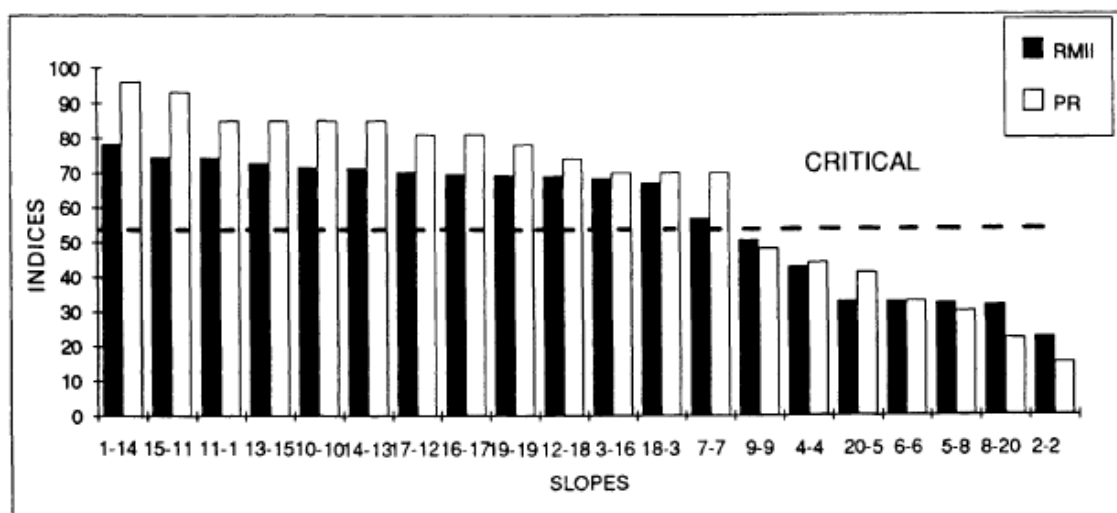
در این مطالعه، پس از تعریف اندیس ناپایداری توده‌سنگ ( $RMII^{76}$ ) و ساخت منوهای رده‌بندی پارامترها با اعداد ۰، ۱ و ۲ به ترتیب برای مشارکت کم<sup>۷۷</sup>، دخیل<sup>۷۸</sup> و مشارکت زیاد<sup>۷۹</sup>، شیب‌های سنگی موجود در منطقه (۲۰ شیب) را از نظر میزان استعداد ناپایداری کلاس‌بندی نمودند. این کلاس‌بندی در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است.

<sup>76</sup> Rock Mass Instability Index

<sup>77</sup> Low contribution

<sup>78</sup> Contributory

<sup>79</sup> Strong contribution



شکل ۳-۱۶- هیستوگرام اندیس ناپایداری توده‌سنگ برای شیب‌های منطقه مورد مطالعه  
(Mazzoccola & Hudson, 1996)

کار انجام شده توسط مازوکولا و هادسون با توجه به اینکه اولین تحقیق مستقل در زمینه استفاده عملی از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی بوده است، از ارزش بالایی برخوردار است. در این تحقیق، شرایط محیطی منطقه مورد مطالعه به خوبی بررسی شده است تا انتخاب پارامترهای موثر بر سیستم با دقت بالایی انجام گیرد.

### ۳-۳-۵-۲- کاستالدینی و همکاران (۱۹۹۸)

کاستالدینی و همکارانش در سال ۱۹۹۸ با استفاده از روش سیستمی RES، شیب‌های طبیعی منطقه آپنینز ایتالیا را به نحوی مورد بررسی قرار دادند که بتوانند اثرات بارهای لرزه‌ای سطحی را بر پایداری این شیب‌ها مورد سنجش قرار دهند. برای این منظور آنها دو سری از پارامترها را برای حالت‌های استاتیکی و

دینامیکی انتخاب نموده و سپس روشی کاملاً منطبق بر مراحل انجام مطالعه مربوط به مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶) استفاده نمودند. بنابراین تنها تفاوت این مطالعه با مورد قبل، در نظر گرفتن پارامترهای لرزه‌ای شامل اندازه زلزله و پاسخ زمین می‌باشد. ماتریس اثر متقابل ساخته شده در این تحقیق به صورت کدگذاری شده در شکل ۳-۱۷ آورده شده است.

| CAUSE  |   |   |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------|---|---|----|---|----|----|----|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| A      | 1 | 1 | 1  | 0 | 3  | 0  | 2  | 2  | 0 | 3 | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  | 2  | 3  | 2  | 0  | 2  |
| B      | 0 | 0 | 3  | 2 | 2  | 2  | 1  | 3  | 0 | 0 | 2  | 3  | 3  | 2  | 4  | 4  | 3  | 3  | 3  | 4  |
| C      | 0 | 0 | 1  | 0 | 1  | 2  | 1  | 2  | 0 | 0 | 2  | 3  | 3  | 2  | 4  | 4  | 2  | 3  | 3  | 2  |
| D      | 0 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 1  | 0 | 1 | 0  | 1  | 4  | 3  | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 2  |
| E      | 0 | 0 | 0  | 0 | 4  | 0  | 0  | 4  | 0 | 0 | 0  | 3  | 0  | 2  | 2  | 3  | 1  | 3  | 3  | 4  |
| F      | 0 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 3  | 0 | 0 | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 4  |
| G      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 3  | 0  | 3  | 0 | 3 | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 2  | 3  | 3  |
| H      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 3  | 0  | 0  | 2 | 0 | 0  | 3  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 4  | 3  | 2  |
| I      | 1 | 0 | 0  | 4 | 0  | 2  | 2  | 2  | 1 | 0 | 0  | 3  | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 2  | 3  | 2  |
| L      | 0 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 3 | 0 | 3  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 1  | 4  | 3  |
| M      | 0 | 0 | 0  | 0 | 0  | 2  | 0  | 3  | 2 | 0 | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 2  | 3  | 0  |
| N      | 1 | 0 | 0  | 0 | 0  | 2  | 0  | 1  | 3 | 0 | 2  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 0  | 3  | 2  | 1  |
| O      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 3  | 2  | 2  | 3 | 0 | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 3  | 3  | 4  |
| P      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 1  | 4  | 1  | 3 | 0 | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 2  | 4  |
| Q      | 0 | 0 | 0  | 2 | 0  | 3  | 0  | 1  | 3 | 0 | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 3  | 3  | 4  |
| R      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 1  | 3  | 2  | 3 | 0 | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  | 3  | 3  | 4  |
| S      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 3  | 1  | 1  | 3 | 0 | 0  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 5  | 0  | 3  | 3  |
| T      | 0 | 0 | 0  | 1 | 0  | 3  | 2  | 2  | 3 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 3  | 0  | 4  |
| U      | 0 | 0 | 0  | 2 | 0  | 3  | 0  | 3  | 3 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 4  |
| V      | 0 | 0 | 0  | 3 | 0  | 3  | 0  | 2  | 3 | 0 | 0  | 3  | 0  | 0  | 2  | 1  | 0  | 3  | 2  | 4  |
| Z      | 0 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  |
| EFFECT |   |   |    |   |    |    |    |    |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 2      | 1 | 1 | 23 | 2 | 42 | 18 | 26 | 52 | 3 | 6 | 29 | 17 | 11 | 22 | 23 | 22 | 33 | 44 | 39 | 64 |

شکل ۳-۱۷- ماتریس کدگذاری شده برای ۲۱ پارامتر سیستم (Castaldini et al., 1998)

### ۳-۳-۵- ژانگ و همکاران (۲۰۰۴)

ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) خطر سقوط سنگ را برای شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه Chengdu-Lhasa در کشور چین مورد مطالعه قرار دادند.

مشکلات مشهود در این منطقه عبارت از تعدد و گسترش بلوک‌ها و تخته‌سنگ‌ها، کمبود اطلاعات و داده‌ها، ساختار زمین‌شناسی پیچیده، شرایط دشوار منطقه و تعداد بسیار زیاد فاکتورهای موثر بر هم بوده است. بنابراین محققان استفاده از رویکرد سیستمی را برای چنین شرایطی مناسب دیده‌اند. برای این منظور، پس از انتخاب پارامترهای اولیه ماتریس و کدگذاری آن، اقدام به تعریف اندیس‌های شدت سقوط سنگ ( $R_{II}^{80}$ ) و فراوانی سقوط سنگ ( $R_{FI}^{81}$ ) کرده و سپس با استفاده از آنها اندیس خطر سقوط سنگ ( $R_{HI}^{82}$ ) را به دست آوردند. با به دست آوردن اندیس‌های یادشده برای مناطق و ایستگاه‌های مختلف در طول بزرگراه یادشده و با استفاده از منوهای رده‌بندی چهارکلاسه، آنها توانستند این مناطق را از نظر خطر سقوط سنگ رتبه‌بندی نمایند. در این مطالعه اولین بار شیب‌های سنگی از نقطه‌نظر خطر سقوط سنگ با روش سیستمی تحلیل شده‌اند.

### ۳-۳-۴- صادقی و رسولی (۱۳۸۴-۲۰۰۵)

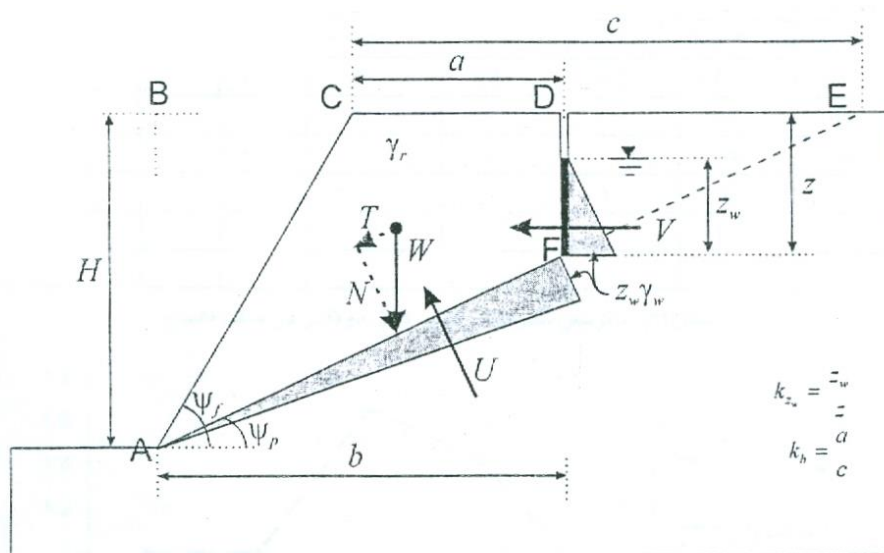
صادقی و رسولی در سال ۱۳۸۴ (معادل با ۲۰۰۵ میلادی) سعی کردند خطرپذیری لغزش صفحه‌ای در یک شیروانی سنگی را در دو حالت درزه سنگی اشباع و زهکشی‌شده با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ تحلیل نمایند. آنها برای این منظور، اساس کار را بر مبنای روابط موجود برای روش تعادل حدی از روش‌های تحلیل پایداری شیب‌های سنگی گذاشته و پارامترهای موثر بر سیستم را از میان پارامترهای دخیل در تحلیل

<sup>80</sup> Rockfall Intensity Index

<sup>81</sup> Rockfall Frequency Index

<sup>82</sup> Rockfall Hazard Index

تعالیل حدی انتخاب نمودند. در این مطالعه، برای کدگذاری ماتریس اثر متقابل بنا به گفته محققان از روش تمام مرتبط (Fully-Coupled Model) استفاده شده است، در حالی که کدگذاری انجام شده هیچ یک از خصوصیات یک سیستم تمام مرتبط را نداشته و این عمل تنها با جمع کردن متغیرها در یک طرف معادله تحلیل تعادل حدی و نگهداشتن پارامتر دلخواه و مورد نظر در سمت دیگر، رابطه‌ای برای آن پارامتر به دست آمده است. بدین ترتیب برای پارامترهایی که انجام این عمل امکان‌پذیر نبوده است، هیچ اثر متقابلی در نظر گرفته نشده و به همین دلیل عملاً مثلث پایین ماتریس خالی از هر اثر و درایه بوده و ماتریس به شکل بالامثلثی در آمده است. هندسه شیروانی سنگی مربوطه به همراه ماتریس یادشده در شکل‌های ۳-۱۸ و ۳-۱۹ آورده شده است.



شکل ۳-۱۸- هندسه شیروانی سنگی با لغزش صفحه‌ای و نیروهای وارد بر آن (صادقی و رسولی، ۱۳۸۴)

|   |          |   |       |                                                      |                |                                    |                |               |
|---|----------|---|-------|------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|---------------|
| H |          | I |       | $\gamma_s l f (\cot \psi_p - \cot \psi_f)$           |                |                                    |                |               |
|   | $\psi_f$ |   |       | $\frac{\gamma_s}{2} H \operatorname{cosec}^2 \psi_f$ |                |                                    |                |               |
|   |          | Z |       | $-\gamma_s z \cot \psi_f$                            |                |                                    |                |               |
|   |          |   | $Z_w$ |                                                      | $\gamma_w z_w$ | $\frac{\gamma_w}{2} h \sec \psi_p$ |                |               |
|   |          |   |       | W                                                    |                |                                    | $\cos \psi_p$  | $\sin \psi_p$ |
|   |          |   |       |                                                      | V              |                                    | $-\sin \psi_p$ | $\cos \psi_p$ |
|   |          |   |       |                                                      |                | U                                  | -1             |               |
|   |          |   |       |                                                      |                |                                    | N              |               |
|   |          |   |       |                                                      |                |                                    |                | T             |

شکل ۳-۱۹- ماتریس اثر متقابل ساخته شده برای تحلیل سیستمی (صادقی و رسولی، ۱۳۸۴)

این مطالعه که با هدفی نوآورانه و با ارزش قصد تغییر در شیوه کدگذاری ماتریس‌های اثر متقابل را با استفاده از روش ارائه شده توسط جیائو و هادسون (۱۹۹۵) داشته است، در عمل این کار را به صورت بسیار ابتدایی و با اشتباهات محرز انجام داده است. علاوه بر ایرادات بارزی که برای این تحقیق اشاره گردید، بایستی در نظر گرفته شود که روش تحلیل تعادل حدی (همان طور که در فصل دوم این گزارش اشاره شد) دارای محدودیت‌ها و ساده‌سازی‌های بسیاری است که در نظر گرفتن پارامترهای محدود آن به عنوان کل پارامترهای یک سیستم به هیچ وجه عملی قابل توجیه نیست. شاید بتوان گفت که مورد اخیر بزرگترین و اصلی‌ترین ایراد وارده بر این تحقیق می‌باشد.

### ۳-۳-۵- روزوس و همکاران (۲۰۰۸)

در سال ۲۰۰۸، روزوس و همکارانش روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) را به منظور رتبه‌بندی پتانسیل ناپایداری شیب‌های طبیعی در استان کاردیتسای یونان بکار بردند. آنها در این تحقیق ۱۳ پارامتر را به عنوان پارامترهای اصلی سیستم انتخاب کرده و با استفاده از روش ESQ، ماتریس اثر متقابل ساخته شده را



کدگذاری نمودند. پس از مراحل اولیه، ساختار زمین‌شناسی منطقه مهمترین و ارتفاع شیب‌ها کم‌اهمیت‌ترین پارامتر شناخته شد. در این مطالعه، منوهای رده‌بندی در پنج کلاس رتبه‌بندی شده و همین امر دقت طبقه‌بندی‌ها را بالا برده است.

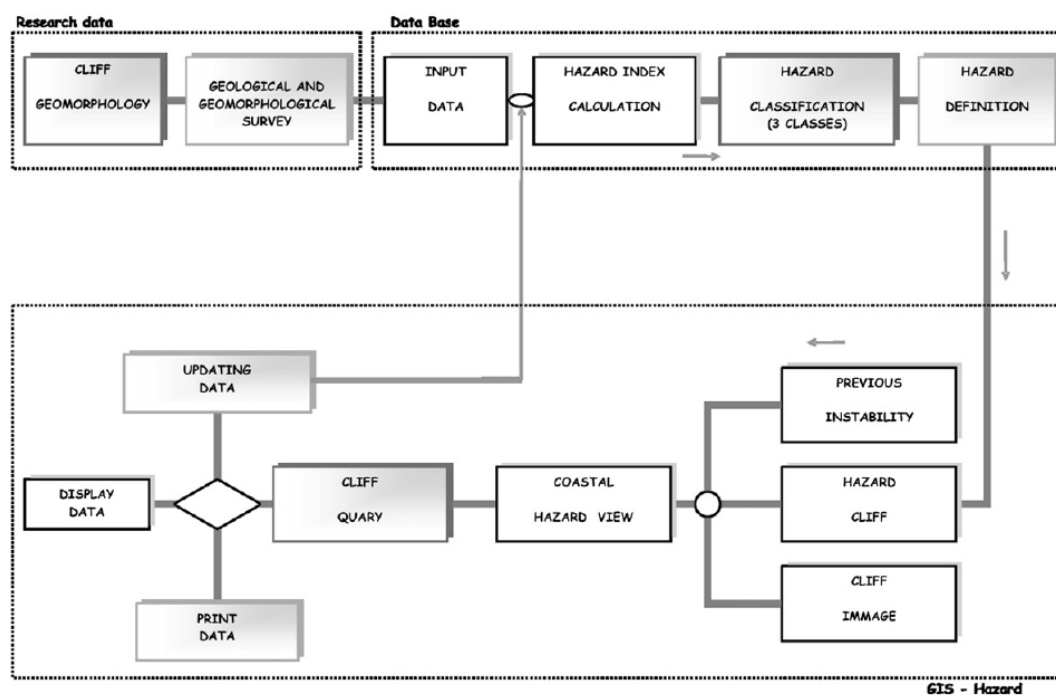
در نهایت، با استفاده از تعریف اندیس ناپایداری (Ii) همانند آنچه در گذشته انجام می‌شد، ناپایداری ۳۸۸ شیب طبیعی در منطقه تحلیل گردید. از مزیت‌های عمده این کاربرد می‌توان از اعتبارسنجی نتایج با توجه به ناپایداری‌ها و ریزش‌های واقعی صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه یاد کرد.

### ۳-۳-۵-۶- جریان و جریان (۲۰۰۸)

مشابه با کار روزوس و همکاران، جریان و جریان در سال ۲۰۰۸ از رویکرد RES به منظور مطالعه و زون‌بندی ریزش شیب‌های طبیعی ناحیه دوغانکنت در کشور ترکیه استفاده کردند. مراحل کار در این تحقیق همانند موارد قبلی بوده است. از مزیت‌های این مطالعه می‌توان تعداد کلاس‌های متغیر در منوهای رده‌بندی را نام برد که به اقتضای ماهیت پارامتر از ۴ تا ۷ کلاس برای آنها در نظر گرفته شده است. همین طور دو ماتریس اثر متقابل جداگانه برای شیب‌های سنگی و خاکی ساخته شده است. همچنین از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز به منظور زون‌بندی‌ها استفاده شده است که به بهتر نشان دادن نتایج کمک اساسی می‌کند.

## ۳-۳-۵-۷- بودتا و همکاران (۲۰۰۸)

بودتا و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با استفاده از الگوریتمی بر مبنای RES و GIS و دارای حلقه به روز رسانی اطلاعات، نگاشت خطرات وقوع زمین‌لغزش را برای ناحیه کیلنتو در ایتالیا انجام دادند. در این مطالعه نیز اندیسی به نام اندیس ناپایداری ( $I^{83}$ ) تعریف شده است. فلوچارت روش اجرا شده در شکل ۳-۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۰- فلوچارت روش استفاده شده برای نگاشت خطر زمین‌لغزش (Budetta *et al.*, 2008)

## ۴-۱- معرفی منطقه خوش‌یلاق

### ۴-۱-۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

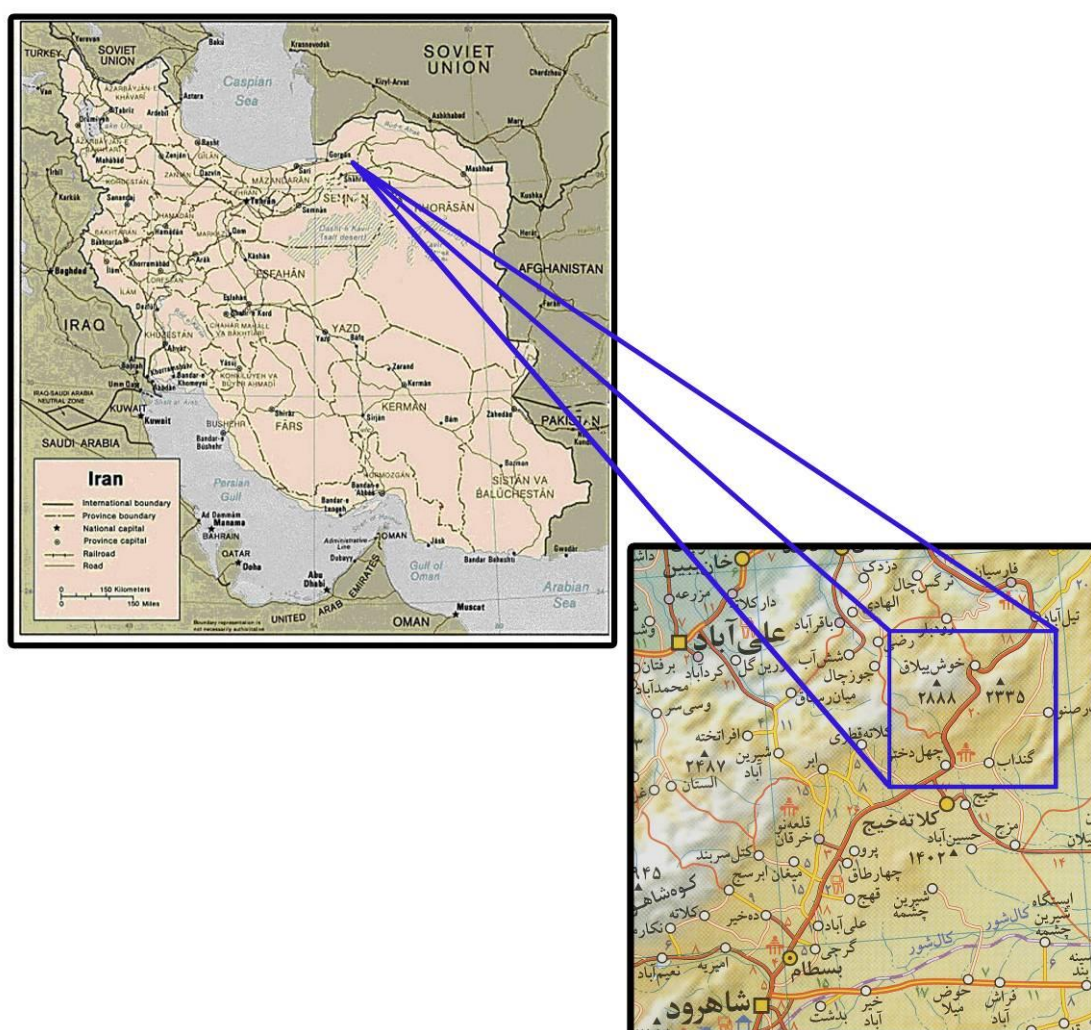
منطقه مورد نظر در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ خوش‌یلاق بین طول‌های جغرافیایی  $55^{\circ}$  و  $55^{\circ} 30'$  و عرض‌های جغرافیایی  $37^{\circ}$  و  $36^{\circ} 30'$  واقع شده است. مختصات دقیق نقطه ابتدا و انتهای نمونه‌برداری میان طول و عرض  $38^{\circ} 52' 48''$  و  $55^{\circ} 28' 18''$  و طول و عرض  $55^{\circ} 24' 56''$  و  $50^{\circ} 42'$  قرار گرفته است. مهم‌ترین راه دسترسی به منطقه، جاده آسفالت‌شهرود- آزادشهر می‌باشد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰). آب و هوای منطقه نمونه‌برداری خنک و کوهستانی بوده و میانگین میزان بارندگی سالیانه ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد (سالنامه آماری سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۸۵).

موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۴-۱ و نقشه زمین‌شناسی محدوده منطقه نمونه‌برداری در شکل ۴-۲ قابل مشاهده می‌باشد.

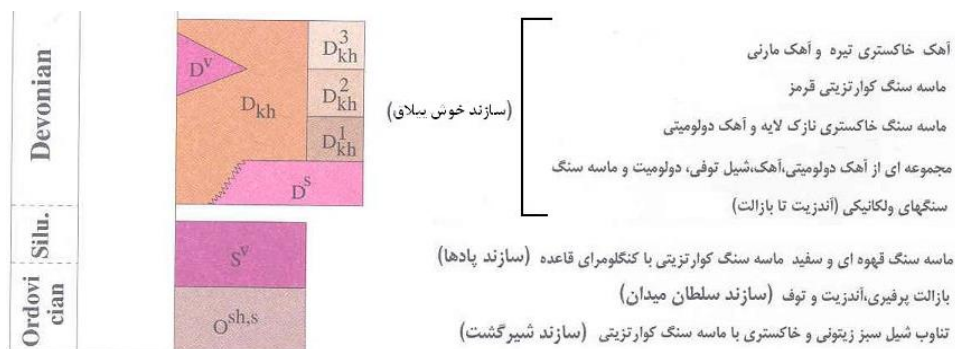
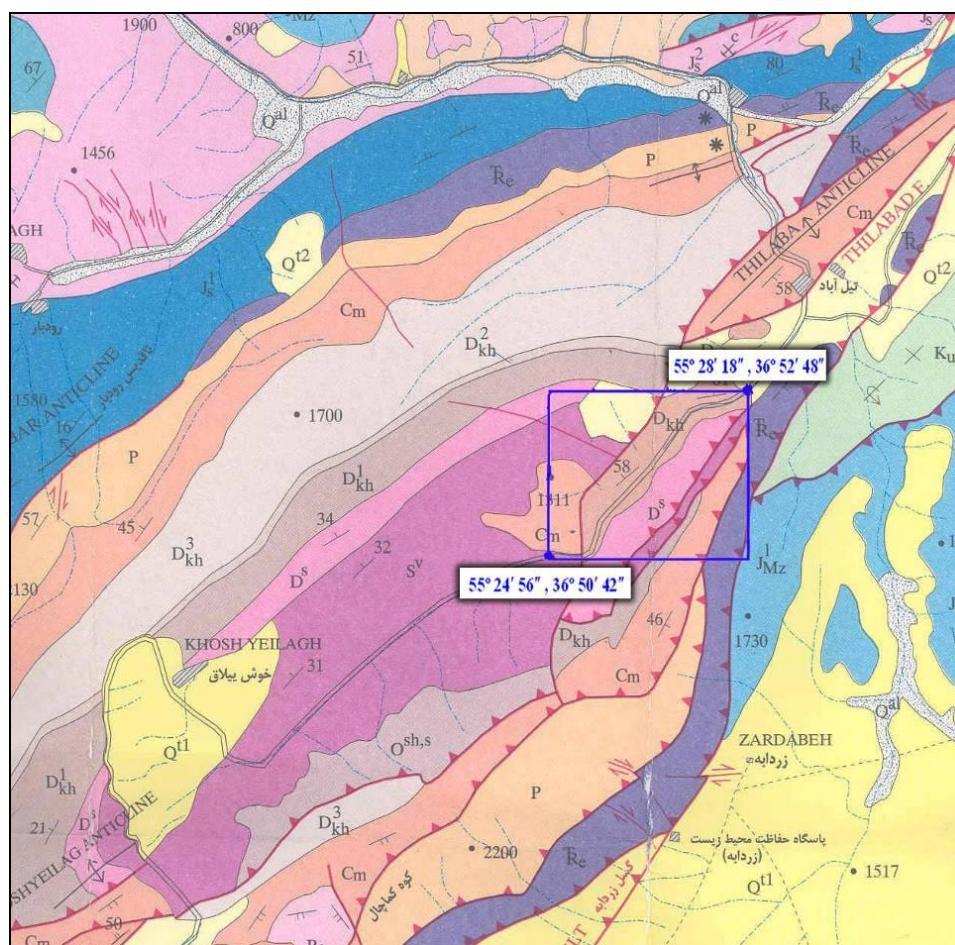
### ۴-۱-۲- ریخت‌شناسی و ارتفاعات موجود در منطقه

از نظر ریخت‌شناسی، منطقه از ارتفاعات و کوه‌های سر به فلک کشیده‌ای تشکیل شده که چهره یک منطقه واقعاً کوهستانی را به آن داده است. هر چند روند ارتفاعات و عناصر ساختمانی در البرز در مجموع

تقریباً شرقی- غربی است، ولی در اینجا به طور محلی روند ارتفاعات و ساختمان‌های زمین‌شناسی شمال شرقی- جنوب غربی است. بلندترین ارتفاعات منطقه مربوط به سنگ آهک‌های سازند لار است. در درجه دوم، سنگ آهک‌های با سن کرتاسه بالایی، دولومیت‌ها و ماسه‌سنگ‌های با سن پرمین قرار دارند. ارتفاعات درجه سوم توسط ماسه‌سنگ‌های سازند خوش‌بیلاق، آهک‌های نازک‌لایه سازند الیکا و اسپیلت بازالت‌های سلطان‌میدان و سازند شمشک تشکیل شده‌اند. نهشته‌های مارنی و ماسه‌سنگی میوسن در جنوب غربی ناحیه، ارتفاعات کوتاه تا متوسط را می‌سازند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).



شکل ۴-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن (مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰)



شکل ۴-۲- بخشی از نقشه زمین‌شناسی خوش بیلاق با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، ناحیه محدوده مورد مطالعه به صورت کادر مستطیلی مشخص شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰)

### ۴-۱-۳- سازندهای تشکیل دهنده منطقه

۴-۱-۳-۱- سازند خوش بیلاق ( $D_{kh}$ )

سازند خوش بیلاق در ناحیه از گسترش و ضخامت بالایی برخوردار است و ارتفاعات متوسطی را تشکیل می‌دهد. این سازند در مجموع از طبقات نازک تا متوسط لایه آهکی با میان لایه‌های مارنی و آهک، دولومیت ضخیم لایه، انواعی از ماسه سنگ، شیل به رنگ‌های سبز و قرمز، شیل توفی، توف و افق‌ها یا عدسی‌هایی از سنگ‌های ولکانیکی (با ترکیب آندزیت- بازالت) تشکیل شده است. به لحاظ وضعیت چین خوردگی و بهم ریختگی، تعیین ضخامت این سازند مشکل به نظر می‌رسد. شاید بتوان ضخامت آن را تا ۱۵۰۰ متر برآورد نمود (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

سازند خوش بیلاق در گردنه خوش بیلاق دارای نظم و ترتیب خوبی است، آن‌چنان که می‌توان آن را به سه واحد سنگی تقسیم نمود که از پایین به بالا عبارتند از:

- **بخش زیرین ( $D_{kh}^1$ ):** این بخش از پایین به بالا شامل ماسه سنگ کوارتزی سفید، دولومیت و لایه‌های آهکی است که با توجه به محتوای فسیلی به کووینین تا فرسنین تعلق دارند. ضخامت این بخش به ۶۳۴ متر می‌رسد.

- **بخش میانی ( $D_{kh}^2$ ):** از ماسه سنگ کوارتزی قرمز رنگ به ضخامت ۱۴۵ متر تشکیل شده است.

- **بخش فوقانی ( $D_{kh}^3$ ):** این بخش ۵۷۵ متر ارتفاع داشته و شامل سنگ آهک‌های بایوکلاستیک و

آهک مارنی است. فسیل‌های فراوان براکیوپود موجود در این واحد سن فمین را نشان می‌دهد.

## ۴-۱-۳-۲- سازند مبارک (Cm)

برونزد سازند مبارک در ناحیه از گسترش خوبی برخوردار است. از نگاه ریخت‌شناسی در مجموع بلندی‌های متوسطی را می‌سازد و در نقاط گوناگون از تنوع لیتولوژیکی نیز برخوردار است. این سازند از سنگ آهک‌های نازک و متوسط‌لایه به رنگ خاکستری تیره، آهک شیلی ورقه‌ای و شیل‌های سیاه‌رنگ تشکیل شده است. ضخامت این سازند در ناحیه حدود ۴۰۰ متر است. رسوبات کربونیفر به طور موازی و هم‌شیب توسط نهشته‌های پرمین پوشیده می‌شوند.

## ۴-۱-۳-۳- سازند پادها (Dp)

نهشته‌های مربوط به دونین در گردنه خوش‌یلاق دارای نظم و ترتیب خوبی می‌باشند، به طوری که می‌توان ماسه‌سنگ‌های قاعده نهشته‌های این سازند را در نقشه نشان داد. در این ناحیه سازند پادها در بخش زیرین از کنگلومرا و تناوب ماسه‌سنگ کوارتزی قرمز و سفید رنگ تشکیل شده است. کنگلومرای یاد شده حاوی قلوه‌هایی از سنگ‌های آذرین می‌باشد. بخش بالایی این سازند شامل شیل، سیلتستون، توف، ماسه‌سنگ، آهک و دولومیت است. ضخامت این واحد در گردنه خوش‌یلاق ۲۰۰ تا ۲۵۰ متر است. سازند پادها در ناحیه بر روی سازند سلطان‌میدان می‌نشیند و خود به صورت هم‌شیب و پیوسته توسط سازند خوش‌یلاق پوشیده می‌شود. با توجه به جایگاه چینه‌ای، سازند پادها به دونین آغازین تعلق دارد.

## ۴-۱-۴- گسل‌ها و چین‌های موجود در منطقه

روند گسل‌های منطقه مورد بررسی عموماً NE-SW می‌باشد. این ناحیه در بخش چین-راندگی البرز واقع شده است، لذا گسل‌ها عمدتاً از نوع راندگی بوده و شیب سطوح گسلی اغلب به سمت N-NW است. گسل‌های امتدادلغز نیز در مقیاس کوچک وجود دارند که معمولاً گسل‌های تراستی را قطع کرده‌اند. گسل اصلی عمل کرده بر روی منطقه دقیق نمونه‌برداری، گسل کلاته‌بن می‌باشد. روند این گسل تقریباً E-W است و از نوع گسل‌های راندگی می‌باشد. همچنین شیب سطح گسلی به سمت شمال است. در اثر عملکرد این گسل، سازند الیکا روی رسوبات مارنی میوسن و کنگلومرای پلیوسن قرار گرفته است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

از نظر چین‌خوردگی نیز دو تاقدیس اصلی در منطقه وجود دارند:

✓ **تاقدیس سرخ‌چشمه:** ساختمان کوچکی در جنوب گردنه خوش‌یلاق است که از سازند مبارک

تشکیل شده است. این چین در محل مزرعه سرخ‌چشمه توسط یک گسل کوچک امتدادلغز راستگرد بریده شده است.

✓ **تاقدیس تیل‌آباد:** این ساختمان در ضلع شمالی روستای تیل‌آباد واقع شده است و تماماً از سازند

مبارک تشکیل گردیده است. این تاقدیس طولی در حدود ۷ کیلومتر داشته و هر دو یال آن توسط

گسل‌هایی بریده شده‌اند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

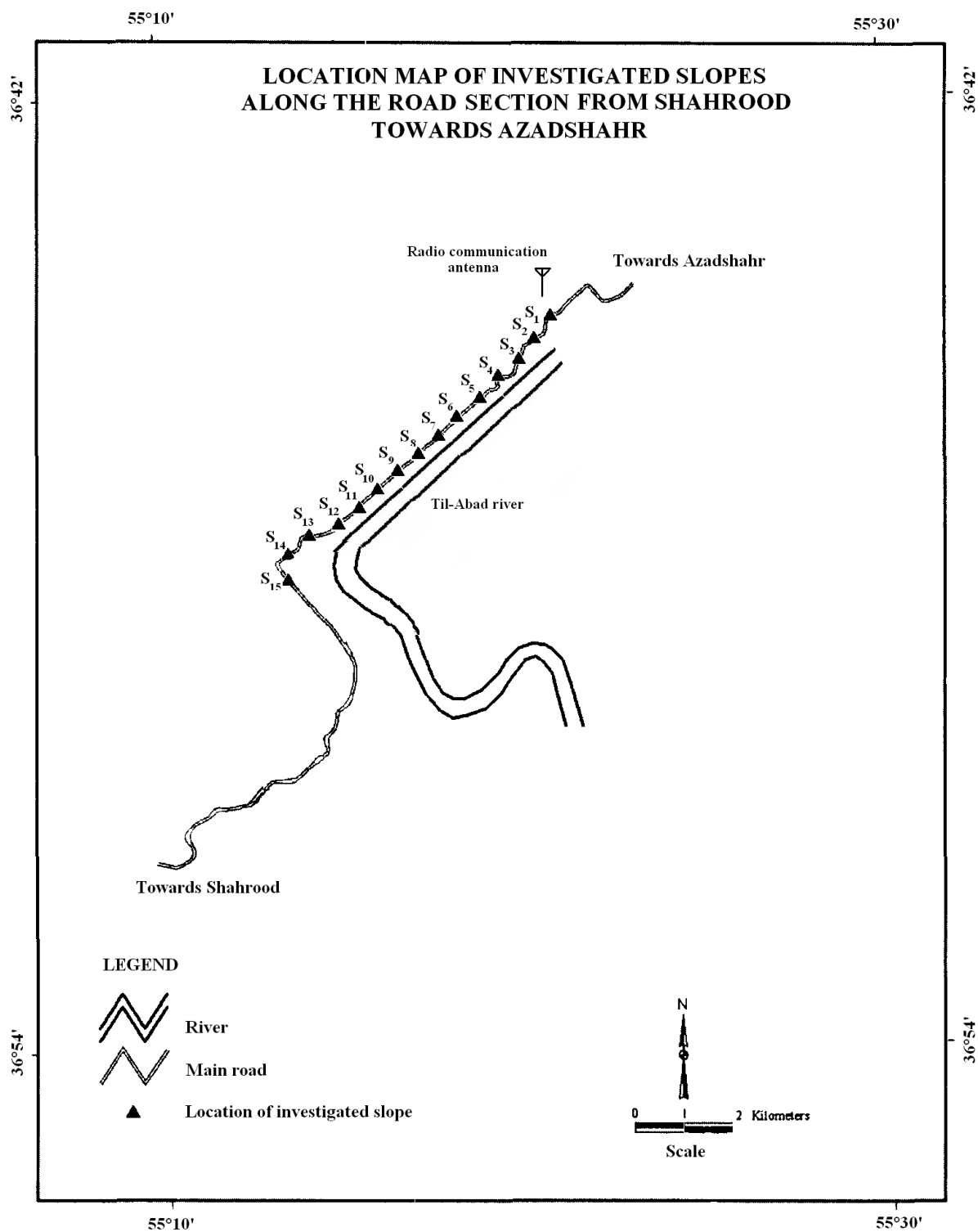


#### ۴-۱-۵- زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک منطقه

رشته‌کوه البرز در نگاه کلی به شکل کمانی است که روندی تقریباً شرقی-غربی داشته و حاشیه جنوبی حوضه فرو افتاده دریاچه خزر را تشکیل داده است. روند این رشته‌کوه در غرب، شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است، به طوری که می‌توان آن را تقریباً موازی بخش شمالی راندگی اصلی زاگرس در نظر گرفت و در البرز شرقی این روند شمال‌شرقی-جنوب‌غربی می‌باشد. با توجه به راستای ساخت‌های مشاهده شده در منطقه (چین‌ها و گسل‌های معکوس و راندگی)، روند کوتاه‌شدگی اعمال شده NW-SE است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

#### ۴-۲- شیب‌های سنگی و ایستگاه‌های مورد مطالعه

محل دقیق مورد مطالعه این تحقیق، شیب‌های سنگی مشرف به جاده در نواحی شمالی گردنه خوش‌یلاق می‌باشند. در طول حدود ۱۲ کیلومتر از جاده مذکور، ۱۵ شیب سنگی به نحوی انتخاب شده‌اند که بتوانند اکثر طول جاده را پوشش دهند. شیب‌های انتخاب شده با ایستگاه‌های S1 تا S15 نام‌گذاری شده‌اند. این ایستگاه‌ها بر روی کروکی جاده مشخص شده و در شکل ۴-۳ قابل مشاهده است. همچنین تصاویر برخی شیب‌های سنگی با نام آنها در سایر شکل‌ها (۴-۴، ۴-۵، ۴-۶، ۴-۷) آورده شده است.



شکل ۴-۳- کروکی منطقه مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های در نظر گرفته شده و شیب‌های سنگی



شکل ۴-۴- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۳ (S3)





شکل ۴-۵- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۴ (S<sub>4</sub>)شکل ۴-۶- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۹ (S<sub>9</sub>)



شکل ۴-۷- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۱۱ (S11)

## ۵-۱- مقدمه

همان طور که پیشتر اشاره شد، اصلی‌ترین مشخصه رویکردهای سیستمی، در نظر گرفتن اکثر پارامترهای موثر بر سیستم مورد مطالعه و استفاده از اثرات متقابل میان آنها برای رسیدن به رفتار کل سیستم است. در واقع این مسئله تفاوت بارز این روش‌ها با روش‌های تحلیلی می‌باشد. بنابراین اولین مرحله در استفاده از رویکرد سیستمی همواره شناسایی مهمترین پارامترهای موثر بر سیستم است. در فصل قبل ذکر گردید که این پارامترها در طول قطر اصلی ماتریسی به نام ماتریس اثرات متقابل قرار گرفته و پس از کدگذاری اثرات با

روش‌های مربوطه و به دست آوردن برخی مشخصه‌ها می‌توان فاکتورهایمانند علت و اثر را برای هر پارامتر داخل سیستم محاسبه نمود. پارامترها با توجه به این فاکتورها به نموداری به نام نمودار علت-اثر رفته و بدین ترتیب میزان اندرکنش هر یک مشخص می‌شود. سپس با رسم هیستوگرام مجموع این فاکتورها برای پارامترهای سیستم، میزان اهمیت پارامترها رتبه‌بندی می‌گردد. محاسبه میزان اثر متقابل به صورت مقدار این مجموع می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی گردد که لازم است تحت کنترل قرار گیرند، چرا که تغییر در این پارامترها احتمالاً می‌تواند باعث القای تغییرات مهمی در سیستم گردد. در مرحله بعد با تشریح پارامترها به صورت کمی یا کیفی می‌توان منوهای رده‌بندی هر پارامتر را تشکیل داده و با محاسبه اندیس تعریف شده برای سیستم، رفتار آن را با در نظر گرفتن تأثیر تمام پارامترها برای زیرسیستم‌های مورد مطالعه محاسبه نمود. در این فصل مراحل اشاره شده به منظور تحلیل پایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌یلاق به طور کامل اجرا می‌شوند.

## ۵-۲- عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه

در این قسمت برخی از مهمترین عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده ( $P_1$  تا  $P_{17}$ ) و هر یک جداگانه مورد بحث قرار گرفته است. بدیهی است که این عوامل با توجه به شرایط از منطقه‌ای به منطقه دیگر تا حد قابل توجهی تفاوت خواهد داشت.

### ۵-۲-۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی

همان طور که در فصل قبل ذکر شد، سه نوع سنگ عمده شامل ماسه‌سنگ، آهک و مارن در منطقه مورد مطالعه یافت می‌شوند که از میان آنها ماسه‌سنگ‌های خاکستری، آهک‌های مارنی و در برخی موارد ترکیب‌های پیچیده از سنگ‌های مختلف لیتولوژی غالب شیب‌های سنگی مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. ماسه سنگ‌های مذکور از انواع نسبتاً همگن است، در حالی که دانه‌بندی‌ها در مورد آهک‌های مارنی و ترکیب‌های مشاهده شده منظم نمی‌باشد.

### ۵-۲-۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها

گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها در مطالعات مهندسی سنگ از اهمیت بخصوصی برخوردار هستند. این پدیده‌ها موجب القای تشکیل دسته‌درزه‌های اصلی در جهت شکل‌گیری خود می‌شوند. در منطقه خوش‌ییلاق، گسل‌های اصلی در راستای گسل‌خوردگی غالب منطقه بوده و مورفولوژی این ناحیه را کنترل کرده‌اند. در منطقه مورد مطالعه، روند گسل‌ها عموماً NE-SW می‌باشد. این ناحیه در بخش چین-راندگی البرز واقع شده است، لذا گسل‌ها عمدتاً از نوع راندگی بوده و شیب سطوح گسلی اغلب به سمت N-NW است. از نظر چین‌خوردگی نیز دو تاقدیس اصلی در منطقه وجود دارند که در بسیاری از نقاط توسط گسل‌ها بریده شده‌اند (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰).

### ۵-۲-۳- ناپایداری‌های پیشین

وجود ناپایداری پیشین در یک شیب سنگی نشان‌دهنده ترکیب فاکتورهای موثر در ناپایداری در آن مورد بخصوص می‌باشد. با مشاهده این شکست‌های قبلی، امکان دستیابی به نحوه ترکیب فاکتورهای مذکور و پیش‌بینی ترکیب احتمالی مجدد آنها وجود دارد. علاوه بر این، ممکن است پدیده‌های کوچک مقیاس در مقیاس‌های بزرگتر تکرار شوند که تحلیل آنها همواره در فهم فرآیند شکست‌ها مفید می‌باشد. از دیدگاه مکانیک سنگی، شکست‌های پیشین می‌تواند توده‌سنگ را تحت تأثیر قرار داده و صفحات برش را به مقاومت نهایی و سپس باقیمانده برسانند. همین طور، توده‌سنگ شکسته شده همیشه به پایداری کامل نرسیده و احتمال شکست مجدد در آن وجود دارد. علاوه بر اینها، در اثر حرکت اجزای توده‌سنگ، به دلیل آزادشدگی تنش و در نتیجه باز شدن شکستگی‌ها، ضعیف‌شدگی به توده‌سنگ القا می‌گردد.

از دیدگاه دیگر، عامل شکست می‌تواند سبب دستیابی به یک وضعیت پایدارتر گردد، چرا که احتمال قرارگیری سنگ‌ها در شیب‌های کمتر و نیز آزادسازی تنش وجود داشته و این پدیده‌ها می‌توانند باعث به وجود آمدن حالت مثبتی از پایداری شده و در برخی نقاط تمرکز تنش را بالا ببرند. به طور کلی در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در برخی ایستگاه‌های مشخص شده، عامل ناپایداری پیشین گاه به صورت جزئی و در برخی موارد به حالت بسیار شدید مشاهده شد.

#### ۵-۲-۴- مقاومت سنگ بکر



این پارامتر تاثیر بسیاری در مقاومت توده‌سنگ داشته و از ملاک‌های وقوع شکست در آن به شمار می‌رود. در منطقه مورد مطالعه، به دلیل لیتولوژی خاص و عوامل دیگر، مقاومت سنگ بکر در سطوح بالایی قرار ندارد. همین امر یکی از عوامل درزه‌خوردگی شدید و وجود ناپیوستگی‌های بسیار در منطقه شده است.

### ۵-۲-۵- هوازده‌گی

به دلیل آب و هوای خاص منطقه که از بارش‌های شدیدی در برخی از فصول سال برخوردار است و نیز تغییرات دمایی در طول سال در آن بسیار زیاد است، و همچنین به دلیل نوع سنگ‌های تشکیل‌دهنده شیب‌ها که قابلیت فراوانی برای هوازده شدن دارند، پارامتر هوازده‌گی اهمیت بسزایی را در منطقه مورد مطالعه دارا است و تا حد زیادی موجب کاهش مقاومت توده‌سنگ‌های منطقه شده است. از طرفی هوازده‌گی در درزه‌های باز باعث تأثیر منفی بر خصوصیات مقاومتی سطوح آنها می‌گردد. به نظر می‌رسد با توجه به خصوصیات منطقه خوش‌ییلاق، هوازده‌گی مکانیکی در آن فعال‌تر از نوع شیمیایی باشد.

### ۵-۲-۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها

بدیهی است که خصوصیات درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها تأثیر بسیار مهمی بر پایداری شیب‌های سنگی دارد. این خصوصیات به طور کلی شامل تعداد دسته‌درزه‌ها، جهت‌یافتگی دسته‌درزه‌ها، بازده‌گی درزه‌ها و تداوم آنها می‌باشد.

### ۵-۲-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها

خصوصیات مقاومتی درزه‌ها اغلب با مقاومت برشی سطوح آنها بیان می‌شود. مقاومت برشی درزه‌ها شامل دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد که با وابستگی به پارامترهایی نظیر زبری سطح درزه به پارامتر یکتایی به نام مقاومت برشی حداکثر در بار قائم ثابت منتهی می‌گردند. بنابراین این ویژگی به عنوان معرف میزان مقاومت برشی درزه‌ها در این منطقه در نظر گرفته شد.

### ۵-۲-۸- شرایط هیدرولیکی

این شرایط خصوصياتی از توده‌سنگ که جریان را کنترل می‌کنند (نظیر نفوذپذیری، اتصال شکستگی‌ها و درزه‌ها به یکدیگر و مسیرهای عبور آب)، در بر می‌گیرد. جریان آب و حتی مرطوب بودن بخش‌هایی از توده‌سنگ می‌تواند باعث ایجاد هوازدگی شدید و نیز به دلیل بوجود آمدن فشار منفذی تأثیر منفی بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی درزه‌های سنگی گردد. همچنین این عامل باعث افزایش وزن توده‌های ناپایدار شده و بدین ترتیب می‌توان این گونه نتیجه گرفت که شرایط هیدرولیکی شیب‌های سنگی از مهمترین عوامل مورد بحث و تأثیرگذار بر پایداری آنهاست.

### ۵-۲-۹- ابعاد و زاویه شیب‌ها

ارتفاع یک شیب سنگی به طور کلی نتیجه تلفیق فعالیت‌های تکتونیکی و فرآیندهای فرسایش و

هوازگی مربوط به شرایط آب و هوای منطقه و اثرات متقابل ناشی از آنها می‌باشد. بنابراین پارامتر ارتفاع به صورت مستقیم بر شکست و ناپایداری شیب سنگی تأثیر ندارد، بلکه اثرات متقابل فاکتورها و نتایج ناشی از آن تأثیراتی بر سیستم پایداری دارد که در نتیجه نمی‌توان آن را جدا از سایر پارامترها دانست. با این حال، زاویه شیب‌ها نقش بسیار مهمی در شروع و ایجاد ناپایداری داراست که این پارامتر نیز مانند ارتفاع شیب‌ها نتیجه اثرات متقابل میان پارامترهای دیگر است.

#### ۵-۲-۱۰- میزان بارندگی

بارندگی در یک منطقه می‌تواند با به وجود آمدن پاره‌ای از شرایط در نهایت باعث تضعیف شیب‌ها و کمک به ناپایداری آنها شود. افزایش ظرفیت فرسایشی جریان‌ها که می‌توانند باعث جدا شدن مواد و سنگ‌ها از پاشنه شیب‌ها شوند؛ افزایش جریان‌های نزدیک به سطح که موجب فرسایش شیب‌ها می‌شوند؛ بالا رفتن تراز آب زیرزمینی که بسته به نفوذپذیری توده‌سنگ می‌تواند باعث اشباع کامل آن گردد و نیز فشار منفذی اضافی را در درزه‌ها و شکستگی‌ها ایجاد نماید؛ و همچنین افزایش وزن توده‌سنگ ناپایدار از جمله اثرات مهم بارندگی‌ها در مناطق مختلف مورد نظر هستند. میزان متوسط بارندگی در منطقه مورد مطالعه این تحقیق طبق اطلاعات گرفته شده از ایستگاه‌های نزدیک به محل مورد نظر، در حدود ۲۰۰ تا ۴۰۰ سانتی‌متر در سال می‌باشد.

#### ۵-۲-۱۱- چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن

پدیده یخ‌زدگی و آب شدن در رخساره شیب‌های سنگی عبارت از نوسان درجه حرارت در صفر درجه سلسیوس و ایجاد چرخه‌هایی است که بیشتر مربوط به مناطق کوهستانی در ارتفاعات بالا می‌باشد و با تلفیق با پاره‌ای از شرایط محیطی می‌تواند موجب تغییر در خصوصیات مقاومتی، تداوم و بازشدگی درزه‌ها، هوازدهی و شرایط هیدرولیکی شود که در نهایت ناپایداری را در شیب سنگی افزایش می‌دهد. به وجود آمدن این پدیده مستلزم وجود شرایطی مانند آب درزه‌ها و درزه‌های افقی باز است. در منطقه خوش‌ییلاق که جزء مناطق کوهستانی و دارای ارتفاع زیاد می‌باشد. در برخی فصول سال همواره درجه حرارت روزانه در حال نوسان در حدود صفر درجه سلسیوس بوده و شرایط بسیار مناسب برای ایجاد چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن می‌باشد.

### ۵-۳- اثرات متقابل میان پارامترهای انتخاب شده

به منظور فهم چگونگی اثرات متقابل پارامترهای توضیح داده شده در قسمت قبل، نیاز به یک مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر تغییر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. چنین اثرات متقابلی را می‌توان با استفاده از یک ماتریس مربعی نشان داد که پارامترها در طول قطر اصلی آن لیست شده و اثرات متقابل در نظر گرفته شده در سایر درایه‌های غیراصلی قرار می‌گیرند. در این ماتریس، اثرات متقابل به صورت ساعت‌گرد بیان می‌شوند. در این نوع رویکرد، اجزای یک پروژه مهندسی سنگ به جای بررسی جزء به جزء، همگی در یک چهارچوب واحد مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

بنابراین، شانزده پارامتر لیست شده در قسمت قبل در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اثر متقابل (شکل ۵-۱) به همراه درایه پایین سمت راست که توسط "ناپایداری بالقوه" پر می‌شود، قرار می‌گیرند. درایه آخر اشاره شده در واقع موضوع مورد مطالعه است. ستون اثرات متقابل که از این درایه آخر عبور می‌کند، نشان می‌دهد که چگونه سیستم توده‌سنگ، ناپایداری بالقوه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به همین شکل سطر عبوری از این درایه نشان دهنده اثر ناپایداری بالقوه بر توده‌سنگ است (که در این کاربرد عملاً وجود ندارد، چرا که ناپایداری "بالقوه" است). به همین ترتیب هر سطر عبوری از یک پارامتر، اثر آن پارامتر را بر روی سیستم تشریح می‌کند (و به نام "علت" به سبب پارامتر شناخته می‌شود). همین طور هر ستون اثر سیستم بر روی پارامتر را نشان می‌دهد (و "اثر" بر روی پارامتر نامگذاری می‌شود).

در هر پروژه مهندسی، برخی پارامترها نسبت به سایرین اثر بزرگتری بر روی سیستم دارند و در عوض برخی پارامترها تا حد زیادی توسط سیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرند. برای عددی‌سازی اهمیت و میزان اثرات متقابل مختلف، یک روش کدگذاری لازم است. عمل کدگذاری ماتریس در صورت موجود بودن اطلاعات نسبتاً کامل در مورد پروژه و شرایط منطقه مورد مطالعه کار تقریباً راحتی می‌باشد. برای تحقیق اخیر، محدوده‌ای از صفر (عدم تأثیر) تا چهار (اثر بحرانی) بکار گرفته شده است. همان طور که در فصل سوم نیز اشاره شد، این روش کدگذاری به روش نیمه عددی خبره (<sup>۸۴</sup>ESQ) معروف است که در حقیقت نوع تعمیم‌یافته‌ای از روش دوتایی است و دارای پنج کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ می‌باشد. در این کلاس‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اثر متقابل، ۱ برای اثر متقابل ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته

---

<sup>84</sup> Expert Semi-Quantitative

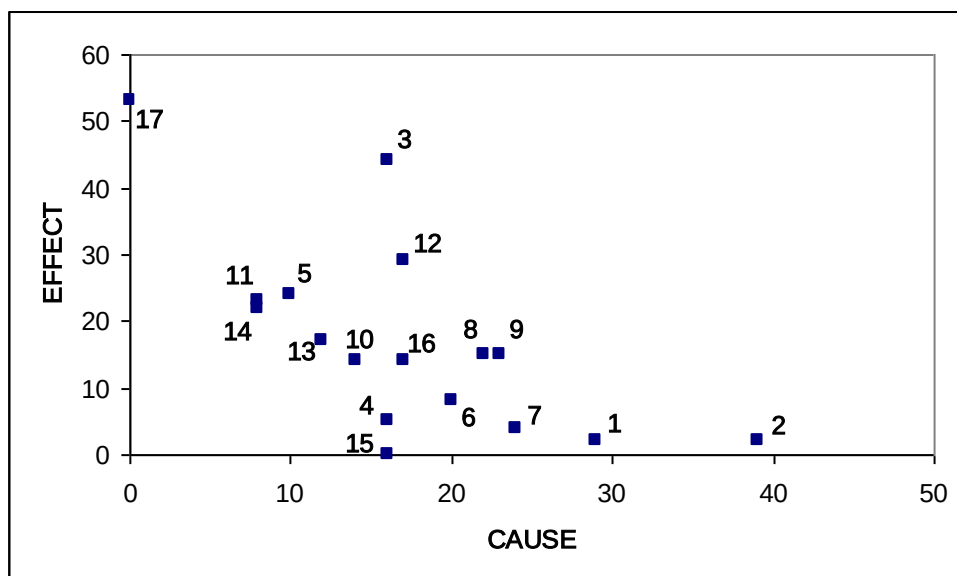
می‌شود. این روش کدگذاری، از حساسیت بیشتری نسبت به روش دوتایی که به صورت بسیار ساده تنها روشن یا خاموش بودن درایه‌ها را تعیین می‌نمود، برخوردار است (Hudson, 1992). ضعف اصلی روش مربوط به تغییرپذیری بسیار زیاد آن در تخصیص کلاس‌ها به درایه‌ها می‌باشد که آن را در تشریح کامل مکانیسم‌های مربوطه ناتوان ساخته است. با این حال، به دلیل عدم وجود یک روش مرسوم دیگر برای پوشش این ضعف، و نیز سادگی استفاده از آن، در حال حاضر این روش از بیشترین کاربرد برخوردار است. ماتریس اثر متقابل کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱- ماتریس اثر متقابل کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق

|                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |   |    |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---|----|
| P <sub>1</sub> | 2              | 3              | 3              | 3              | 2              | 0              | 0              | 2              | 2               | 2               | 2               | 2               | 3               | 0               | 0               | 3 | 29 |
| 2              | P <sub>2</sub> | 3              | 0              | 1              | 4              | 4              | 4              | 4              | 4               | 3               | 3               | 2               | 2               | 0               | 0               | 3 | 39 |
| 0              | 0              | P <sub>3</sub> | 0              | 1              | 0              | 0              | 2              | 0              | 1               | 2               | 1               | 3               | 3               | 0               | 1               | 2 | 16 |
| 0              | 0              | 2              | P <sub>4</sub> | 3              | 2              | 0              | 0              | 0              | 1               | 2               | 0               | 2               | 2               | 0               | 0               | 2 | 16 |
| 0              | 0              | 3              | 2              | P <sub>5</sub> | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | 2               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 3 | 10 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 2              | P <sub>6</sub> | 0              | 0              | 0              | 0               | 0               | 3               | 2               | 2               | 0               | 4               | 4 | 20 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 0              | 0              | P <sub>7</sub> | 2              | 2              | 2               | 1               | 2               | 2               | 3               | 0               | 3               | 4 | 24 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 3              | 0              | 0              | P <sub>8</sub> | 2              | 2               | 3               | 4               | 0               | 1               | 0               | 0               | 4 | 22 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 2              | 0              | 0              | 1              | P <sub>9</sub> | 1               | 2               | 3               | 3               | 2               | 0               | 2               | 4 | 23 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              | P <sub>10</sub> | 0               | 3               | 1               | 0               | 0               | 0               | 4 | 14 |
| 0              | 0              | 2              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | P <sub>11</sub> | 0               | 0               | 2               | 0               | 0               | 4 | 8  |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 3              | 0              | 0              | 2              | 1              | 0               | 3               | P <sub>12</sub> | 0               | 0               | 0               | 2               | 3 | 17 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 1               | 0               | 2               | P <sub>13</sub> | 2               | 0               | 0               | 3 | 12 |
| 0              | 0              | 4              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | 0               | 0               | 0               | P <sub>14</sub> | 0               | 0               | 4 | 8  |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 2              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               | 2               | 4               | 0               | 0               | P <sub>15</sub> | 2               | 3 | 16 |
| 0              | 0              | 3              | 0              | 3              | 0              | 0              | 3              | 2              | 0               | 1               | 2               | 0               | 0               | 0               | P <sub>16</sub> | 3 | 17 |

|        |   |    |   |    |   |   |    |    |    |    |    |    |    |   |    |                 |   |
|--------|---|----|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|---|----|-----------------|---|
| 0      | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | P <sub>17</sub> | 0 |
| 2      | 2 | 44 | 5 | 24 | 8 | 4 | 15 | 15 | 14 | 23 | 29 | 17 | 22 | 0 | 14 | 53              |   |
| Effect |   |    |   |    |   |   |    |    |    |    |    |    |    |   |    |                 |   |

پس از کدگذاری ماتریس، علت (C) به صورت مجموع تمام کدهای سطر و/اثر (E) به صورت مجموع تمام کدهای ستون برای هر پارامتر قابل محاسبه است. مقادیر علت و اثر هر پارامتر به روی محورهای x و y منتقل شده و بدین ترتیب نمودار علت-اثر را به وجود می‌آورند (شکل ۵-۱). در این نمودار، قطر نشان‌دهنده مکان هندسی C=E است. در طول این قطر، مجموع C+E افزایش می‌یابد و خطوط شدت اثر متقابل مساوی (مقادیر C+E) بر روی نمودار رسم می‌شوند تا تفاوت میان اثرات متقابل زیاد و کم را قائل شوند. نقاطی که در قسمت پایین سمت راست نمودار قرار می‌گیرند پارامترهایی را مشخص می‌کنند که بر روی سیستم تسلط دارند، چرا که از مقادیر C-E بزرگتری نسبت به نقاطی که در اطراف قطر قرار دارند، برخوردارند. پارامترهایی که تحت اثر سیستم قرار گرفته‌اند در قسمت بالا سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند و مقادیر C-E کوچکتری را دارا هستند (Hudson, 1992). نمودار علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه بسیار حائز اهمیت بوده و قادر است اثرات متقابل سودمند و غیرسودمند از نظر مهندسی را مشخص سازد. محاسبه میزان اثر متقابل به صورت مقدار C+E می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی گردد که لازم است تحت کنترل قرار گیرند، چرا که تغییر در این پارامترها احتمالاً می‌تواند باعث القای تغییرات مهمی در سیستم گردد.

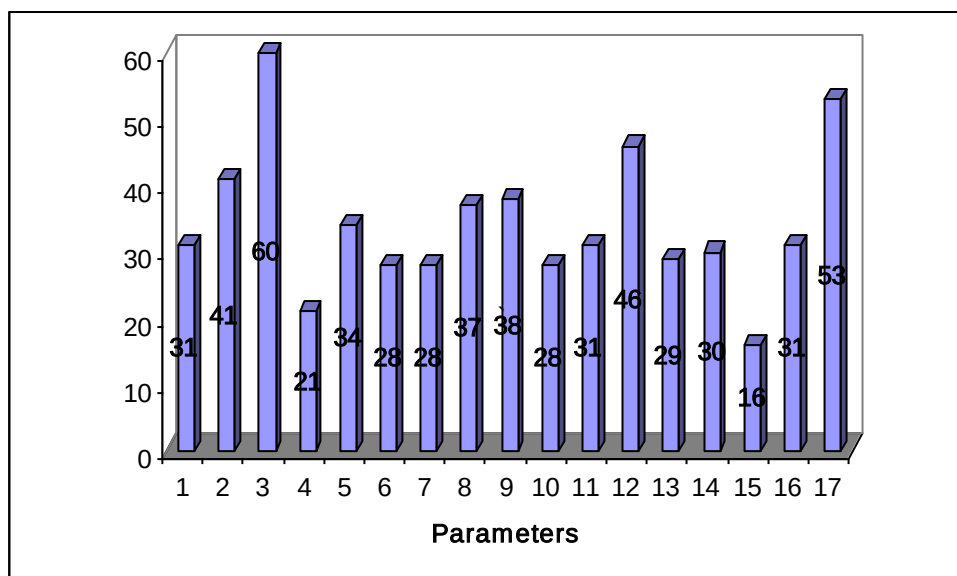


شکل ۵-۱- نمودار علت- اثر برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌یلاق

از نمودار علت- اثر رسم شده این امر آشکار می‌گردد که پارامتر ۱۷ یعنی ناپایداری بالقوه کاملاً تحت اثر سیستم بوده و در عوض پارامترهای ۱، ۲ و ۷ یعنی لیتولوژی، گسل‌ها و چین‌ها و جهت‌یافتگی درزه‌ها بیشترین تسلط را بر سیستم دارند.

با به دست آوردن مجموع علت و اثرها برای هر پارامتر (C+E) می‌توان هیستوگرام شدت اثر متقابل را رسم نمود که در آن پارامترها با توجه به مجموع یاد شده به ترتیب قرار می‌گیرند (شکل ۵-۲). انتخاب مجموع C+E به عنوان فاکتور تمایز بین پارامترها به دلیل تمرکز بر نقش اندرکنش سیستم بوده است. به طور کلی هر چه اندرکنش یک سیستم بیشتر باشد، آن سیستم به صورت بالقوه ناپایدار است، زیرا شانس بیشتری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر بگذارد.





شکل ۵-۲- هیستوگرام شدت اثر متقابل پارامترها

هیستوگرام شدت اثر متقابل پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای ناپایداری پیشین، ناپایداری بالقوه، شرایط هیدرولیکی و تا حدی گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها بیشترین اندرکنش را در سیستم داشته و این بدان معنی است که تغییر کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر خواهد گذاشت.

## ۵-۴- تشکیل منوهای رده‌بندی و به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز

با اینکه تا این مرحله از کار شدت اندرکنش نسبی به صورت اهمیت پارامترها سنجیده شده است، لازم است که مقادیر واقعی پارامترها وارد بحث شده و داده‌های ورودی با جزئیات کامل از منطقه مورد مطالعه به دست آیند. مقادیر پارامترها از منوهای رده‌بندی انتخاب می‌شوند. لیست ۱۶ پارامتر وابسته در منطقه جاده خوش‌یلاق در نظر گرفته شده و اطلاعات برای ۱۵ شیب سنگی جمع‌آوری شد. بدیهی است که پارامتر "ناپایداری بالقوه" در این مورد استفاده نشده و به این دلیل تعداد پارامترهای نشانگر ۱۶ می‌باشد.

برخی پارامترها به صورت کیفی و برخی دیگر کمی تشریح شده‌اند. به همین دلیل، امکان وارد کردن مقادیر واقعی خود پارامتر به طور مستقیم در محاسبه اندیس ناپایداری ممکن نبوده و بنابراین یک رده‌بندی برای کلاس‌های مختلف کیفیت‌ها و مقادیر پارامترها تعیین شده است. سه کلاس برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای "سهم کم"، یک برای "سهمیم" و دو برای "سهم زیاد" پارامترها تعیین شده است. بنابراین رتبه‌های بالاتر به کلاس‌هایی از مقادیر پارامترها اختصاص می‌یابند که در ارتباط با ناپایداری بیشتری می‌باشند (جدول ۵-۲). در ادامه هر یک از منوها جداگانه تشریح می‌شوند.

جدول ۵-۲- منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

| رده‌بندی اختصاص یافته             |                            |                        | پارامتر                                                       |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------|
| ۲                                 | ۱                          | ۰                      |                                                               |
| آهک مارنی                         | ترکیب ماسه‌سنگ و آهک مارنی | ماسه‌سنگ خاکستری       | زمین‌شناسی و لیتولوژی                                         |
| اصلی                              | فرعی و جزئی                | عدم وجود               | گسل‌ها و چین خوردگی‌ها                                        |
| فعال                              | ساکن                       | غیرفعال                | ناپایداری پیشین                                               |
| کمتر از ۳۰ مگاپاسکال              | ۳۰ تا ۵۰ مگاپاسکال         | بزرگتر از ۵۰ مگاپاسکال | مقاومت سنگ بکر (مقاومت فشاری تک‌محوره)                        |
| هوزدگی شدید همراه با مواد پرکننده | تغییر رنگ در سطوح          | هوانزده                | هوازدگی (سطوح درزه‌ها)                                        |
| بیشتر از ۳                        | ۱-۳                        | ۱                      | تعداد دسته‌درزه‌ها                                            |
| بیشتر از ۵                        | ۲ تا ۵                     | کمتر از ۲              | جهت‌یافتگی درزه‌ها (تعداد دسته‌درزه‌ها در جهت ناپایداری اصلی) |
| بیشتر از ۵۰ میلی‌متر              | ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر          | کمتر از ۱۰ میلی‌متر    | بازشدگی درزه‌ها                                               |
| بیشتر از ۱۰ متر                   | ۵ تا ۱۰ متر                | کمتر از ۵ متر          | تداوم درزه‌ها                                                 |
| کمتر از ۰/۱۵ متر                  | ۰/۴ تا ۰/۱۵ متر            | بیشتر از ۰/۴ متر       | فاصله‌داری درزه‌ها                                            |
| کمتر از ۰/۵ مگاپاسکال             | ۰/۵ تا ۱ مگاپاسکال         | بیشتر از ۱ مگاپاسکال   | مقاومت برشی درزه‌ها (در تنش نرمال ۱ مگاپاسکال)                |
| دارای جریان                       | مرطوب                      | خشک                    | شرایط هیدرولیکی                                               |
| بیشتر از ۱۵ متر                   | ۵ تا ۱۵ متر                | کمتر از ۵ متر          | ارتفاع شیب‌ها                                                 |
| بیشتر از ۷۵ درجه                  | ۴۵ تا ۷۵ درجه              | کمتر از ۴۵ درجه        | زاویه شیب‌ها                                                  |
| بیشتر از ۵۰۰ میلی‌متر             | ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر        | کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر   | میزان بارندگی (سالانه)                                        |
| بیشتر از ۱۲۰                      | ۸۰ تا ۱۲۰                  | کمتر از ۸۰             | یخ‌زدگی و آب شدن (چرخه‌ها در سال)                             |

#### ۵-۴-۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی

زمین‌شناسی و لیتولوژی تشکیل‌دهنده منطقه و شیب‌های سنگی به گونه‌ای به صورت کیفی بیان شده

است که بتوان اغلب شیب‌ها را رده‌بندی نمود. در این منو، ماسه‌سنگ خاکستری رده صفر، ترکیب ماسه‌سنگ

و آهک مارنی رده یک و آهک مارنی رده دو را دارا است.

#### ۵-۴-۲- گسل‌ها و چین خوردگی‌ها

برای گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها در یک شیب سنگی در صورت عدم وجود، رده صفر، وجود پدیده‌ها به صورت گسل‌ها و چین‌های فرعی و جزئی، رده یک و دیده شدن گسل‌ها و چین‌های اصلی رده دو در نظر گرفته شده است. گسل‌ها و چین‌های جزئی، مربوط به مواردی هستند که علائم و نشانه‌های حرکت نسبی بلوک‌های سنگی در اثر آنها قابل مشاهده است. وجود گسل‌ها و چین‌های اصلی به شیب‌هایی ارجاع داده می‌شود که وجود این پدیده‌ها در آنها در امتداد و موازی با روند گسل‌های اصلی منطقه بوده و معمولاً همراه با افزایش فراوانی درزه‌ها و شکستگی‌ها و خردشدگی موضعی سنگ‌ها در آن راستا و امتداد است. نمونه‌ای از گسل‌های اصلی بر روی شیب سنگی شماره ۱۱ در شکل ۵-۳ آورده شده است.



شکل ۵-۳- نمونه‌ای از گسل‌های اصلی بر روی شیب سنگی شماره ۱۱

### ۵-۴-۳- ناپایداری پیشین

وجود ناپایداری پیشین در شیب‌های سنگی در سه کلاس غیرفعال، ساکن و فعال رده‌بندی شده است (با رده‌های صفر، یک و دو). با توجه به تعریف ارائه شده توسط وارنز<sup>۸۵</sup> (۱۹۷۸)، شیب‌های غیرفعال به شیب‌هایی اطلاق می‌شود که فاکتورهای مربوط به حرکت و شکست به صورت طبیعی یا با فعالیت‌های انسانی حذف شده‌اند؛ شیب‌های ساکن آنهایی هستند که شواهدی مربوط به وقوع حرکت در بلوک‌ها در حال حاضر وجود ندارد ولی حرکت یا شکست ممکن است مجدداً رخ دهد؛ و شیب‌های فعال شیب‌هایی هستند که هم اکنون در آنها بلوک‌های سنگی در حال حرکت هستند.

### ۵-۴-۴- مقاومت سنگ بکر

مقادیر متوسط مقاومت فشاری تک‌محوره برای شیب‌های سنگی منطقه با توجه به لیتولوژی موجود در آنها محاسبه شده و در رده‌بندی‌ها با سه کلاس مشخص شده‌اند. رده‌های بالاتر مربوط به مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره کمتر هستند (نتایج مربوط به آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوره در پیوست الف آورده شده است).

<sup>85</sup> Varnes

### ۵-۴-۵- تعداد دسته‌درزه‌ها و جهت‌یافتگی

برداشت کاملی از درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در شیب‌های سنگی مورد مطالعه انجام گرفته و اطلاعات جمع‌آوری شده برای هر شیب بر روی شبکه‌های قطبی رسم گردید. با استفاده از پلات‌های کنتوری، دسته‌درزه‌های اصلی شناسایی شده و همچنین جهت‌های بحرانی اصلی درزه‌ها در هر شیب مشخص شدند. بنابراین امکان این به وجود آمد که جهت‌های اصلی ناپایداری (که شامل سطوح ناپیوستگی موازی با جهت گسل‌ها هستند) و جهت‌های ناپایداری فرعی یا جزئی (شامل سایر دسته‌درزه‌ها) تعیین شوند. بنابراین در رده‌بندی‌ها از تعداد دسته‌درزه‌های اصلی و جهت‌های اصلی ناپایداری استفاده شد، بدین ترتیب که رده‌های بالاتر به تعداد بیشتر دسته‌ها یا جهت‌های ناپایداری نسبت داده شد.

### ۵-۴-۶- بازشدگی، تداوم و فاصله‌داری درزه‌ها

برای این پارامترها، پس از برداشت تمام شیب‌های سنگی مورد مطالعه، میانگین تعداد آنها منظور شده است. برای فاصله‌داری، کلاس‌های بالاتر به مقادیر کمتر پارامتر اختصاص یافته است، ولی برای بازشدگی و تداوم عکس این حالت در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از خط برداشت<sup>۸۶</sup> در نظر گرفته شده در نمایی طبیعی بر روی شیب (ایستگاه) شماره ۷ در شکل ۵-۴ قابل مشاهده است.

<sup>86</sup> Scanline



شکل ۵-۴- نمای از خط برداشت در نظر گرفته شده بر روی شیب سنگی (ایستگاه) شماره ۷

#### ۵-۴-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها

در مورد شیب‌های سنگی منطقه، مقدار مشخصه پارامترهای چسبندگی ( $c$ ) و زاویه اصطکاک ( $\phi$ ) برای درزه‌ها تعیین گردید (نتایج مربوط به آزمایشات به طور کامل در پیوست الف آمده است). برای رسیدن به یک پارامتر واحد، با استفاده از معیار مقاومت برشی برای درزه‌های سنگی انتخاب شده و مقاومت برشی حداکثر ( $\tau_p$ ) درزه‌ها در تنش قائم ( $\sigma_n$ ) یکسان به دست آمد. رابطه بین مقاومت برشی حداکثر ( $\tau_p$ ) و تنش عمودی ( $\sigma_n$ ) را می‌توان به صورت معادله مور-کولمب<sup>۸۷</sup> نمایش داد:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (۵-۱)$$

در منوهای رده‌بندی، رده‌های بالاتر به مقاومت‌های برشی پایین‌تر اختصاص یافته است.

<sup>87</sup> Mohr-Culomb

### ۵-۴-۸- شرایط هیدرولیکی

به دلیل این که سطح ایستابی آب زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه مشخص نبود، شرایط ظاهری درزه‌ها به عنوان مسیرهای ترجیحی آب در نظر گرفته شد. بنابراین تشریح کیفی خصوصیات هیدرولیکی با توجه به روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) برای درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها با صفر برای درزه‌های خشک، یک برای درزه‌های مرطوب و دو برای درزه‌های دارای جریان قابل توجه آب اختصاص یافت.

### ۵-۴-۹- ابعاد و زاویه شیب‌ها

این پارامترها پس از اندازه‌گیری دقیق شیب‌های منطقه رده‌بندی شدند. شیب‌هایی با ارتفاع کمتر از ۳ تا ۴ متر و با زاویه کمتر از ۴۵ تا ۵۰ درجه در منطقه دیده نشد، از این رو در رده‌بندی‌ها نیز این مقادیر در نظر گرفته شدند. مقادیر بیشتر به کلاس‌های بالاتر و معرف ناپایداری بیشتر اختصاص یافت.

### ۵-۴-۱۰- میزان بارندگی و یخ‌زدگی و آب شدن



به دلیل این که تمام شیب‌های سنگی مورد مطالعه از شرایط آب و هوایی یکسانی برخوردارند، رده‌بندی‌های یکسانی را از نظر میزان بارندگی و تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن کسب خواهند کرد. با این حال، منوهای رده‌بندی به گونه‌ای کلاس‌بندی شده‌اند که بتوانند تغییرات نهایی در شرایط جوی محیط را در نظر گرفته و تأثیر آن را بر پتانسیل ناپایداری منعکس کنند. برای پارامتر بارندگی، میزان سالیانه و برای پارامتر یخ‌زدگی و آب شدن، تعداد چرخه‌ها در سال با توجه به تغییرات دمایی در طول فصول مختلف در نظر گرفته شده است. با افزایش این مقادیر، رده‌بندی‌ها به کلاس‌های ناپایدارتر تخصیص می‌یابند.

## ۵-۵- رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه از نظر میزان ناپایداری

با توجه به هیستوگرام شدت اثر متقابل در قسمت‌های قبل (شکل ۵-۲) می‌توان دریافت که امکان حذف هیچ یک از پارامترها وجود ندارد و هر ۱۶ پارامتر تأثیرگذار در منطقه بایستی در محاسبه میزان ناپایداری‌ها در نظر گرفته شوند. جزئیات مربوط به محاسبه ناپایداری شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه در جدول ۵-۱ آورده شده است. در ردیف‌های انتهایی انتهایی جدول، مقادیر C+E و مقادیر نرمالایزشده آن به جمع کل قابل مشاهده‌اند. در ردیف آخر این جدول،  $a_i$  به عنوان ضریب وزنی هر پارامتر آورده شده است که حاصل مقیاس‌بندی مقدار نرمالایزشده قبلی با حداکثر رتبه هر پارامتر در منوهای رده‌بندی ( $MP_{ij}$ ) است.

$$a_i = \frac{1}{MP_{ij}} \times \frac{(C + E)}{\sum_i (C + E)} \% \quad (۵-۱)$$

به این ترتیب می‌توان اندیس ناپایداری شیب‌ها ( $SII^{88}$ ) را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$SII_j = \sum_{i=1}^{16} a_i \times P_{ij} \quad (2-5)$$

در این روابط،  $i$  مربوط به پارامترها (از ۱ تا ۱۶) و  $j$  مربوط به شیب‌ها (از ۱ تا ۱۵) و  $P_{ij}$  رتبه داده شده به هر پارامتر در هر کلاس از منوی رده‌بندی با توجه به شرایط آن است. حداکثر مقدار  $SII$  نیز عدد ۱۰۰ می‌باشد.

پس از محاسبه پارامترهای تعریف شده، اندیس ناپایداری هر شیب ( $SII$ ) به دست آمده و بدین ترتیب شیب‌های منطقه از نظر میزان ناپایداری ارزیابی و رده‌بندی می‌شوند. جدول ۳-۵ رده‌بندی هر پارامتر در شیب‌های مختلف، ضرایب وزنی پارامترها و در نهایت اندیس محاسبه شده برای هر شیب سنگی را نشان می‌دهد.

<sup>88</sup> Slope Instability Index

جدول ۵-۳- رده‌بندی شیب‌های سنگی

|                                 | Parameters rating |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | SII <sub>j</sub> |
|---------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                                 | P <sub>1</sub>    | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> | P <sub>5</sub> | P <sub>6</sub> | P <sub>7</sub> | P <sub>8</sub> | P <sub>9</sub> | P <sub>10</sub> | P <sub>11</sub> | P <sub>12</sub> | P <sub>13</sub> | P <sub>14</sub> | P <sub>15</sub> | P <sub>16</sub> |                  |
| Slopes                          |                   |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                  |
| 1                               | 0                 | 1              | 1              | 1              | 2              | 1              | 0              | 1              | 1              | 2               | 0               | 0               | 1               | 2               | 1               | 1               | 45.841           |
| 2                               | 1                 | 1              | 2              | 1              | 2              | 1              | 1              | 0              | 1              | 2               | 0               | 0               | 0               | 2               | 1               | 1               | 50.851           |
| 3                               | 1                 | 1              | 2              | 2              | 2              | 2              | 1              | 1              | 2              | 2               | 0               | 0               | 0               | 2               | 1               | 1               | 62.571           |
| 4                               | 1                 | 2              | 1              | 1              | 2              | 1              | 1              | 1              | 2              | 1               | 0               | 0               | 0               | 2               | 1               | 1               | 53.497           |
| 5                               | 0                 | 0              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 0              | 1               | 0               | 0               | 1               | 2               | 1               | 1               | 25.992           |
| 6                               | 1                 | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 0              | 0              | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               | 32.042           |
| 7                               | 0                 | 1              | 2              | 0              | 1              | 2              | 1              | 1              | 0              | 2               | 1               | 0               | 2               | 2               | 1               | 1               | 53.686           |
| 8                               | 1                 | 1              | 2              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 2              | 2               | 0               | 0               | 0               | 2               | 1               | 1               | 52.079           |
| 9                               | 1                 | 2              | 2              | 1              | 2              | 2              | 1              | 1              | 1              | 2               | 0               | 0               | 1               | 2               | 1               | 1               | 63.611           |
| 10                              | 1                 | 2              | 2              | 1              | 2              | 2              | 1              | 0              | 2              | 2               | 0               | 0               | 1               | 2               | 1               | 1               | 63.705           |
| 11                              | 2                 | 2              | 2              | 2              | 2              | 1              | 0              | 0              | 2              | 1               | 1               | 0               | 2               | 2               | 1               | 1               | 66.352           |
| 12                              | 1                 | 1              | 1              | 2              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1               | 1               | 0               | 1               | 2               | 1               | 1               | 46.975           |
| 13                              | 2                 | 0              | 0              | 2              | 1              | 1              | 1              | 1              | 2              | 1               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               | 41.682           |
| 14                              | 1                 | 1              | 0              | 2              | 1              | 2              | 1              | 1              | 1              | 1               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               | 1               | 44.612           |
| 15                              | 1                 | 1              | 1              | 2              | 2              | 2              | 1              | 0              | 1              | 2               | 1               | 0               | 1               | 2               | 1               | 1               | 55.482           |
| Max P <sub>ij</sub>             | 2                 | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2               | 2               | 2               | 2               | 2               | 2               | 2               |                  |
| $\frac{(C+E)}{\sum_i (C+E)} \%$ | 5.860             | 7.750          | 11.342         | 3.969          | 6.427          | 5.293          | 5.293          | 6.994          | 7.183          | 5.293           | 5.860           | 8.696           | 5.482           | 5.671           | 3.024           | 5.860           | 100              |
| $a_i$                           | 2.930             | 3.875          | 5.671          | 1.985          | 3.214          | 2.646          | 2.646          | 3.497          | 3.592          | 2.646           | 2.930           | 4.348           | 2.741           | 2.836           | 1.512           | 2.930           |                  |

پس از به دست آوردن اندیس‌های ناپایداری برای هر شیب سنگی مورد مطالعه، می‌توان آنها را برحسب محدوده مقدار اندیس‌ها کلاس‌بندی کرد. این کلاس‌بندی پیشنهادی برای شرایط حاضر در جدول ۴-۵ آورده شده است.

جدول ۴-۵- کلاس‌بندی پیشنهادی برای شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه

| محدوده اندیس ناپایداری | کلاس     | وضعیت پایداری   |
|------------------------|----------|-----------------|
| $SII < 30$             | خیلی خوب | کاملاً پایدار   |
| $30 < SII < 40$        | خوب      | پایدار          |
| $40 < SII < 50$        | متوسط    | تاحدی ناپایدار  |
| $50 < SII < 60$        | بد       | ناپایدار        |
| $SII > 60$             | خیلی بد  | کاملاً ناپایدار |

با توجه به کلاس‌بندی ارائه شده، می‌توان شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه را رده‌بندی کرد. از تعداد ۱۵ شیب مورد مطالعه، ۴ شیب در کلاس کاملاً ناپایدار، ۵ شیب ناپایدار، ۴ شیب تاحدی ناپایدار، یک شیب پایدار و یک شیب نیز کاملاً پایدار کلاس‌بندی می‌شوند.

در نهایت جدول ۵-۵ اندیس‌های ناپایداری، کلاس‌های اختصاص‌یافته و وضعیت پایداری تعیین شده برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۵- رده‌بندی نهایی به دست آمده برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه

| شماره شیب سنگی | اندیس ناپایداری (SII) | کلاس اختصاص یافته | وضعیت پایداری   |
|----------------|-----------------------|-------------------|-----------------|
| S1             | 45.841                | متوسط             | تاحدی ناپایدار  |
| S2             | 50.851                | بد                | ناپایدار        |
| S3             | 62.571                | خیلی بد           | کاملاً ناپایدار |
| S4             | 53.497                | بد                | ناپایدار        |
| S5             | 25.992                | خیلی خوب          | کاملاً پایدار   |
| S6             | 32.042                | خوب               | پایدار          |
| S7             | 53.686                | بد                | ناپایدار        |
| S8             | 52.079                | بد                | ناپایدار        |
| S9             | 63.611                | خیلی بد           | کاملاً ناپایدار |
| S10            | 63.705                | خیلی بد           | کاملاً ناپایدار |
| S11            | 66.352                | خیلی بد           | کاملاً ناپایدار |
| S12            | 46.975                | متوسط             | تاحدی ناپایدار  |
| S13            | 41.682                | متوسط             | تاحدی ناپایدار  |
| S14            | 44.612                | متوسط             | تاحدی ناپایدار  |
| S15            | 55.482                | بد                | ناپایدار        |

## ۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بسیاری از فعالیت‌های مرتبط با مهندسی سنگ نیاز به ایجاد برش‌هایی در سنگ به نام شیب‌های سنگی دارند. پروژه‌هایی نظیر سیستم‌های حمل و نقل شامل بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی، سدها و نیروگاه‌های برق‌آبی و پروژه‌های حفاری صنعتی و شهری از این دست می‌باشند. همچنین معادن روباز بخش قابل توجهی از تولید مواد معدنی را در جهان تشکیل می‌دهند که به صورت ذاتی شکل‌گیری چنین معادنی با ایجاد شیب‌های سنگی امکان‌پذیر است. علاوه بر چنین حفاری‌های مصنوعی، در مناطق کوهستانی پایداری شیب‌های سنگی

طبیعی بسیار مورد توجه می‌باشد. به عنوان مثال، بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی واقع در دره‌ها معمولاً در پایین دست چین شیب‌هایی قرار گرفته‌اند. وقوع شکست در شیب‌های سنگی می‌تواند شامل سقوط سنگ، ناپایداری کل شیب و در نتیجه وقوع زمین لغزش و نیز شکست در شیب‌های معادن روباز باشد. عواقب چین شکست‌هایی با توجه به نوع و محل پروژه متفاوت بوده و گاهی می‌تواند از نظرات اقتصادی و یا جانی لطمت جبران‌ناپذیری وارد نماید.

تحلیل پایداری شیب‌های سنگی عموماً به منظور ارزیابی یک طراحی ایمن و اجرایی برای شیب‌های مصنوعی نظیر شیب‌های جاده‌ها و یا معادن روباز و نیز آنالیز شرایط تعادلی شیب‌های طبیعی به کار می‌رود. انتخاب رویکرد قابل استفاده در هر مورد به نوع و شرایط سایت و نوع شکست احتمالی بستگی دارد که در عین حال عواملی همچون تغییر در شرایط مقاومتی مواد و محدودیت‌های ذاتی رویکردها و روش‌های تحلیل پایداری بایستی مد نظر قرار گیرد.

از میان پروژه‌های مختلف اشاره شده مرتبط با شیب‌های سنگی، وجود ناپایداری‌های دامنه‌ای مشرف به جاده‌ها یکی از خطراتی است که معابر کوهستانی همواره با آن روبرو هستند. جاده شاهرود- آزادشهر به عنوان جاده اصلی ارتباطی بین استان‌های سمنان و گلستان از نمونه‌هایی است که در معرض جدی چنین خطراتی می‌باشد. شیروانی‌های سنگی متعدد این منطقه به دلایل مختلف دارای پتانسیل ریزش بالایی هستند که همه ساله باعث ایجاد حوادث و اختلال در سیستم حمل و نقل جاده‌ای می‌شوند. بنابراین اطلاع از شرایط، پتانسیل ریزش و نیز میزان پایداری شیروانی‌ها با هدف تحکیم و پایدارسازی آن‌ها بسیار ضروری می‌نماید. علیرغم این خطر، فعالیت‌های انجام شده در جهت ایمن‌سازی منطقه و گردنه‌ها بسیار محدود بوده است. با توجه به وجود

عوامل تأثیرگذار بسیار متعدد در منطقه که همگی به نحوی در پایداری شیب‌های سنگی مورد مطالعه دخیل بودند، تشخیص داده شد که به جای استفاده از روش‌های سنتی تحلیل پایداری شیب‌ها، از رویکرد سیستمی به این منظور بهره گرفته شود. برای این هدف، رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) انتخاب شده و ادامه کار بر مبنای الزامات این روش بنا نهاده شد. امروزه رویکرد RES به عنوان یک روش سیستمی در تحلیل‌ها و رده‌بندی‌های پروژه‌های پیچیده مهندسی سنگ مطرح می‌باشد. در این رویکرد، تأثیر متقابل پارامترهای موثر بر یکدیگر در مقیاسی برابر سنجیده شده و بدین ترتیب اثر هر پارامتر در میزان تولید ناپایداری مورد توجه قرار می‌گیرد. به همین دلیل، رده‌بندی‌های حاصل از این روش بسیار قابل اطمینان بوده و نمایی کامل از وضعیت منطقه ارائه می‌گردد.

بدین ترتیب در این تحقیق، پس از انجام بازدیدها از منطقه مورد مطالعه و بررسی شرایط محیطی، تعیین ایستگاه‌ها و سنجش وضعیت شیب‌های سنگی، مهمترین پارامترهای موثر بر ایجاد ناپایداری در آنها (۱۶ پارامتر) انتخاب شدند. سپس با تشکیل ماتریس تأثیر متقابل با استفاده از این پارامترها برای شیب‌های منطقه و شناسایی تأثیر هر جفت از پارامترها بر روی یکدیگر، این ماتریس کدگذاری شدند. به این صورت تأثیر نسبی هر پارامتر بر سیستم و بالعکس به صورت عددی محاسبه شد. در این میان پارامترهایی از قبیل ناپایداری پیشین، ناپایداری بالقوه، شرایط هیدرولیکی و تا حدی گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها بیشترین اندرکنش را در سیستم داشتند. با تشکیل منوهای رده‌بندی، هر پارامتر به صورت کمی یا کیفی کلاس‌بندی شده و سپس اندیس ناپایداری به صورت فرمول ریاضی برای منطقه تعیین شد. با توجه به شرایط شیب‌های سنگی در هر ایستگاه و به دست آوردن داده‌های مربوط به خواص مکانیکی سنگ‌ها، درزه‌های سنگی و شرایط حاکم بر

منطقه، اندیس‌های خاص هر شیب سنگی مورد محاسبه قرار گرفت. بدین ترتیب رده‌بندی جامعی از ایستگاه‌ها و در نتیجه شیب‌های منطقه ارائه گردید. طی این رده‌بندی، شیب‌های سنگی مورد مطالعه در کلاس‌های نهایی وضعیت پایداری شامل کاملاً ناپایدار، ناپایدار، تاحدی پایدار، پایدار و کاملاً پایدار قرار گرفته و وضعیت آنها در این کلاس‌بندی تعیین گردید.

جدول الف-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های سنگی مربوط به ۱۵ شیب مورد مطالعه

| Slope No. | Specimen No. | Dry Specific Weight<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | UCS<br>(MPa) |
|-----------|--------------|---------------------------------------------|--------------|
| S1        | A-1-1        | 26.5                                        | 37.5         |
|           | A-1-2        | 26.5                                        | 42.7         |
| S2        | A-2-1        | 26.8                                        | 28.2         |
|           | A-2-2        | 26.8                                        | 33.5         |
| S3        | A-3-1        | 27.4                                        | 25.9         |
|           | A-3-2        | 27.4                                        | 23.2         |
| S4        | A-4-1        | 26.1                                        | 34.1         |
|           | A-4-2        | 26.1                                        | 31.6         |
| S5        | A-5-1        | 26.7                                        | 48.5         |
|           | A-5-2        | 26.7                                        | 38.3         |
| S6        | A-6-1        | 26.9                                        | 38.9         |
|           | A-6-2        | 26.9                                        | 35.1         |
| S7        | A-7-1        | 26.7                                        | 56.2         |
|           | A-7-2        | 26.7                                        | 47.5         |
| S8        | A-8-1        | 27.1                                        | 52.9         |
|           | A-8-2        | 27.1                                        | 44.7         |
| S9        | A-9-1        | 27.6                                        | 41.3         |
|           | A-9-2        | 27.6                                        | 38.2         |
| S10       | A-10-1       | 26.4                                        | 29.5         |
|           | A-10-2       | 26.4                                        | 31.1         |
| S11       | A-11-1       | 27.4                                        | 18.8         |
|           | A-11-2       | 27.4                                        | 15.5         |
| S12       | A-12-1       | 26.9                                        | 29.5         |
|           | A-12-2       | 26.9                                        | 27.5         |
| S13       | A-13-1       | 27.3                                        | 22.7         |
|           | A-13-2       | 27.3                                        | 19.1         |
| S14       | A-14-1       | 27.3                                        | 24.4         |
|           | A-14-2       | 27.3                                        | 15.6         |
| S15       | A-15-1       | 26.1                                        | 23.8         |
|           | A-15-2       | 26.1                                        | 35.2         |



جدول الف-۲- نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی درزه‌های سنگی مربوط به ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه؛ پارامترهای  
موهر- کولمب

| Slope No. | Specimen No. | C (kPa) | $\phi$ (°) | Max. Shear Strength (MPa)<br>under Normal Load= 1 MPa |
|-----------|--------------|---------|------------|-------------------------------------------------------|
| S1        | A-1          | 600     | 32         | 1.22                                                  |
| S2        | A-2          | 750     | 29         | 1.3                                                   |
| S3        | A-3          | 620     | 31         | 1.22                                                  |
| S4        | A-4          | 950     | 33         | 1.59                                                  |
| S5        | A-5          | 670     | 25         | 1.14                                                  |
| S6        | A-6          | 470     | 27         | 0.98                                                  |
| S7        | A-7          | 380     | 29         | 0.93                                                  |
| S8        | A-8          | 620     | 30         | 1.19                                                  |
| S9        | A-9          | 510     | 27         | 1.02                                                  |
| S10       | A-10         | 670     | 26         | 1.16                                                  |
| S11       | A-11         | 520     | 23         | 0.94                                                  |
| S12       | A-12         | 410     | 27         | 0.92                                                  |
| S13       | A-13         | 560     | 30         | 1.14                                                  |
| S14       | A-14         | 420     | 24         | 0.86                                                  |
| S15       | A-15         | 470     | 26         | 0.96                                                  |

جدول الف-۳- اطلاعات مربوط به خطوط برداشت درزه‌های سنگی بر روی ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه

| Slope No. | Weathering      | Joint Sets Number | Joints Orientation <sup>۱</sup> | Joints Aperture (mm) | Joints Persistence (m) | Joints Spacing (m) |
|-----------|-----------------|-------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------|
| S1        | Severe          | 2                 | 1                               | 16                   | 6.5                    | 0.12               |
| S2        | Severe          | 3                 | 2                               | 9                    | 8.2                    | 0.08               |
| S3        | Severe          | 4                 | 3                               | 22                   | 12.1                   | 0.14               |
| S4        | Severe          | 3                 | 2                               | 19                   | 13.5                   | 0.28               |
| S5        | Change in color | 3                 | 2                               | 8                    | 4.3                    | 0.23               |
| S6        | Change in color | 2                 | 1                               | 7                    | 2.7                    | 0.20               |
| S7        | Change in color | 5                 | 3                               | 11                   | 4.5                    | 0.05               |
| S8        | Change in color | 2                 | 1                               | 18                   | 12.1                   | 0.12               |
| S9        | Severe          | 4                 | 3                               | 12                   | 5.6                    | 0.05               |
| S10       | Severe          | 4                 | 2                               | 7                    | 16.7                   | 0.03               |
| S11       | Severe          | 3                 | 1                               | 6                    | 11.4                   | 0.18               |
| S12       | Change in color | 3                 | 2                               | 9                    | 7.9                    | 0.15               |
| S13       | Change in color | 2                 | 2                               | 11                   | 11.2                   | 0.30               |
| S14       | Change in color | 4                 | 3                               | 10                   | 8.5                    | 0.27               |
| S15       | Severe          | 4                 | 2                               | 8                    | 7                      | 0.13               |

<sup>۱</sup> Number of joints oriented in the major faulting

جدول الف-۴- پارامترهای حاکم محیطی در ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه

| Slope No. | Lithology             | Faults & Folds | Previous Instability | Hydraulic Conditions | Slope Height (m) | Slope Angle (°) |
|-----------|-----------------------|----------------|----------------------|----------------------|------------------|-----------------|
| S1        | Sandstone             | Minor          | Quiescent            | Dry                  | 5.5              | 82              |
| S2        | Sandstone & Limestone | Minor          | Active               | Dry                  | 4.3              | 78              |
| S3        | Sandstone & Limestone | Minor          | Active               | Dry                  | 4.2              | 85              |
| S4        | Sandstone & Limestone | Major          | Quiescent            | Dry                  | 3.5              | 84              |
| S5        | Sandstone             | No             | Inactive             | Dry                  | 6.1              | 79              |
| S6        | Sandstone & Limestone | No             | Quiescent            | Dry                  | 14.2             | 73              |
| S7        | Sandstone             | Minor          | Active               | Dry                  | 19.5             | 79              |
| S8        | Sandstone & Limestone | Minor          | Active               | Dry                  | 4.8              | 76              |
| S9        | Sandstone & Limestone | Major          | Active               | Dry                  | 5.1              | 85              |
| S10       | Sandstone & Limestone | Major          | Active               | Dry                  | 12.5             | 81              |
| S11       | Limestone             | Major          | Active               | Dry                  | 17.4             | 78              |
| S12       | Sandstone & Limestone | Minor          | Quiescent            | Dry                  | 7.3              | 81              |
| S13       | Limestone             | No             | Inactive             | Dry                  | 5.4              | 73              |
| S14       | Sandstone & Limestone | Minor          | Inactive             | Dry                  | 11.5             | 67              |
| S15       | Sandstone & Limestone | Minor          | Quiescent            | Dry                  | 13.2             | 77              |

اداره کل آمار و فناوری اطلاعات، ۱۳۸۵-۱۳۷۵. *سالنامه آماری هواشناسی*. ناشر سازمان هواشناسی کشور.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰. *نقشه زمین‌شناسی منطقه خوش‌بیلاق*.

صادقی، م.، رسولی، و. ۱۳۸۴. کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ در تحلیل پایداری شیروانی و پیشنهاد

الگوی بهینه پایدارسازی. *نشریه /میرکبیر ۶۲ (ج)، ص. ۸۵-۹۲*.

مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰. *اطلس راه‌های ایران*. مؤسسه جغرافیایی، کارتوگرافی و گیتاشناسی.

Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. & Boyce, G.M. 2001. *Slope stability and stabilization methods*. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 712 p.

- Ali, K.M. & Hasan, K. 2002. Rock mass Characterization to indicate slope instability in Bandarban: a rock engineering systems approach. *Environmental and Engineering Geoscience* 8(2), pp. 105-119.
- Allenby, B.R. 1999. Industrial ecology-policy framework and implementation. *Complex Systems and Risks, Costs and Benefits*, Chapters 9 and 10, pp. 132-162.
- Anderiux, P. & Hadjigeorgiou, J. 2008. The distressability index methodology for the assessment of the likelihood of success of a large-scale confined distress blast in an underground mine pillar. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45(3), pp. 407-421.
- Aryal, K.P. 2006. *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods*. Doctoral Thesis, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, NTNU, Trondheim, Norway, 124 p.
- Avila, R. & Moberg, L. 1999. A systematic approach to the migration of  $^{137}\text{Cs}$  in forest ecosystems using interaction matrices. *Environmental Radioactivity* 45, pp. 271-282.
- Benardos, A.G. & Kaliampakos, D.C. 2004. A methodology for assessing geotechnical hazards for TBM tunneling- Illustrated by the Athens Metro, Greece. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(6), pp. 987-999.
- Bendz, D., Flyhammer, P., Hartlen, J. & Elert, M. 2005. Leaching from residues used in road constructions— a system analysis. *The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 5F*, Springer Berlin: Heidelberg, pp. 293-320.

- Bertalanffy, L.V. 1968. *General system theory- foundations, development, applications*. George Braziller Publisher, NY, 295 p.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York, Wiley.
- Bishop, A.W. 1955. The use of slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5(1), pp. 7-17.
- Budetta, P., Santo, A., Vivenzio, F. 2008. Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology* 94, pp. 340-352.
- Call, R.D. 1982. Monitoring pit slope behavior. In: *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Stability in Surface Mining*, Vancouver, Canada, pp. 229-248.
- Call, R.D., & Savely, J.P. 1990. Open pit rock mechanics. In: *Surface Mining, 2<sup>nd</sup> Edition*, Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc., pp. 860-882.
- Call, R.D., Ryan, T.M. & Barkely, R.C. 1993. Geotechnical analyses for open pit mining in areas of large-scale slope instability. In: *Innovative Mine Design for the 21<sup>st</sup> Century*, Kingston, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 45-56.
- Canadian Geotechnical Society, 1992. *Canadian foundation engineering manual*. BiTech Publishers Ltd, Vancouver, Canada.
- Castaldini, D., Genevois, R., Panizza, M., Puccinelli, A., Berti, M. & Simoni A. 1998. An integrated approach for analyzing earthquake-induced surface effects: a case study from the Northern Apennins, Italy. *Journal of Geodynamics* 26(2-4), pp. 413-441.

- Ceryan N. & Ceryan S. 2008. An application of the interaction matrices method for slope failure susceptibility zoning: Dogankent settlement area (Giresun, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67(3), pp. 375-385.
- Chen Z. 1995. Recent developments in slope stability analysis. In: *Proceedings of the 8th international congress ISRM*, Tokyo, pp. 1041–1048.
- Chowdhury, R.N. 1978. *Slope Analysis. Developments in geotechnical engineering*. Volume 22. Elsevier, New York, 423 p.
- Coggan, J.S., Stead, D. & Eyre, J.M. 1998. Evaluation of techniques for quarry slope stability assessment. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy- Section B* 107, pp. B139-B147.
- Davies, J.P., Clarke, B.A., Ockleston, G.O., Whiter, J.T. & Cunningham, R.J. 1999. Application of interaction matrices to the problem of sewer collapse. In: *Proceedings of the 11th European Sewage and Refuse Symposium*, Liquid Wastes Section, Munich, pp. 11.
- De Pippo, T., Donadio, C., Pennetta, M., Petrosino, C., Terlizzi, F. & Valente A. 2008. Coastal hazard assessment and mapping in Northern Campania, Italy. *Geomorphology* 97, pp. 451–466.
- Eberhardt, E. 2003. *Rock slope stability analysis- utilization of advanced numerical techniques*. Earth and Ocean Sciences at UBC Report, University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canada, 41 p.

- El-Ramly, H., Morgenstern, N.R. & Cruden D.M. 2002. Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal* 39, pp. 665-683.
- Hack, R., Price, D. & Rengers, N. 2003. A new approach to rock slope stability-a probability classification (SSPC). *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 62, pp. 167-184.
- Hill, J.D. & Warfield, J.N. 1972. Unified program planning. In: *System Engineering: Methodology and Applications* Edited by A.P. Sage (1977), IEEE Press, New York, NY.
- Hoek, E. & Bray, J.W. 1981. *Rock slope engineering*. Third Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 p.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Balkema.
- Hudson, J.A. 1991. Atlas of rock engineering mechanisms: Underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 28(6), pp. 523-526.
- Hudson, J.A. 1992. *Rock Engineering Systems, Theory and Practice*. Ellis Horwood Ltd., Chichester. 185 p.
- Hudson, J.A. & Harrison, J.P. 1992. A new approach to studying complete rock engineering problems. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 25, pp. 93-105.
- Hudson, J.A., Sheng, J. & Arnold, P.N. 1992. Rock engineering risk assessment through critical mechanism and parameters evaluation. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Australia- New Zealand Conference on Geomechanics*, Christchurch: NZGS, pp. 442-447.

- Hudson, J.A. & Harrison, J.P. 1997. *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier Science: Oxford, 444 p.
- ISRM 1981. *Rock characterization, testing and monitoring- Suggested methods, Part 1: Site characterization*, Brown, E.T. (ed.), Pergamon.
- Janbu, N. 1968. *Slope stability computations*. Soil Mechanics and Foundation Engineering Report, Technical University of Norway, Trondheim, Norway.
- Jiao, Y. 1995. *Formalizing the systems approach to rock engineering*. PhD Thesis, Imperial College, University of London, 326 p.
- Latham, J.-P. & Lu, P. 1999. Development of an assessment system for the blastability of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, pp. 41-55.
- Little, M.J. 2007. Slope monitoring strategy at Pprust open pit operation. In: *Proceedings of the International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Perth, Western Australia, Australia, pp. 211-230.
- Lu, P. & Rosenbaum, M. 2001. Determining the importance of factors affecting a ground-foundation system using artificial neural network and systems methodologies. In: *Proceedings of the sixth international conference on Application of artificial intelligence to civil & structural engineering*, Stirling, Scotland, pp. 73-74.
- Martin, D.C. & Mehr, E.F. 1993. Assessment of slope deformation and deep seated instability in the Cassiar Open Pit. *CIM Bulletin* 86, No. 972, pp. 58-67.



- Matthews, M. & Lloyd, B.J. 1998. *The river test catchment surveillance project*. South Water Utilities Final Research Report. Department of Civil Engineering, University of Surrey, UK, 101 p.
- Mavroulidou, M., Hughes, S.J. & Hellawell, E.E. 2004. A qualitative tool combining an interaction matrix and a GIS, to map vulnerability to traffic induced air pollution. *Journal of Environmental Management* 70 (4), 283–289.
- Mavroulidou, M., Hughes, S.J. & Hellawell, E.E. 2005. The development of a GIS-based tool for urban air quality assessment. In: *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, 6 p.
- Mavroulidou, M., Hughes, S.J. & Hellawell, E.E. 2007. Developing the interaction matrix technique as a tool assessing the impact of traffic on air quality. *Journal of Environmental Management* 84, pp. 513–522.
- Mazzoccola, D.F. & Hudson, J.A. 1996. A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 29, pp. 37–56.
- Mears, N.H. 2000. *High Way Rock Cut Stability Assessment in Rock Masses Not Conducive to Stability Calculation*. proceeding of the 51st annual high way geology symposium, Seattle, Washington, pp. 249-259.
- Nicholson, D.T. 2002. Identification of deterioration hazard potential for quarried rockslopes. *Quarry Manage* 29(1), 43-52.

- Pantelidis, L. 2008. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, doi:10.1016/j.ijrmms.2008.06.003.
- Rapoport, A. 1968. *General system theory- essential concept and application*. Abacus Press, Cambridge.
- Read, J. 2005. *Large open pit slope stability*. Research Report, Purdue Geotechnical Society, CSIRO, Australia.
- Robertson A.M. 1988. Estimating weak rock strength. In: *Proceedings of the SME annual meeting*, Phoenix, pp. 1-5.
- Rocscience, 2002. DIPS: Plotting, Analysis and Presentation of Structural Data Using Spherical Projection Techniques (Version 5.1). Rocscience Inc., Toronto, Canada.
- Romana, M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: *Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics*, Zacatecas, Mexico, pp. 49-53.
- Ross-Brown, D.M. 1972. *Design considerations for excavated mine slopes in hard rock*. Research Report No. 21, Departments of Civil Engineering, Geology and Mining and Mineral Technology. London: Imperial College of Science and Technology, 21 p.
- Rozos, D., Pyrgiotis, L., Skias, S. & Tsagaratos, P. 2008. An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County. *Landslides* 5(3), pp. 261-270.

- Sarma, S.K. 1973. Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique* 23, pp. 423-433.
- Selby, M.J. 1980. A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zeland. *Zeit. Geomorph.* 24(1), pp. 31-51.
- Shang, Y.J., Wang, S.J., Li, G.C. & Yang, Z.F. 2000. Retrospective case example using a comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan-Ling power station, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37, pp. 839-853.
- Shang, Y., Park, H.D. & Yang, Z. 2005. Engineering geological zonation using interaction matrix of geological factors: An example from one section of Sichuan-Tibet Highway. *Geosciences Journal* 9(4), pp. 375-387.
- Sharma, S., Raghuvanshi, T.K. & Anbalagan, R. 1995. Plane failure analysis of rock slopes. *Geotechnical and Geological Engineering* 13(2), pp. 105-111.
- Shin, H.S., Kwon, Y.C., Jung, Y.S., Bae, G.J. & Kim, Y.G. 2009. Methodology for quantitative hazard assessment for tunnel collapses based on case histories in Korea. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, doi:10.1016/j.ijrmms.2009.02.009.
- Singh A. & Connolly M. 2003. VRFSR-an empirical method for determining volcanic rock excavation safety on construction sites. *J. Div. Civ. Eng. Inst. Eng. (India)* 84, pp. 176-191.
- Singh A. 2004. FRHI-a system to evaluate and mitigate rockfall hazard in stable rock excavations. *J. Div. Civ. Eng. Inst. Eng. (India)* 85, pp. 62-75.

- Sjoberg, J. 1999. *Large scale slope stability in open pit mining- a review*. Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, 790 p.
- Skagius, K., Wiborgh, M., Strom, A. & Moren, L. 1997. Performance assessment of the geosphere barrier of a deep geological repository for spent fuel- The use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of features, events and processes. *Nuclear Engineering and Design* 176, 155–162.
- Smith, G.J. 1994. *The engineering geological assessment of shallow mine workings with particular reference to chalk*. PhD Thesis, University of London.
- Stead, D. & Eberhardt, E. 1997. Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining. *Engineering Geology* 46(1), pp. 41-61.
- Terzaghi, R. & Peck, R. 1967. *Soil Mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1970. *Engineering and design- stability of earth and rockfill dams*. Engineer Manual EM 1110-2-1902, Department of the Army, Corps of Engineers, Washington, DC.
- Van Dorp, F., Egan, M., Kessler, J.H., Nilsson, S., Pinedo, P., Smith, G. & Torres C. 1999. Biosphere modeling for the assessment of radioactive waste repositories; the development of a common basis by the BIOMOVs II reference biospheres working group. *Environmental Radioactivity* 42, pp. 225-236.

Wyllie, D.C. & Mah, C.W. 2004. *Rock slope engineering, civil and mining*. 4<sup>th</sup> Edition, Spon Press, Taylor & Francis Group, Great Britain, 431 p.

Young, D.S. 1993. Probabilistic slope analysis for structural failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 30(7), pp. 1623-1629.

Zhang, L.Q., Yang, Z.F., Liao, Q.L. & Chen, J. 2004. An application of the rock engineering systems (RES) methodology in rockfall hazard assessment on the Chengdu-Lhasa highway, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(3), pp. 833-838.