

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

**بهبود رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به منظور ارزیابی
پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز**

مسعود زارع نقدهی

استاد راهنما:

پروفسور رضا کاکایی

اساتید مشاور:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

Dr. Rafael Jiménez

Professor John Hudson

اسفند ۱۳۹۰

به نام خداوند بخشنده و مهربان



دانشگاه صنعتی شاهرود




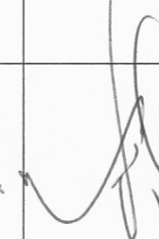

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

رساله دکتری آقای مسعود زارع نقدھی

تحت عنوان: بهبود رویکرد سیستم های مهندسی سنگ (RES) به منظور ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب های سنگی معادن روباز

مورد
در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۱۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری مورد ارزیابی و با درجه
پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: سید محمد اسماعیل جلالی		نام و نام خانوادگی: رضا کاکایی
	نام و نام خانوادگی: John Hudson		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: فرهنگ سرشکی		نام و نام خانوادگی: کوروش شهریار
			نام و نام خانوادگی: ناصر حافظی
			نام و نام خانوادگی: محمد عطایی
			نام و نام خانوادگی: سیدرحمان ترائی

تقدیم به

روح پاک پدرم

و

دستان پرمهر مادر عزیزم

سپاس

راهی بود پر نشیب و فراز، که جز به یاری اطرافیان به فرجام نمی‌انجامید. نام‌ها واژگانند و واژگان محترم؛ پس واژگان را به کمک می‌گیرم تا احترام را به یارانی که در این راه یاری‌ام دادند، ابراز کنم. باشد تا کلام، حق مطلب را ادا کند.

در آغاز از استاد راهنمای فرزانه‌ام جناب آقای پروفیسور کاکایی که وظیفه راهنمایی و نظارت بر مراحل تحقیق را به بهترین نحو به انجام رسانده و از هیچ کمکی دریغ نرمودند، نهایت قدردانی را دارم. از استاد مشاورم جناب آقای دکتر جلالی به دلیل زحمات بسیار و پیشنهاد ایده‌های نو تشکر می‌کنم. همچنین از اساتید مشاور خارجی‌ام آقایان پروفیسور هادسون استاد بازنشسته کالج سلطنتی انگلستان و دکتر خیمیس از دانشگاه پلی‌تکنیک مادرید که راهنمایی‌ها و پشتیبانی‌های ارزشمندی را در تمام مراحل پیش نهادند، سپاسگزاری می‌کنم.

از مسئولین شرکت‌ها و معادن داخلی و خارجی مورد مطالعه در این رساله به دلیل در اختیار گذاشتن اطلاعات و مدارک مورد نیاز کمال سپاسگزاری را دارم. از مسئولین دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک نیز برای کمک‌هایشان قدردانم. همچنین از آقای والتین مسئول آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه پلی‌تکنیک مادرید به خاطر زحمات و همیاری‌هایش قدردانی می‌کنم. از دوستان عزیزم آقایان دکتر حسین میرزایی و دکتر مهرداد سلیمانی نیز به دلیل هم‌اندیشی‌های ارزشمندشان تشکر می‌کنم.

و سرانجام این که، هیچ آغازی به ته نمی‌انجامید مگر در بستری از آرامش و دوستی؛ و این جز در بر رفیق دیرینم بهشاد جدیری که خانواده‌ای بود مرا در نبودشان و یاری‌رسان؛ و نیز خانواده‌ای که بود من از هست ایشان است، محقق نمی‌گشت.

ژرفای راه ما را به سوی ندایی فروهالاند؛ پس گام در راه نهادیم، چرا که راه ما را فرا می‌خواند.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

لیست مقالات مستخرج از رساله

• مجلات

✓ چاپ شده:

1. KhaloKakaie R., Zare Naghadehi M. (2012). The Assessment of Rock Slope Instability along the Khosh-Yeylagh Main Road (Iran) Using a Systems Approach. *Environmental Earth Sciences*; DOI 10.1007/s12665-011-1510-1. "Impact Factor (JCR 2010): 0.678"
2. Zare Naghadehi M., Jiménez R., KhaloKakaie R., Jalali SME. (2011). A Probabilistic Systems Methodology to Analyze the Importance of Factors Affecting the Stability of Rock Slopes. *Engineering Geology* 118, pp. 82-92. "Impact Factor (JCR 2010): 1.442"
3. KhaloKakaie R., Zare Naghadehi M. (2010). Ranking the Rock Slope Instability Potential Using the Interaction Matrix (IM) Technique; A Case Study in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*; DOI 10.1007/s12517-010-0150-1. "Impact Factor (JCR 2010): 0.538"

✓ تحت داوری:

4. Zare Naghadehi M., Jiménez R., KhaloKakaie R., Jalali S.M.E. A New Open-Pit Mine Slope Instability Index Defined Using the Improved Rock Engineering Systems (RES) Approach. *Under Review in: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.

• کنفرانس‌ها

5. Zare Naghadehi M., KhaloKakaie R., Jiménez R., Jalali S.M.E. (2011). Procedures for Improvement of Rock Engineering Systems (RES) Approach to Assess the Rock Slope Instability Potential. IAMG 2011: Mathematical Geosciences at the Crossroads of Theory and Practice, September 5-9, 2011, University of Salzburg, Salzburg, Austria.
6. Zare Naghadehi M., KhaloKakaie R., Jalali S.M.E. (2009). The Application of Systems Theory in Slope Stability Analysis. The 3rd International Scientific Conference of Young Scientists and Students "New Directions of Investigations in Earth Sciences", October 5-6, 2009, Baku, Azerbaijan.

چکیده

امروزه موضوع پایداری شیب‌های سنگی معادن روباز با افزایش روزافزون مقیاس این پروژه‌ها اهمیت بیشتری یافته است. پیچیدگی مکانیزم‌های شکست این شیب‌های بزرگ مقیاس سبب شده است که روش‌های معمول به طور کامل قادر به تحلیل و پیش‌بینی چنین رخدادهایی نباشند. علت اصلی این امر را می‌توان به تعدد پارامترهای کنترل‌کننده پایداری و از طرف دیگر اندرکنش موجود میان این پارامترها ربط داد. برای فائق آمدن بر این مشکل، در این تحقیق یک رویکرد سیستمی معروف بنام رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد توجه قرار گرفته است. در اکثر کاربردهای قبلی این رویکرد، در قسمت تعیین اندرکنش پارامترها از روش کدگذاری سنتی ماتریس اندرکنش استفاده شده است، که این روش قادر به تشریح درست اندرکنش‌ها نبوده و کاملاً جنبه ذهنی و تخمینی دارد. تلاش‌هایی نیز در جهت بهبود رویکرد و تلفیق آن با سایر نظریه‌ها انجام شده است که در عمل کاربرد مهم و چشمگیری از آنها مشاهده نشده است. از این رو در تحقیق حاضر تلاش بر این بوده است که این رویکرد به عنوان اصلی‌ترین رویکرد سیستمی در مهندسی سنگ از طرق مختلف بهبود یابد، به صورتی که قابلیت استفاده در مسائل پایداری شیب‌های معادن روباز را داشته باشد. برای این منظور در مرحله اول، رویکرد RES متداول در یک مسئله کلی پایداری شیب‌های سنگی در منطقه‌ای در شمال شرق ایران مورد استفاده قرار گرفته و نتایج و خروجی‌های این رویکرد سیستمی مشاهده و تحلیل شده‌اند. نتایج به دست آمده با نتایج روش تجربی رده‌بندی شیب‌های سنگی (SMR) در همان منطقه مقایسه شده‌اند که این مقایسه حاکی از تطبیق نسبتاً خوب نتایج دو روش در رده‌بندی پایداری شیب‌های سنگی مهندسی شده بوده است. در مرحله بعد، به عنوان یک ایده جدید و یک بهبود کلی در رویکرد RES، یک روش کدگذاری احتمالاتی ماتریس اندرکنش (PESQ) ارائه شده است که طی آن با اختصاص احتمال‌های متفاوت به مقادیر مختلف کدهای اندرکنش، فرآیند کدگذاری از حالت قطعی خارج شده و بدین ترتیب تمام مراحل رویکرد و در نتیجه

کل سیستم به صورت احتمالاتی در آمده است. در مرحله سوم و به عنوان یکی از سهم‌های اصلی تحقیق رساله، از طریق بهینه‌سازی الگوریتم یک بهبود صورت گرفته قبلی در رویکرد RES شامل استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای کدگذاری غیرذهنی ماتریس اندرکنش، یک شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII) توسعه داده شده است. برای این منظور ۱۸ پارامتر موثر بر سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز انتخاب شده و طبقه‌بندی آنها با توجه به نقش هر پارامتر در ایجاد ناپایداری شیب و با در نظر گرفتن مقیاس متفاوت پروژه‌های معادن روباز انجام گردیده است. کدگذاری ماتریس اندرکنش شیب‌های معادن روباز از طریق تشکیل یک پایگاه داده‌های جامع از وضعیت پایداری و اطلاعات کامل شیب‌های معادن روباز در نقاط مختلف جهان و استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی همراه با اعمال بهینه‌سازی‌هایی در معماری شبکه انجام گرفته است. پس از محاسبه شاخص برای تمام شیب‌های موجود در پایگاه داده‌های آموزش شبکه، سطوح خطر ناپایداری تعریف شده و شاخص پیشنهادی با استفاده از اطلاعات جدید خارج از پایگاه داده‌های کدگذاری مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج این اعتبارسنجی نشان داده است که پیش‌بینی‌های MSII تا حد بسیار زیادی منطبق با مشاهدات منطقه‌ای (رفتار واقعی شیب‌ها) هستند. بدین ترتیب قابلیت کاربرد و اعتبار شاخص پیشنهادی در ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز تأیید گردیده است. با توجه به این که این شاخص در اعتبارسنجی‌ها با استفاده از مشاهدات واقعی دقت بالایی را از خود نشان داده است، انتظار می‌رود که در آینده و در کاربردهای دیگر نیز قادر باشد پیش‌بینی‌های درستی را از ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز ارائه نماید.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

الف	چکیده
ج	فهرست مطالب
ی	فهرست شکل‌ها
ف	فهرست جداول

فصل اول: کلیات

۲	۱-۱- مقدمه
۵	۲-۱- پیشینه و انگیزه طرح موضوع
۷	۳-۱- اهداف رساله
۸	۴-۱- رویکرد اتخاذ شده و سازماندهی رساله

فصل دوم: اصول مهندسی شیب‌های سنگی در معادن روباز

۱۳	۱-۲- مقدمه
۱۳	۲-۲- اجزای طراحی شیب‌های معادن روباز
۱۷	۳-۲- مکانیزم‌های شکست شیب‌های سنگی
۱۸	۲-۳-۱- شکست دایره‌ای
۱۹	۲-۳-۲- شکست صفحه‌ای / گوه‌ای
۲۱	۲-۳-۳- شکست واژگونی
۲۲	۲-۳-۴- شکست راه-پله‌ای

۲۳	۲-۳-۵- شکست در شیب‌های سنگی بزرگ مقیاس
۲۶	۲-۴-۴- رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی
۲۸	۲-۴-۱- روش‌های تجربی
۳۱	۲-۴-۲- روش استریوگرافیک
۳۳	۲-۴-۳- روش‌های تحلیل تعادل حدی
۳۵	۲-۴-۴- روش‌های احتمالاتی
۳۸	۲-۴-۵- روش‌های عددی
۴۰	۲-۴-۶- روش‌های رفتارسنجی
۴۲	۲-۵- جمع‌بندی

فصل سوم: سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

۴۵	۳-۱- مقدمه
۴۶	۳-۲- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی
۴۸	۳-۳- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)
۴۸	۳-۳-۱- ماتریس‌های اندرکنش
۵۲	۳-۳-۲- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش
۵۵	۳-۳-۳- نمودار علت-اثر
۶۰	۳-۴- سابقه استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف

۶۵	۵-۳- تلاش‌های انجام شده در جهت بهبود رویکرد RES.....
۶۶	۳-۵-۱- استفاده از نظریه سیستم‌های خاکستری.....
۶۹	۳-۵-۲- استفاده از نظریه گراف.....
۷۱	۳-۵-۳- استفاده از شبکه‌های عصبی.....
۷۳	۳-۶- تمرکز بر سوابق استفاده از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌ها.....
۷۳	۳-۶-۱- مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶).....
۷۶	۳-۶-۲- کاستالدینی و همکاران (۱۹۹۸).....
۷۷	۳-۶-۳- ژانگ و همکاران (۲۰۰۴).....
۷۸	۳-۶-۴- روزوس و همکاران (۲۰۰۸).....
۷۸	۳-۶-۵- جریان و جریان (۲۰۰۸).....
۷۹	۳-۶-۶- بودتا و همکاران (۲۰۰۸).....
۷۹	۳-۶-۶- روزوس و همکاران (۲۰۱۱).....
۸۱	۳-۷- نتیجه‌گیری.....

فصل چهارم: بکارگیری رویکرد RES برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

۸۳	۴-۱- مقدمه.....
۸۳	۴-۲- منطقه انتخاب شده و شیب‌های سنگی مورد مطالعه.....
۹۱	۴-۳- عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه.....
۹۱	۴-۳-۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی.....

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۹۱	۴-۳-۲- گسل ها و چین خوردگی ها
۹۲	۴-۳-۳- ناپایداری های پیشین
۹۲	۴-۳-۴- مقاومت سنگ بکر
۹۳	۴-۳-۵- هوازدگی
۹۳	۴-۳-۶- خصوصیات ناپیوستگی ها
۹۳	۴-۳-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه ها
۹۴	۴-۳-۸- شرایط هیدرولیکی
۹۴	۴-۳-۹- ابعاد و زاویه شیب ها
۹۴	۴-۳-۱۰- میزان بارندگی
۹۵	۴-۳-۱۱- چرخه های ذوب و انجماد
۹۵	۴-۴- اندرکنش های میان پارامترهای انتخاب شده
۹۹	۴-۵- تشکیل فهرست های رده بندی و بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز
۱۰۰	۴-۵-۱- زمین شناسی و لیتولوژی
۱۰۱	۴-۵-۲- گسل ها و چین خوردگی ها
۱۰۲	۴-۵-۳- ناپایداری پیشین
۱۰۲	۴-۵-۴- مقاومت سنگ بکر
۱۰۲	۴-۵-۵- تعداد دسته درزه ها و جهت یافتگی
۱۰۳	۴-۵-۶- بازشدگی، تداوم و فاصله داری درزه ها

۱۰۴	۴-۵-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها.....
۱۰۴	۴-۵-۸- شرایط هیدرولیکی.....
۱۰۴	۴-۵-۹- ابعاد و زاویه شیب‌ها.....
۱۰۵	۴-۵-۱۰- میزان بارندگی و چرخه‌های ذوب و انجماد.....
۱۰۵	۴-۶- رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه از نظر میزان ناپایداری.....
۱۰۹	۴-۷- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از یک روش تجربی.....
۱۱۲	۴-۸- نتیجه‌گیری.....

فصل پنجم: کدگذاری نیمه‌عددی خبره احتمالاتی (PESQ): یک بهبود در رویکرد RES

۱۱۵	۵-۱- مقدمه.....
۱۱۵	۵-۲- کدگذاری نیمه‌عددی خبره احتمالاتی (PESQ).....
۱۱۵	۵-۲-۱- معرفی.....
۱۱۷	۵-۲-۲- کاربرد.....
۱۴۰	۵-۳- نتیجه‌گیری.....

فصل ششم: توسعه شاخص ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز به کمک رویکرد RES

۱۴۳	۶-۱- مقدمه.....
۱۴۴	۶-۲- کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN).....
۱۵۲	۶-۳- تعریف شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII).....

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

-
- ۴-۶- ساخت یک پایگاه داده‌ها از رخدادهای و وضعیت‌های پایداری شیب‌های معادن روباز ۱۵۴
- ۱-۴-۶- انتخاب و طبقه‌بندی پارامترهای اصلی موثر بر پایداری شیب‌های معادن روباز ۱۵۴
- ۱-۴-۶-۱- شرایط محیطی کلی ۱۵۷
- ۲-۴-۶-۱- کیفیت سنگ بکر ۱۵۷
- ۳-۴-۶-۱- خصوصیات توده سنگ ۱۵۸
- ۴-۴-۶-۱- تنش بر جای سنگ ۱۵۸
- ۵-۴-۶-۱- شرایط هیدرولیکی ۱۵۹
- ۶-۴-۶-۱- خصوصیات ناپیوستگی‌ها ۱۵۹
- ۷-۴-۶-۱- شرایط هندسی دیواره پیت ۱۶۲
- ۸-۴-۶-۱- ساخت ۱۶۳
- ۹-۴-۶-۱- سوابق پیشین ۱۶۳
- ۲-۴-۶- پایگاه داده‌های شیب‌های معادن روباز ۱۶۸
- ۵-۶- نتایج ۱۷۰
- ۱-۵-۶- کدگذاری ماتریس اندرکنش بر پایه ANN ۱۷۰
- ۲-۵-۶- تعریف سطوح خطر ناپایداری بر اساس MSII ۱۷۷
- ۳-۵-۶- اعتبارسنجی روش ۱۸۲
- ۶-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۸۴

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۸۸	۱-۷- نتیجه گیری
۱۹۲	۲-۷- پیشنهادات برای تحقیقات آتی
۱۹۵	فهرست منابع
۲۲۳	پیوست الف: داده‌های آزمایشگاهی و برداشت شده از شیب‌های سنگی مورد مطالعه
۲۲۸	پیوست ب: پایگاه داده‌های گذشته شیب‌های سنگی معادن روباز

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱- افزایش تدریجی نرخ تولید روزانه برخی معادن روباز بزرگ (modified after Brown,)
۲۰۰۴..... ۳
- شکل ۱-۲- افزایش تدریجی عمق برخی معادن روباز بزرگ (modified after Brown, 2004)..... ۳
- شکل ۱-۳- اثر بالقوه افزایش شیب دیواره معدن روباز (after Read & Stacey, 2009)..... ۴
- شکل ۱-۴- شکست شیب بزرگ مقیاس در یک معدن مس پورفیری در آفریقای جنوبی (Hoek et al.,)
۲۰۰۰a..... ۶
- شکل ۱-۵- ساختار رساله..... ۱۰
- شکل ۱-۲- نمودار فرآیند طراحی شیب در معادن روباز (after Sullivan, 2006)..... ۱۵
- شکل ۲-۲- هندسه شیب معدن روباز (المان‌های طراحی)..... ۱۷
- شکل ۲-۳- شکست برشی دایره‌ای: الف) بدون ترک کششی، ب) با ترک کششی (after Hoek &)
۱۹۸۱..... (Bray, 1981) ۱۸
- شکل ۲-۴- شکست برشی دایره‌ای در سه بعد (after Hoek & Bray, 1981)..... ۱۹
- شکل ۲-۵- شرایط رخداد شکست برشی صفحه‌ای: الف) مقطع عرضی، ب) سطوح آزاد جانبی مورد
نیاز برای شکست (after Wyllie & Mah, 2004)..... ۲۰
- شکل ۲-۶- شکست گوه‌ای ایجاد شده توسط دو صفحه ناپیوستگی متقاطع (after Wyllie & Mah,)
۲۰۰۴..... ۲۰
- شکل ۲-۷- مدهای شکست واژگونی معمول: الف) واژگونی بلوکی، ب) واژگونی خمیده، ج) واژگونی
بلوکی - خمیده (after Goodman & Bray, 1976)..... ۲۱

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۲-۸- هندسه مکانیزم راه-پله‌ای در یک شیب سنگی: الف) راه-پله‌ای پیوسته، ب) راه-پله‌ای ناپیوسته با پل‌های سنگ بکر (after Call & Nicholas, 1978)..... ۲۳
- شکل ۲-۹- سطح شکست در شیب سنگی بزرگ مقیاس شامل مکانیزم‌های شکست مختلف (after Hoek et al., 2000a)..... ۲۴
- شکل ۲-۱۰- نمونه‌ای از یک شکست شیب بزرگ مقیاس با کنترل ساختاری بخشی و مکانیزم شکست تا حد زیاد ناشناخته (Hoek et al., 2000a)..... ۲۵
- شکل ۲-۱۱- رابطه میان ارتفاع و زاویه شیب: الف) شیب‌های سنگی معادن روباز (after Sjoberg, 1999)، ب) شیب‌های طبیعی و مهندسی شده (data from Chen 1995a,b)..... ۲۹
- شکل ۲-۱۲- نمایش زمین‌شناسی ساختاری بر روی استریونت‌ها و ارزیابی اولیه پایداری شیب برای یک معدن روباز (after Wyllie & Mah, 2004)..... ۳۲
- شکل ۲-۱۳- شکست صفحه‌ای و دایره‌ای (after Wyllie & Mah, 2004)..... ۳۳
- شکل ۲-۱۴- روش‌های مدل‌سازی عددی پیوسته (بالا) و ناپیوسته (پایین) برای شکست کمانشی در امتداد یک شیب معدن روباز زغال‌سنگ (Stead & Eberhardt, 1997)..... ۳۹
- شکل ۲-۱۵- شبکه کلی سیستم رفتارسنجی برای یک معدن روباز (Call, 1982)..... ۴۱
- شکل ۲-۱۶- نمونه‌ای از جانمایی نصب تجهیزات SSR در معدن روباز Sandsloot در آفریقای جنوبی (Little, 2007)..... ۴۲
- شکل ۳-۱- مفهوم تفکر سیستمی (after Rapoport, 1968)..... ۴۷
- شکل ۳-۲- مفهوم ساختار رویکرد سیستم‌ها (after Hill & Warfield, 1972)..... ۴۸

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۳-۳- شش اندرکنش دوتایی میان ساختار سنگ، تنش‌ها در سنگ و جریان آب در اطراف یک فضای زیرزمینی (after Hudson & Harrison, 1997) ۴۹
- شکل ۳-۴- مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B (after Hudson, 1992a) ... ۵۰
- شکل ۳-۵- ماتریس اندرکنش 3×3 برای پارامترهای مکانیک سنگی در نظر گرفته شده (after Hudson, 1992a) ۵۱
- شکل ۳-۶- نمایش گرافیکی اندرکنش‌ها میان پارامترهای یک ماتریس شامل ناپیوستگی‌ها و تنش‌ها در سنگ (after Hudson, 1992a) ۵۲
- شکل ۳-۷- روش دوم کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES: استفاده از شیب خط نمودار P_i (after Hudson, 1992a) ۵۴
- شکل ۳-۸- نحوه شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش (after Hudson, 1992a) ۵۶
- شکل ۳-۹- نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش 2×2 کدگذاری شده و نمودار علت-اثر آن (after Hudson, 1992a) ۵۷
- شکل ۳-۱۰- نمودار (C,E) تعمیم داده شده برای سه پارامتر به همراه مثال‌هایی از ماتریس‌های متقارن و غیرمتقارن (after Hudson, 1992a) ۵۷
- شکل ۳-۱۱- نمودار (C,E) تعمیم داده شده به N پارامتر (after Hudson, 1992a) ۵۸
- شکل ۳-۱۲- مثالی از یک نمودار علت-اثر برای یک ماتریس 4×4 (after Hudson, 1992a) ۵۹
- شکل ۳-۱۳- مفهوم شدت اندرکنش و تسلط پارامتر (after Hudson, 1992a) ۶۰

فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

- شکل ۳-۱۴- مقایسه نتایج حاصل از روش کدگذاری (الف) ESQ و (ب) CQC (Lu & Latham,) (1994)..... ۶۸
- شکل ۳-۱۵- خط سیرهای مکانیزم برای یک ماتریس با ۵ پارامتر (Jiao & Hudson, 1995)..... ۶۹
- شکل ۳-۱۶- شبکه مکانیزم‌های میان چند پارامتر در مدل تمام مرتبط (after Jiao & Hudson, 1995) ... ۷۰
- شکل ۳-۱۷- نحوه قرارگیری پارامترهای ماتریس اثر متقابل در یک شبکه عصبی (after Yang & Zhang, 1998)..... ۷۱
- شکل ۳-۱۸- شبکه عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس (after Yang & Zhang, 1998)..... ۷۲
- شکل ۳-۱۹- نمودار علت-اثر خروجی برای ۲۰ پارامتر سیستم در مطالعه مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)..... ۷۵
- شکل ۳-۲۰- رتبه‌بندی اهمیت پارامترها برای ۲۰ پارامتر سیستم تحقیق مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)..... ۷۵
- شکل ۳-۲۱- هیستوگرام شاخص ناپایداری توده سنگ برای شیب‌های منطقه مورد مطالعه در تحقیق مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)..... ۷۶
- شکل ۳-۲۲- ماتریس کدگذاری شده برای ۲۱ پارامتر سیستم برای کار کاستالدینی و همکاران (Castaldini et al., 1998)..... ۷۷
- شکل ۳-۲۳- نمودار علت-اثر بدست آمده در مطالعه بودتا و همکاران (Budetta et al., 2008)..... ۷۹

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۳-۲۴- نقشه حساسیت خطر زمین‌لغزش بدست آمده از رویکرد RES در مطالعه روزوس و همکاران (Rozos et al., 2011) ۸۰
- شکل ۴-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن (مؤسسه جغرافیایی ایران، ۱۳۸۰)..... ۸۵
- شکل ۴-۲- بخشی از نقشه زمین‌شناسی خوش‌بیلاق با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰؛ ناحیه محدوده مورد مطالعه بصورت کادر مستطیلی مشخص شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۱۳۸۰)..... ۸۶
- شکل ۴-۳- کروکی منطقه مورد مطالعه شامل ایستگاه‌های در نظر گرفته شده و شیب‌های سنگی..... ۸۸
- شکل ۴-۴- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۳ (S3) ۸۹
- شکل ۴-۵- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۴ (S4) ۸۹
- شکل ۴-۶- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۹ (S9) ۹۰
- شکل ۴-۷- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۱۱ (S11)..... ۹۰
- شکل ۴-۸- نمودار علت-اثر برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق..... ۹۸
- شکل ۴-۹- هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها..... ۹۸
- شکل ۴-۱۰- نمونه‌ای از گسل‌های اصلی بر روی شیب سنگی شماره ۱۱..... ۱۰۱
- شکل ۴-۱۱- نمایی از خط برداشت در نظر گرفته شده بر روی شیب سنگی شماره ۷..... ۱۰۳
- شکل ۴-۱۲- نتایج شاخص ناپایداری نگاشته شده بر نقشه شیب‌های سنگی منطقه خوش‌بیلاق..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "زمین‌شناسی و لیتولوژی" (P_1)؛ الف: علت (C)،
ب: اثر (E) ۱۲۲

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۵-۲- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها" (P_2)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۳
- شکل ۵-۳- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ناپایداری پیشین" (P_3)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۴
- شکل ۵-۴- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "مقاومت سنگ بکر" (P_4)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۵
- شکل ۵-۵- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "هوازدگی" (P_5)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۶
- شکل ۵-۶- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها" (P_6)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۷
- شکل ۵-۷- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "شرایط هیدرولیکی" (P_7)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۸
- شکل ۵-۸- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ارتفاع شیب" (P_8)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۲۹
- شکل ۵-۹- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "زاویه شیب" (P_9)؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۳۰
- شکل ۵-۱۰- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ناپایداری بالقوه" (P_{10})؛ الف: علت (C)، ب: اثر (E) ۱۳۱
- شکل ۵-۱۱- نمودارهای (C,E) احتمالی پارامترهای سیستم؛ الف: زمین‌شناسی و لیتولوژی (P_1)، ب: گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها (P_2)، ج: ناپایداری پیشین (P_3)، د: مقاومت سنگ بکر (P_4)، ه: هوازدگی

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- (P₅)، و: خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها (P₆)، ز: شرایط هیدرولیکی (P₇)، ح: ارتفاع شیب (P₈)، ط:
- زاویه شیب (P₉)، ی: ناپایداری بالقوه (P₁₀)..... ۱۳۷
- شکل ۵-۱۲- مقادیر میانگین و حدود انحراف از معیار برای تعامل ۱۰ پارامتر اثرگذار بر سیستم پایداری شیب‌های سنگی..... ۱۳۸
- شکل ۵-۱۳- مقادیر میانگین و حدود انحراف از معیار برای تسلط ۱۰ پارامتر اثرگذار بر سیستم پایداری شیب‌های سنگی..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱- مراحل توسعه شاخص ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز..... ۱۴۴
- شکل ۶-۲- طرح کلی شبکه BP مورد نظر در مرحله یادگیری..... ۱۴۶
- شکل ۶-۳- دسته‌های انتخاب شده و پارامترهای اصلی سیستم..... ۱۵۳
- شکل ۶-۴- توزیع وضعیت‌های پایداری ۸۲ مورد موجود در پایگاه داده‌ها..... ۱۶۹
- شکل ۶-۵- ساختار آینه‌ای در نظر گرفته شده برای آموزش شبکه..... ۱۷۲
- شکل ۶-۶- سلسله مراتب ساده الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی ساخته شده..... ۱۷۳
- شکل ۶-۷- نمودار علت-اثر سیستم در نظر گرفته شده برای مسئله پایداری شیب‌های معادن روباز..... ۱۷۵
- شکل ۶-۸- شدت اندرکنش پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز..... ۱۷۶
- شکل ۶-۹- سطوح خطر تخمین زده شده با مقادیر محاسبه شده MSII برای ۷۲ مورد پایگاه داده‌ها..... ۱۸۱

فهرست جداول

صفحه

عنوان

- جدول ۱-۲- ضرایب ایمنی برای طراحی شیب‌های معادن روباز (after Sullivan, 2006) ۳۴
- جدول ۲-۲- احتمال‌های شکست برای طراحی شیب‌های معادن روباز (after Sullivan, 2006) ۳۷
- جدول ۳-۲- روش‌های مدل‌سازی عددی در تحلیل پایداری شیب‌ها (Coggan et al., 1998) ۴۰
- جدول ۱-۴- ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق.. ۹۷
- جدول ۲-۴- فهرست‌های رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها ۱۰۰
- جدول ۳-۴- رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه ۱۰۷
- جدول ۴-۴- طبقه‌بندی کیفی پیشنهادی برای شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه ۱۰۸
- جدول ۵-۴- رده‌بندی نهایی بدست آمده برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه ۱۰۸
- جدول ۶-۴- ضرایب تعدیل ناپیوستگی‌ها برای اعمال بر RMR در روش SMR (after Romana,) ۱۱۰
- جدول ۷-۴- طبقه‌بندی شیب‌های سنگی در روش تجربی SMR (Romana, 1985) ۱۱۱
- جدول ۸-۴- محاسبه مقادیر SMR برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه ۱۱۱
- جدول ۱-۵- ماتریس اندرکنش M_0 برای احتمال کد ۰ در مسئله پایداری شیب سنگی ۱۱۸
- جدول ۲-۵- ماتریس اندرکنش M_1 برای احتمال کد ۱ در مسئله پایداری شیب سنگی ۱۱۹
- جدول ۳-۵- ماتریس اندرکنش M_2 برای احتمال کد ۲ در مسئله پایداری شیب سنگی ۱۱۹
- جدول ۴-۵- ماتریس اندرکنش M_3 برای احتمال کد ۳ در مسئله پایداری شیب سنگی ۱۲۰
- جدول ۵-۵- ماتریس اندرکنش M_4 برای احتمال کد ۴ در مسئله پایداری شیب سنگی ۱۲۰
- جدول ۱-۶- طبقه‌بندی پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز ۱۶۵

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۶۹.....	جدول ۶-۲- فهرست معادن روباز موجود در پایگاه داده‌ها.....
۱۷۴.....	جدول ۶-۳- ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های معادن روباز.....
۱۷۶.....	جدول ۶-۴- وزن‌های تأثیر پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز.....
	جدول ۶-۵- مقادیر محاسبه شده شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII) برای تمام موارد
۱۷۸.....	استفاده شده پایگاه داده‌ها در کدگذاری ماتریس.....
۱۸۲.....	جدول ۶-۶- جزئیات رخدادهای انتخاب شده برای ارزیابی قابلیت کاربرد (اعتبارسنجی) شاخص.....
۱۸۳.....	جدول ۶-۷- نتایج ارزیابی قابلیت کاربرد (اعتبارسنجی) شاخص MSII.....
	جدول الف-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های سنگی مربوط به ۱۵ شیب مورد
۲۲۳.....	مطالعه.....
	جدول الف-۲- نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی درزه‌های سنگی مربوط به ۱۵ شیب سنگی مورد
۲۲۴.....	مطالعه؛ پارامترهای موهر- کولمب.....
	جدول الف-۳- اطلاعات مربوط به خطوط برداشت درزه‌های سنگی بر روی ۱۵ شیب سنگی مورد
۲۲۵.....	مطالعه.....
۲۲۶.....	جدول الف-۴- پارامترهای حاکم محیطی در ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه.....
	جدول ب-۱- پایگاه داده‌های گذشته شیب‌های معادن روباز استفاده شده در توسعه شاخص ناپایداری
۲۲۸.....	(MSII).....

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

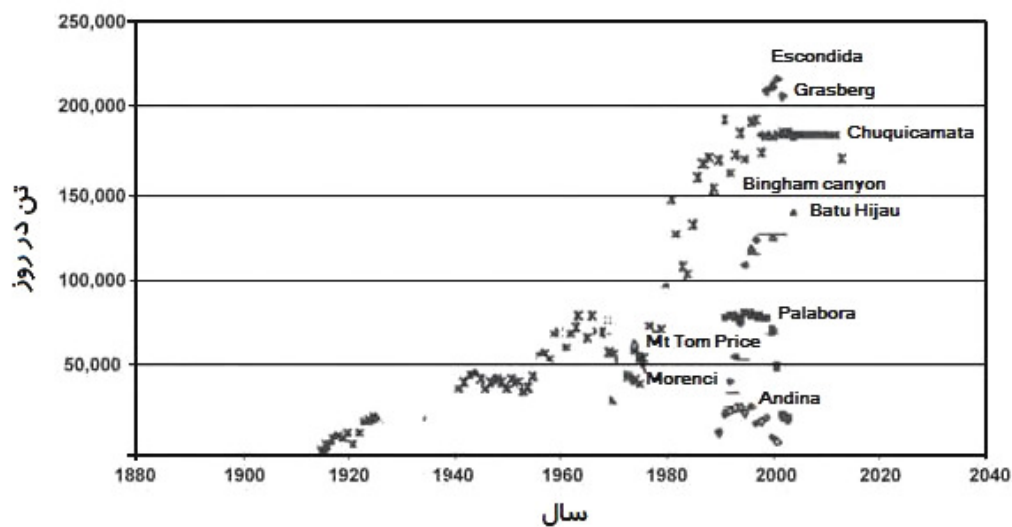
معدنکاری روباز^۱ امروزه بدون شک مهمترین تکنولوژی استخراج منابع اولیه و ذخایر معدنی مختلف در جهان می‌باشد. در سال‌های اخیر، معدنکاری روباز بزرگ مقیاس در زمره روش‌های استخراج انبوه مواد معدنی^۲ قرار گرفته است (Franz, 2009). نرخ تولید معادن روباز طی ۱۰۰ سال گذشته به طور مستمر افزایش یافته است و انتظار می‌رود که این روند رو به رشد همچنان ادامه داشته باشد. این امر به وضوح در شکل ۱-۱ قابل مشاهده است. در حال حاضر بزرگترین معادن روباز فعال، تولیدی بیش از ۲۰۰,۰۰۰ تن در روز دارند. یکی از پی‌آمدهای این روند، اقتصادی بودن افزایش چشمگیر عمق این معادن بوده است (Brown, 2004). شکل ۲-۱ روند افزایشی عمق برخی معادن روباز معروف را نشان می‌دهد.

طراحی زوایای شیب‌ها و تحلیل پایداری آنها در معادن روباز همزمان با افزایش عمق معدنکاری روباز اهمیت روزافزونی پیدا کرده است. نقش پایداری شیب در طراحی، و همچنین در استخراج و یا پیش‌بینی شکست بسیار حائز اهمیت است. تغییرات بسیار کم در زاویه شیب‌ها و در نتیجه در زاویه شیب نهایی معدن روباز تأثیر چشمگیری بر پارامترهای اقتصادی عملیات معدنی خواهد گذاشت. در بخش طراحی، شیب زیاد باعث کاهش نسبت باطله‌برداری، کاهش زمان برگشت سرمایه و افزایش ذخیره معدنی قابل استخراج می‌شود. در مرحله استخراج، پایداری شیب‌ها این امکان را فراهم خواهد

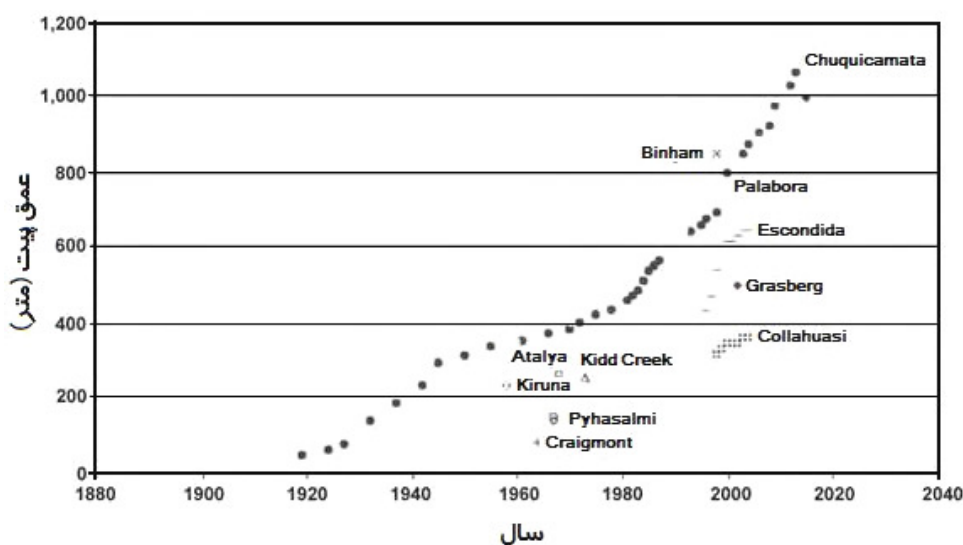
¹ Open-pit mining

² Mass mining

نمود تا انفجارهای متعدد و دلخواه به منظور خرد شدن کامل سنگ‌ها صورت پذیرد. از نظر ایمنی چه در مرحله طراحی و چه در مرحله استخراج، پایداری شیب موجب کنترل بهتر دیواره‌های معدن، کنترل بهتر آب‌های سطحی و زیرزمینی و طراحی و ایجاد دیواره‌های ایمنی در دیواره نهایی معدن می‌شود. در شیب‌های پایدار میزان از دست رفتن مواد معدنی، تجهیزات و پرسنل به حداقل رسیده و لذا از نظر اقتصادی مناسب‌تر و از بعد ایمنی، ایمن‌تر خواهد بود.

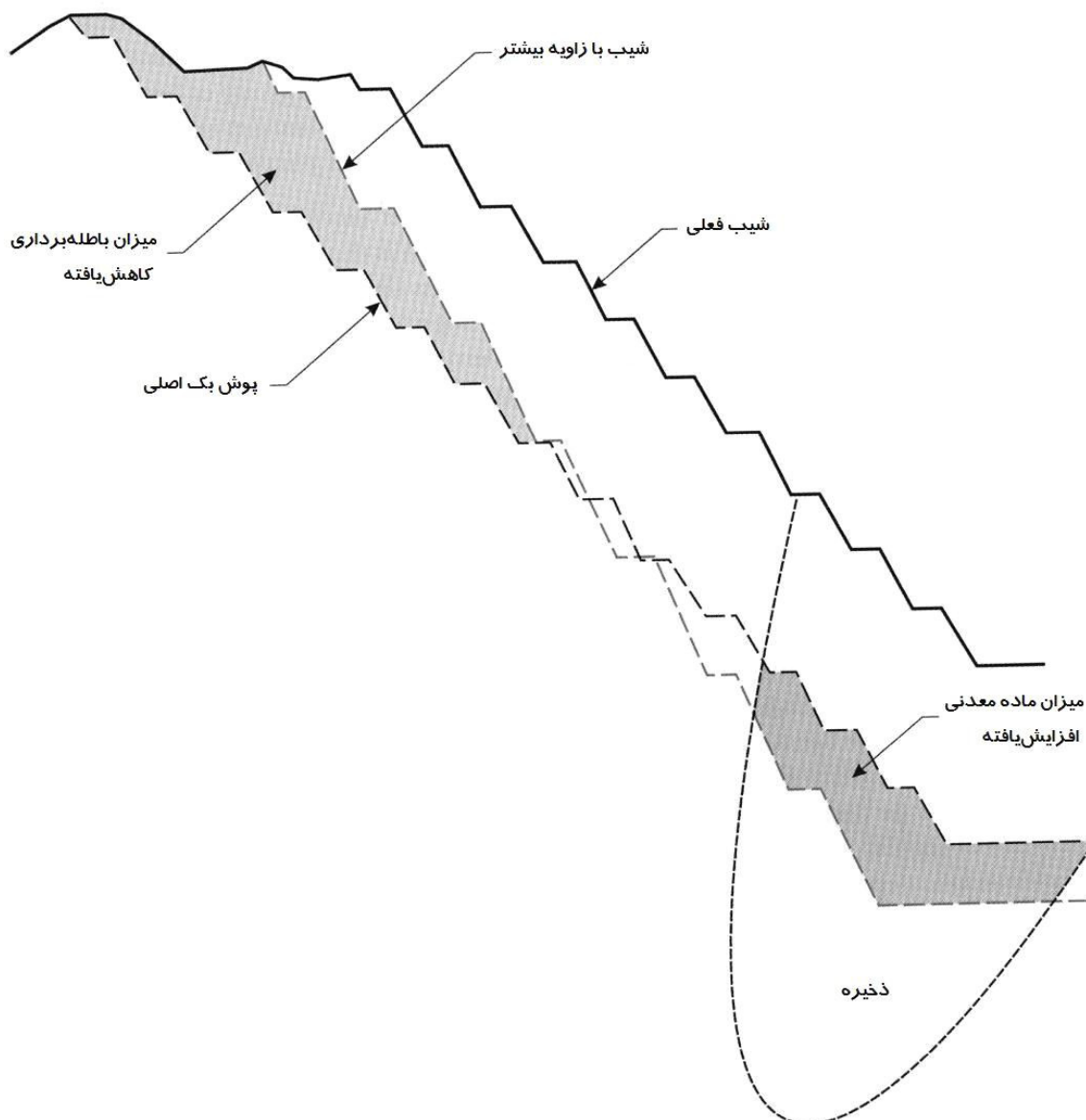


شکل ۱-۱- افزایش تدریجی نرخ تولید روزانه برخی معادن روباز بزرگ (modified after Brown, 2004)



شکل ۱-۲- افزایش تدریجی عمق برخی معادن روباز بزرگ (modified after Brown, 2004)

همان گونه که اشاره شد، اقتصاد یک عملیات معدنی روباز می‌تواند تا حد زیادی با حداقل کردن نسبت باطله‌برداری بهبود یابد، چرا که میزان باطله‌ای که نیاز است استخراج و حمل گردد به حداقل میزان خواهد رسید. برای این منظور بایستی تا جایی که ممکن است شیب دیواره‌های معدن افزایش یابد، به شرطی که پدیده ریزش در آن رخ ندهد. برای معادن روباز بزرگ مقیاس، تنها ۲ تا ۳ درجه تغییر در شیب نهایی با تغییر ارزش پروژه تا صدها میلیون دلار سنجیده می‌شود (Lilly, 2002). این مفهوم به صورت کلی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳- اثر بالقوه افزایش شیب دیواره معدن روباز (Read & Stacey, 2009)

با این حال، با زیاد شدن زاویه کلی شیب، خطر ریزش و شکست آن افزایش می‌یابد. این در حالی است که امنیت پرسنل و معدنکاری پیوسته و بدون توقف از جمله شرایط حیاتی برای یک عملیات موفق به شمار می‌رود. بنابراین عدم قطعیت در پیش‌بینی پایداری شیب‌ها در معادن روباز یک ریسک جدی اقتصادی می‌باشد. چنین عدم قطعیت‌هایی با زیادتر شدن عمق معادن افزایش می‌یابد، چرا که تحلیل پایداری شیب‌های بزرگ مقیاس از چالش‌های اصلی در ژئومکانیک معادن روباز است. این امر به خوبی اهمیت پیش‌بینی ناپایداری‌ها در معادن روباز را نشان می‌دهد.

۲-۱- پیشینه و انگیزه طرح موضوع

در بخش قبل در مورد اهمیت پایداری شیب‌های معادن روباز و مزایای طراحی شیب‌های با زاویه بیشتر بحث گردید. نکته مهم این است که روش‌های متداول تحلیل پایداری شیب‌ها اغلب تنها قادر به در نظر گرفتن مکانیزم‌های بسیار معمول شکست نظیر شکست صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی یا برشی دایره‌ای هستند. این در حالی است که شکست‌هایی که در دیواره‌های معادن روباز رخ می‌دهند، معمولاً شکست‌های بزرگ مقیاس با مکانیزم‌های پیچیده‌ای هستند که از ترکیبی از شکست در اجزای ساختاری (ناپیوستگی‌ها) و سنگ بکر اتفاق می‌افتند (شکل ۱-۴ نمونه‌ای از چنین شکست‌های بزرگ مقیاس را در یک معدن روباز نشان می‌دهد). بنابراین روش‌های معمول در بیشتر مواقع قادر به ارزیابی و پیش‌بینی درست شکست در شیب‌های معادن روباز نمی‌باشند، چرا که پارامترهای موثر بر این شکست‌ها از چنان تعدد بالایی برخوردارند که این روش‌ها نمی‌توانند تمامی آنها را در نظر بگیرند. از طرفی اندرکنش‌های^۱ میان پارامترها نیز تأثیر بسیار مهمی در رخداد شکست دارند که آنها نیز به طور کلی در روش‌های مرسوم در نظر گرفته نمی‌شوند.

¹ Interaction



شکل ۱-۴- شکست شیب بزرگ مقیاس در یک معدن مس پورفیری در آفریقای جنوبی (Hoek et al., 2000a)

برای فائق آمدن بر این مشکل می‌توان از رویکردهای سیستمی استفاده نمود که توانایی در نظر گرفتن تعداد نامحدودی از پارامترها و نیز اندرکنش‌های میان آنها را دارا هستند. رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES¹) از جمله معروف‌ترین رویکردها در این زمینه به شمار می‌رود که در سال‌های اخیر در مسائل پیچیده علوم مهندسی مختلف و از آن جمله در تحلیل پایداری شیب‌ها کاربرد قابل توجهی یافته است. با این حال، در بسیاری از کاربردها و بخصوص در مسائل مربوط به پایداری شیب‌ها همواره از روش‌های کدگذاری سنتی (متداول) در یکی از حیاتی‌ترین بخش‌های روش سیستمی RES یعنی در قسمت تعیین اهمیت نسبی پارامترهای سیستم استفاده شده است. این کار که به کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها معروف است، جزو حساس‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین بخش‌های اجرای این روش می‌باشد. روش کدگذاری سنتی روش بسیار ساده‌ای است که تنها قادر

¹ Rock Engineering Systems

است اندرکنش‌های میان پارامترهای سیستم را در طبقات مختلف رتبه‌بندی نماید. این روش کدگذاری به هیچ وجه قادر به تشریح درست مکانیزم‌های اثرات متقابل (اندرکنش‌ها) نبوده و از طرفی استفاده از آن کاملاً جنبه ذهنی^۱ (یا تخمینی) دارد، به طوری که در صورت کدگذاری توسط افراد مختلف، به طور حتم تفاوت‌های بسیاری در هر مورد مشاهده می‌شود که این تفاوت‌ها تا حد زیادی در خروجی‌ها و نتایج نهایی منعکس خواهند شد. تلاش‌هایی به منظور بهبود رویکرد و تلفیق آن با سایر نظریه‌ها انجام شده است که اغلب در عمل به دلایل مختلف کاربرد مشهودی از آنها مشاهده نشده است. بنابراین با توجه به اهمیت مسئله، به منظور ارتقای رویکرد حاضر و استفاده از روشی جدید در کدگذاری جهت کاربرد در تحلیل خطر ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز، رساله حاضر ارائه شده است. در این تحقیق تلاش بر این خواهد بود که در کنار اعمال بهبودهایی بر رویکرد RES متداول، از بهبودهای قبلی در این زمینه نیز استفاده شده و با سعی در جهت بهینه‌سازی آنها در نهایت شاخصی برای پیش‌بینی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز ارائه گردد. شایان ذکر است که طی یک پژوهش و پیش از شروع مراحل اصلی رساله، ضعف‌های اصلی روش کدگذاری مرسوم به طور کامل مشاهده گردیده و این نتیجه حاصل شد که برای ارائه شاخص مورد استفاده در معادن روباز، بهبود این رویکرد ضروری می‌باشد (نتایج این تحقیق در یکی از فصول رساله آورده شده است).

۱-۳- اهداف رساله

با توجه به موضوعات و مشکلات مطرح شده در بخش قبل، ضرورت انجام تحقیقی که بتواند علاوه بر اعمال بهبودهایی بر رویکرد سیستمی RES، از آن در ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز استفاده نماید، نمایان می‌شود. بنابراین رساله حاضر اهداف زیر را دنبال می‌کند.

✓ استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و

وارد نمودن آن به رویکردهای تحلیل شیب‌های بزرگ مقیاس؛

^۱ Subjective

- ✓ اعمال بهبودهایی در رویکرد RES که در مرحله اول از طریق تلفیق روشها با هدف بهتر کردن تخمینها و کاهش خطاها و درنهایت به منظور خروج رویکرد از حالت ذهنی و تبدیل به حالت شیءگرا یا برون ذات¹ انجام می‌گیرد. این کار معادل با ارائه رهیافتی به منظور اصلاح نحوه کدگذاری در سیستمهای مهندسی سنگ می‌باشد، به صورتی که قابلیت استفاده در مسائل پایداری شیبهای معادن روباز را داشته باشد؛
- ✓ ارائه یک شاخص نشانگر پتانسیل ناپایداری شیبهای معادن روباز با استفاده از رویکرد سیستمی که توانایی پیش‌بینی صحیح وضعیت پایداری این شیبها را در صورت پیاده‌سازی در موارد جدید داشته باشد.

۱-۴- رویکرد اتخاذ شده و سازماندهی رساله

با توجه به مباحث مطرح شده در بخش‌های پیشین و با در نظر گرفتن اهداف متصور از تحقیق حاضر، رویکردی در سه مرحله به ترتیب زیر در رساله حاضر اتخاذ شده است:

۱. در مرحله اول، از رویکرد RES متداول در یک مسئله تحلیل شیبهای سنگی کنار جاده‌ای بهره گرفته خواهد شد. هدف از این کار، اعمال روش کدگذاری سنتی در یک مسئله مرتبط با موضوع کلی رساله (پایداری شیبهای سنگی) و تحلیل خروجی‌های رویکرد سیستمی و مشاهده نتایج این رویکرد بوده است. این کار باعث خواهد شد تا نحوه کاربرد رویکرد مذکور در تحلیل پایداری شیبها به طور واضح نشان داده شده و تسلط نسبی در استفاده از آن به دست آید. از نتایج یک روش تجربی نیز برای ارزیابی نتایج رویکرد سیستمی و صحت تخمینها استفاده خواهد شد.

¹ Objective

۲. در مرحله بعد، یک ایده جدید برای بهبود کلی رویکرد RES ارائه می‌شود که طی آن یک روش کدگذاری احتمالاتی ماتریس اندرکنش توسعه داده شده و مورد کاربرد قرار می‌گیرد. هدف از ارائه این بخش، خروج کدگذاری‌ها از حالت قطعی و وارد نمودن عدم قطعیت‌ها به سیستم در نظر گرفته شده (فارغ از نوع کاربرد و مسئله) است. این روش حالت ذهنی کدگذاری‌ها را تعمیم داده و به وارد نمودن بهترین تخمین‌های احتمالی از ارتباط پارامترها به تحلیل‌ها و در نتیجه کاهش خطاها کمک خواهد کرد.

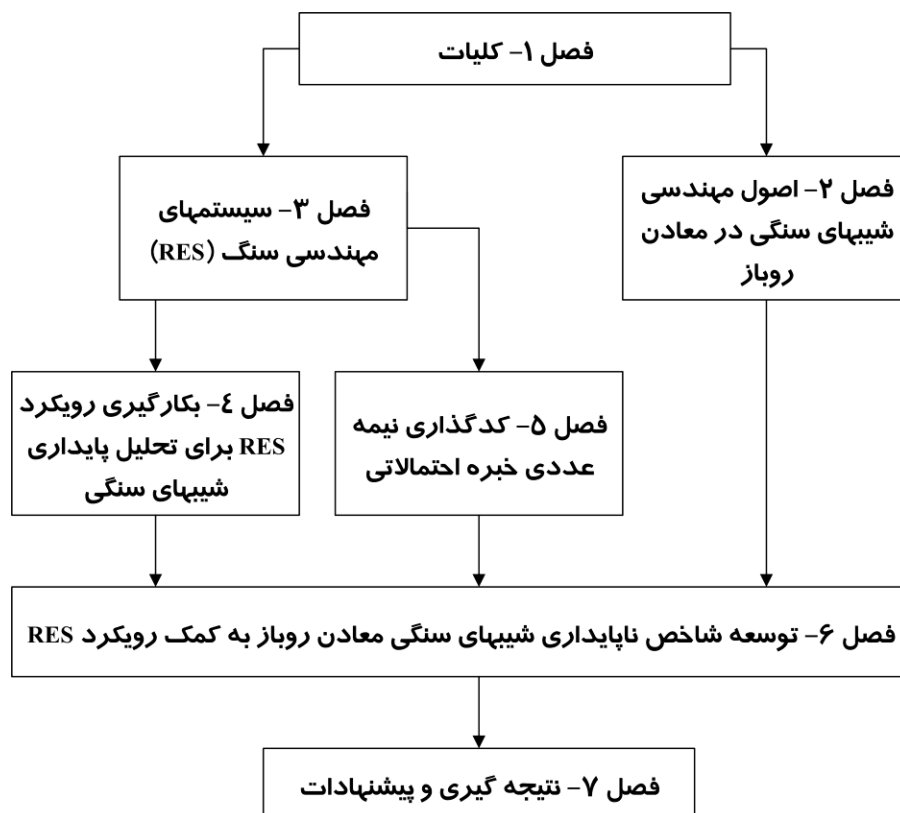
۳. در مرحله سوم، با بکارگیری یک بهبود صورت گرفته قبلی در رویکرد سیستمی شامل استفاده از شبکه‌های عصبی و تشکیل یک پایگاه داده‌های جامع، ماتریس اندرکنش پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های سنگی معادن روباز به صورت غیرذهنی کدگذاری می‌شود. با به دست آوردن اثرات متقابل ذاتی پارامترها (مشاهده شده در واقعیت و نه بر اساس نظر یک یا چند کارشناس)، شاخصی جهت پیش‌بینی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز تعریف شده و مقادیر آن برای کل پایگاه داده‌ها محاسبه می‌شود که در نهایت این شاخص پس از تعیین سطوح خطر ناپایداری از نقطه نظر قابلیت کاربرد مورد اعتبارسنجی نیز قرار می‌گیرد.

شکل ۱-۵ ساختار رساله را به صورت فصل‌های سازماندهی شده نشان می‌دهد. مطابق این ساختار، در ادامه این رساله و در فصل دوم، کلیات روش‌ها و اجزای طراحی شیب‌های معادن روباز مرور شده و نیز مکانیزم‌های شکست شیب‌های سنگی با نگاهی ویژه به شیب‌های بزرگ مقیاس ارائه می‌گردد. همچنین رویکردهای کلی در زمینه تحلیل پایداری این ساختارها به طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته و به مزایا و محدودیت‌های روش‌های مختلف پرداخته می‌شود.

در فصل سوم، ابتدا به اصول کلی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ پرداخته شده و سپس سابقه استفاده از این رویکرد از نقطه نظر بهبودهای صورت گرفته و نیز استفاده از آن در علوم مختلف و به

طور ویژه در تحلیل پایداری شیبها بررسی می‌گردد. بنابراین در فصل‌های دوم و سوم سابقه علمی موضوع به تفصیل بررسی خواهد شد.

سپس در فصل چهارم از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به منظور تحلیل پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی استفاده می‌شود (مرحله اول). در این مرحله، به عنوان شروع کار، شیب‌های مهندسی شده کنار جاده‌ای (در منطقه‌ای در شمال شرقی ایران) برای این منظور انتخاب شده و تمام مراحل رویکرد RES متداول به ترتیب دنبال می‌شود و پس از تحلیل اهمیت پارامترها در سیستم، وضعیت پایداری با تعریف و محاسبه شاخص برای ایستگاه‌های مورد مطالعه به طور ساده بر روی نقشه منطقه نگاشته می‌شود. در نهایت، نتایج به دست آمده از این رویکرد با نتایج یک روش تجربی طبقه‌بندی شیب‌های سنگی مقایسه شده و بدین ترتیب رویکرد بکار رفته (در حالت متداول آن) مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۵- ساختار رساله

پس از آن در فصل پنجم، ایده استفاده از روش نیمه‌عددی خیره احتمالاتی (PESQ) برای وارد کردن عدم قطعیت‌ها در کدگذاری‌ها ارائه می‌گردد. برای نشان دادن کاربرد، روش پیشنهادی همچنین بر روی یک سیستم کلی پایداری شیب‌های سنگی پیاده‌سازی می‌شود.

سپس در فصل ششم و به عنوان یکی از سهم‌های اصلی تحقیق رساله، با بهینه‌سازی الگوریتم یک بهبود صورت گرفته قبلی در رویکرد RES (استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی)، کدگذاری ماتریس اندرکنش شیب‌های معادن روباز از طریق تشکیل یک پایگاه داده‌ها از وضعیت پایداری و اطلاعات کامل شیب‌های معادن روباز در نقاط مختلف جهان انجام می‌گیرد. در نهایت پس از تعریف سطوح خطر ناپایداری، شاخص پیشنهادی با استفاده از اطلاعات جدید (خارج از پایگاه داده‌های کدگذاری) مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد.

نهایتاً فصل هفتم به جمع‌بندی مطالب رساله و مروری بر نتایج حاصله می‌پردازد. در این فصل پیشنهادهای نیز برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

فصل دوم

**اصول مهندسی شیب‌های سنگی در
معادن روباز**

۲-۱- مقدمه

این فصل به منظور مروری بر کلیات روش‌های طراحی شیب‌های معادن روباز و نیز مکانیزم‌های شکست شیب با نگاهی ویژه به شیب‌های بزرگ مقیاس ارائه می‌شود. همچنین رویکردهای کلی در زمینه تحلیل پایداری این ساختارها به طور خلاصه مورد بحث قرار گرفته و به مزایا و محدودیت‌های روش‌های مختلف پرداخته می‌شود، و بدین ترتیب آمادگی جهت ورود به بحث اصلی فصل‌های بعد حاصل می‌گردد. به طور کلی موضوع پایداری شیب‌های سنگی بحث گسترده‌ای بوده و در این فصل تنها بر سرخط‌های اصلی و مخصوصاً مرتبط با موضوع تحقیق که در رابطه با شیب‌های سنگی بزرگ مقیاس معادن روباز است، تمرکز می‌گردد. به منظور آشنایی بیشتر و تفصیلی‌تر با مبحث کلی مهندسی شیب‌های سنگی، مراجعه به منابع اصلی نظیر هوک^۱ و بری^۲ (۱۹۸۱) (و به ویژه نگارش به روز شده آن (Wyllie & Mah, 2004)) توصیه می‌شود.

۲-۲- اجزای طراحی شیب‌های معادن روباز

طراحی شیب معادن روباز نه یک فرآیند استنباطی^۳ بلکه یک فرآیند تکرارشونده^۴ می‌باشد. فرآیندهای استنباطی یا استقرایی بر مبنای نتایج به دست‌آمده از اطلاعات کاملاً قابل اطمینان بنا نهاده می‌شوند. ولی طراحی شیب‌های بزرگ مقیاس بر پایه قضاوت‌هایی مبتنی بر درصد بسیار کمی

^۱ Hoek

^۲ Bray

^۳ Deductive

^۴ Iterative

از نمونه‌ها و همراه با عدم قطعیت بالا انجام می‌گیرد. این موضوع در مورد معادن روباز بزرگ صادق بوده و باعث افزایش تعداد عوامل موثر بر طراحی شیب و در نتیجه افزایش پیچیدگی‌های ژئوتکنیکی می‌گردد (Sullivan, 2006).

از میان مسائل کلیدی که بر پیچیدگی طراحی تأثیرگذار هستند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Franz & Cai, 2008):

- موقعیت معدن و در نتیجه موقعیت جغرافیایی، ژئومورفولوژی و محیطی منطقه؛
- زمین‌شناسی منطقه؛
- شرایط ویژه پروژه؛
- سیستم‌ها و روش‌های معدنکاری مورد استفاده؛
- مقیاس عملیات؛ و
- طرح توسعه معدن و عمر طراحی.

سالیوان^۱ در سال ۲۰۰۶ سه جزء اصلی طراحی تکرارشونده شیب معادن روباز را به این صورت بیان نموده است (Sullivan, 2006):

۱. ارزیابی شرایط، شامل مطالعات ژئوتکنیکی و تشکیل مدل ژئوتکنیکی؛
۲. تحلیل مسئله، شامل شناسایی مکانیزم‌های شکست بالقوه شیب و تحلیل آنها؛ و
۳. آنالیز تصمیم‌گیری به منظور تدوین طراحی شیب روباز.

این اجزا با جزئیات فرآیند آنها و مرتبط با مراحل پیشرفت پروژه در شکل ۲-۱ آورده شده‌اند، که نشان‌دهنده جریان‌های مرتبط و موازی طراحی شیب و اقتصاد یک معدن روباز می‌باشند.

طبیعت تکرارشونده فرآیند طراحی شیب معادن روباز به دلیل تغییر دائمی در میزان دقت اطلاعات فنی و نیز پارامترهای اقتصادی می‌باشد که به عنوان یک مسئله اساسی نیازمند بازبینی پیوسته در

¹ Sullivan

تمام طول عمر معدن می‌باشد. بنابراین تغییرات اساسی در زوایای شیب یک معدن روباز در طول عملیات معدنی مسئله‌ای متعارف به شمار می‌آید.



شکل ۲-۱- نمودار فرآیند طراحی شیب در معادن روباز (Sullivan, 2006)

فرآیند طراحی شیب معادن روباز به شکل مدون آن در حقیقت در طی تقریباً ۲۵ سال گذشته توسعه و تکامل یافته است که هم اکنون به صورت تقریباً استاندارد در دسترس است (همانند کار سالیوان در سال ۲۰۰۶)، هر چند که برخی روش‌ها هنوز در میان طراحان مختلف متغیر می‌باشد. آخرین فرآیند ارائه شده مربوط به رید^۱ و استیسی^۲ در سال ۲۰۰۹ می‌باشد که چهارچوب کلی آن در پنج مرحله بدون توجه به مقیاس پروژه یا ماده معدنی مورد نظر شامل توسعه مدل‌ها، محدوده‌ها، طراحی، تحلیل و پیاده‌سازی ارائه شده است. بر اساس این رویکرد، فرآیند طراحی شیب‌ها در هر سطح یا فاز پروژه اصولاً شامل موارد زیر است (Read & Stacey, 2009):

- تدوین یک مدل ژئوتکنیکی برای محدوده پیت؛
- تهیه مدل جامع با داده‌های برداشت شده مربوطه؛
- تقسیم‌بندی مدل به محدوده‌های ژئوتکنیکی^۳؛
- تقسیم محدوده‌ها به اجزای طراحی^۴؛
- طراحی المان‌های شیب برای هر جزء و محدوده؛
- ارزیابی پایداری شیب‌های به دست آمده بر حسب معیارهای قابل قبول پروژه؛ و
- تعریف نحوه پیاده‌سازی و رفتارسنجی مورد نیاز برای طراحی‌ها.

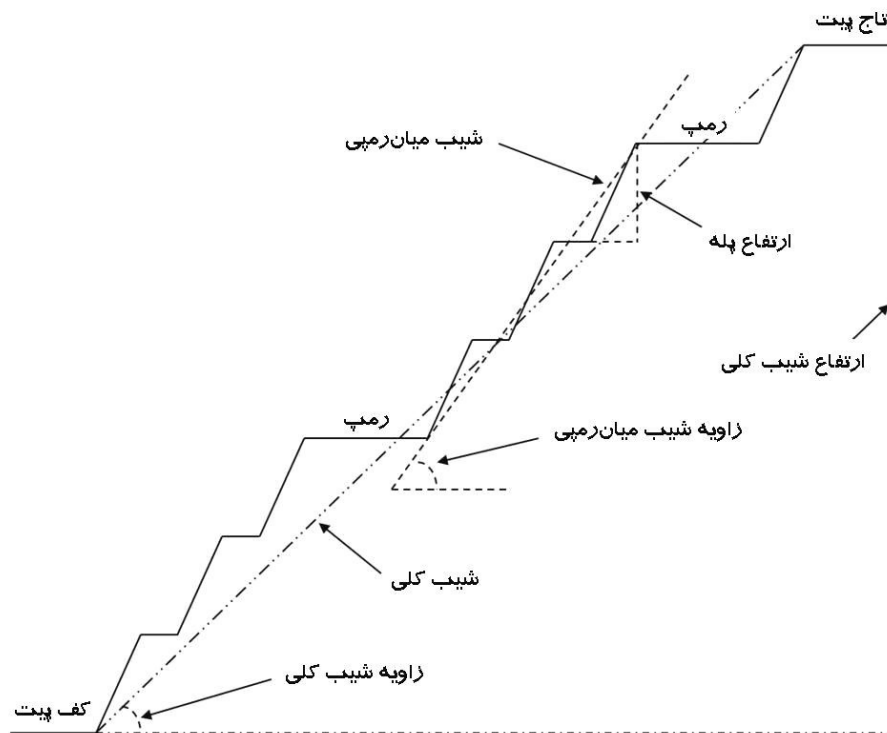
المان‌های طراحی شیب معادن روباز در شکل ۲-۲ نشان داده شده‌اند. زاویه شیب کلی پیت از تاج تا پاشنه پیت شامل تمام رمپ‌ها و پله‌ها اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که زاویه میان‌رمپی بر حسب زاویه هر رمپ کامل تعیین می‌گردد. طراحی پله نیز شامل عرض و ارتفاع آن، زاویه شیب تک‌پله‌ها (یا مجموعه‌ای از پله‌ها) را تعیین می‌کند که به زاویه رخساره پله معروف است.

¹ Read

² Stacey

³ Geotechnical domains

⁴ Design sectors



شکل ۲-۲- هندسه شیب معدن روباز (المان‌های طراحی)

۳-۲- مکانیزم‌های شکست شیب‌های سنگی

با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی یک منطقه، امکان رخ دادن انواع مختلفی از مکانیزم‌های شکست در شیب‌های سنگی وجود دارد. به دلیل تعدد شرایط، بحث در مورد تمام مدهای ممکن شکست شیب‌های سنگی در این رساله امکان‌پذیر نیست. از طرفی برخی از آنها تاکنون به طور کامل شناخته نشده‌اند. با این حال، در ادامه بر مهمترین مدهای شکست و ارتباط آنها با شکست‌های بزرگ مقیاس تمرکز می‌گردد.

کارزولویچ^۱ مکانیزم‌های شکست شیب‌های سنگی را در سه طبقه دسته‌بندی نمود (Karzulovic, 2005 and 2006):

- مکانیزم‌های شکست با کنترل تمام ساختاری^۲

^۱ Karzulovic

^۲ Full structural control

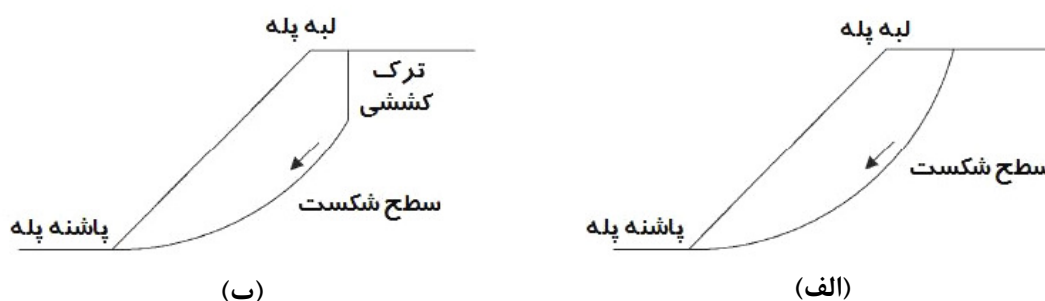
- مکانیزم‌های شکست بدون کنترل ساختاری^۱

- مکانیزم‌های شکست با کنترل ساختاری بخشی^۲

به طور کلی مهمترین مدهای شکست شامل شکست برشی دایره‌ای بدون کنترل ساختاری غالب، و مدهای شکست با کنترل ساختاری صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی می‌باشند. این مدهای شکست اصلی در ادامه معرفی شده و پس از آن مکانیزم‌های شکست بزرگ مقیاس مورد بحث قرار می‌گیرند.

۲-۳-۱- شکست دایره‌ای^۳

شکست برشی دایره‌ای در شیب‌هایی رخ می‌دهد که در آنها نشانه‌ای از یک سیستم کامل ناپیوستگی جهت‌یافته در توده سنگ وجود ندارد و یا توده سنگ بسیار ضعیف و دارای درزه و ترک‌های بسیار زیاد است. در این حالت ساختار توده سنگ پایداری شیب را کنترل نکرده و با شکستی مشابه آنچه در خاک‌ها رخ می‌دهد مواجه هستیم (Hoek & Bray, 1981). سطح لغزش در امتداد کمترین مقاومت شکل گرفته، و مشاهدات نشان داده است که سطح شکست عموماً به شکل دایره‌ای است (شکل ۲-۳-الف). در این نوع شکست معمولاً ترک‌های کششی نیز در رخساره پله نمایان می‌شوند (شکل ۲-۳-ب). نمای کلی سه بعدی هندسه شکست برشی دایره‌ای نیز در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

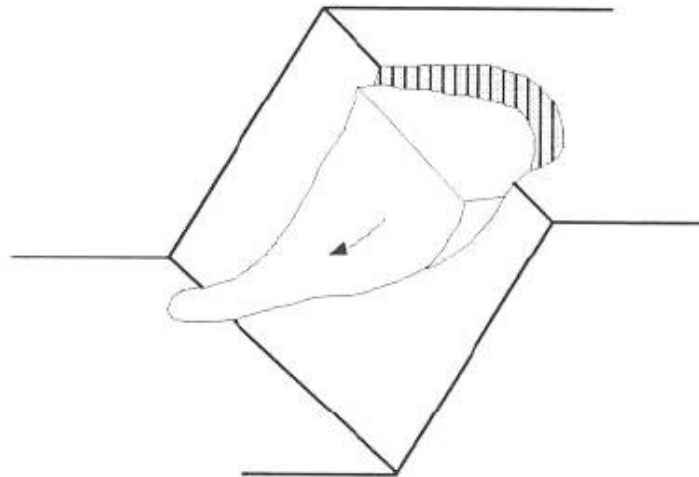


شکل ۲-۳- شکست برشی دایره‌ای: (الف) بدون ترک کششی، (ب) با ترک کششی (Hoek & Bray, 1981)

¹ No structural control

² Partial structural control

³ Circular failure



شکل ۲-۴- شکست برشی دایره‌ای در سه بعد (Hoek & Bray, 1981)

۲-۳-۲- شکست صفحه‌ای^۱/گوه‌ای^۲

شکست برشی صفحه‌ای زمانی رخ می‌دهد که یک بلوک سنگی بر روی یک صفحه ناپیوستگی با شیبی به سمت خارج شیب سنگی بلغزد. در این نوع شکست، پدید آمدن ترک‌های کششی بر رخساره پله بسیار معمول است. وایلی^۳ و ماه^۴ شرط‌های اصلی رخداد شکست برشی صفحه‌ای را این گونه بیان کرده‌اند (Wyllie & Mah, 2004) (این شروط در شکل ۲-۵ نیز نشان داده شده‌اند):

- جهت شیب^۵ صفحه شکست باید موازی یا تقریباً موازی (در محدوده $\pm 20^\circ$ درجه) با رخساره شیب باشد؛

- صفحه شکست بایستی بر رخساره شیب ظاهر شده و زاویه شیب آن (δ) کمتر از زاویه شیب سنگی (α) باشد؛

- زاویه شیب صفحه شکست (δ) باید بزرگتر از زاویه اصطکاک آن (ϕ) باشد؛

- انتهای بالای صفحه لغزش بایستی قسمت فوقانی شیب سنگی و یا ترک کششی را قطع نماید؛ و

¹ Planar failure

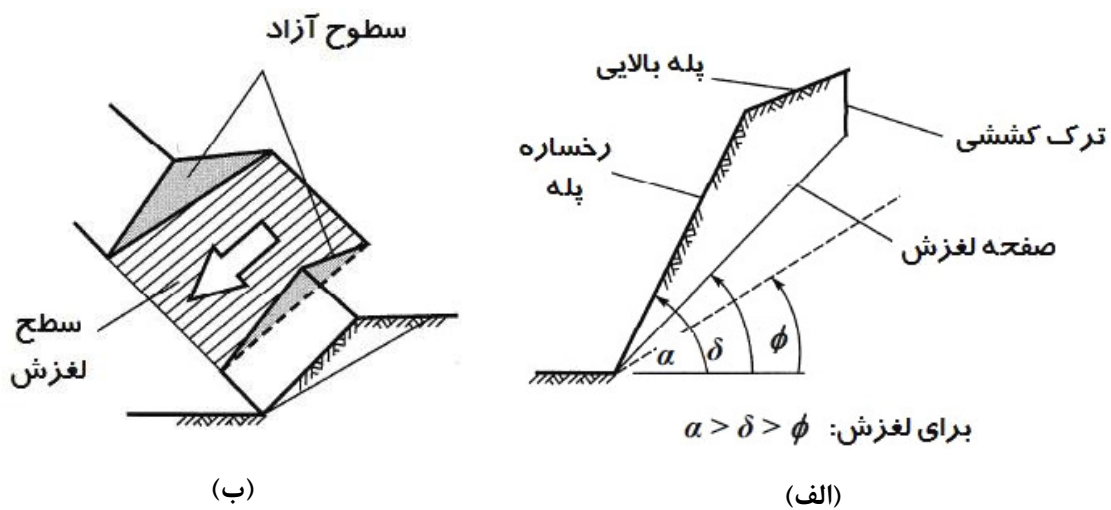
² Wedge failure

³ Wyllie

⁴ Mah

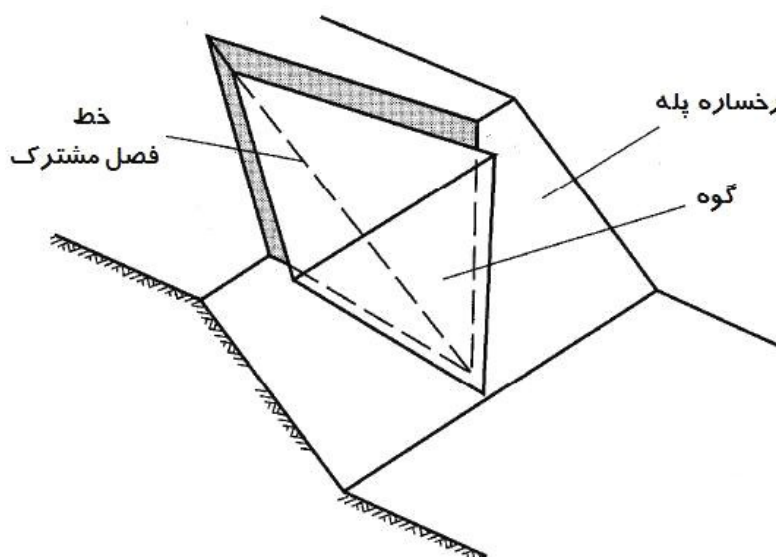
⁵ Dip direction

- به طور کلی سطوح آزاد جانبی باید در توده سنگ وجود داشته باشند.



شکل ۲-۵- شرایط رخداد شکست برشی صفحه‌ای: الف) مقطع عرضی، ب) سطوح آزاد جانبی مورد نیاز برای شکست (Wyllie & Mah, 2004)

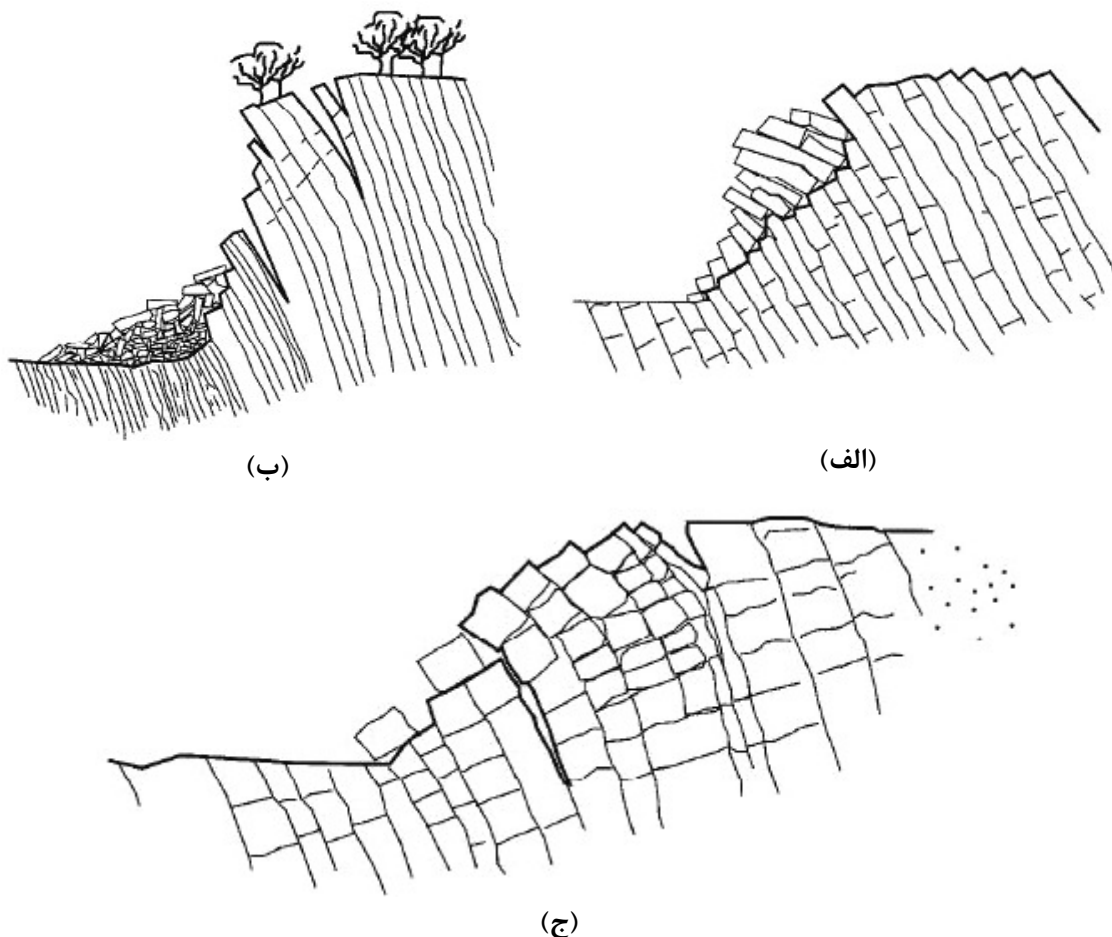
شکست گوه‌ای زمانی رخ می‌دهد که دو ناپیوستگی که به صورت مایل نسبت به شیب سنگی جهت‌یافتگی دارند، همدیگر را قطع نمایند (شکل ۲-۶). شکست گوه‌ای در مقایسه با شکست صفحه‌ای در شرایط هندسی و زمین‌شناسی گسترده‌تری رخ می‌دهد و به همین دلیل در موارد بیشتری از شیب‌های سنگی دیده می‌شود (Wyllie & Mah, 2004).



شکل ۲-۶- شکست گوه‌ای ایجاد شده توسط دو صفحه ناپیوستگی متقاطع (Wyllie & Mah, 2004)

۲-۳-۳- شکست واژگونی^۱

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 خواهد داشت. به این ترتیب حرکت واژگونی می‌تواند خود ترکیبی از لغزش و واژگونی باشد (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004). انواع اصلی شکست واژگونی شامل واژگونی بلوکی^۲، واژگونی خمیده^۳ و واژگونی بلوکی-خمیده است که توسط گودمن^۴ و بری در سال ۱۹۷۶ تشریح شده است و در شکل ۲-۷ قابل مشاهده است.



شکل ۲-۷- مدهای شکست واژگونی معمول: الف) واژگونی بلوکی، ب) واژگونی خمیده، ج) واژگونی بلوکی-خمیده (Goodman & Bray, 1976)

¹ Toppling failure
² Block toppling
³ Flexural toppling
⁴ Goodman

شکست واژگونی خمیده شامل دسته درزه‌ای با تداوم^۱ بالاست که دارای شیب بیشتری نسبت به شیب سنگی است و باعث به وجود آمدن ستون‌های سنگی پیوسته‌ای می‌شود که به صورت خمیده می‌شکنند. اما در شکست واژگونی بلوکی، یک دسته درزه دیگر با فاصله‌اری نسبتاً بالا دسته درزه با شیب زیاد را قطع کرده و باعث به وجود آمدن بلوک‌های سنگی و ریزش بلوک‌ها می‌گردد. در شکست واژگونی بلوکی - خمیده، جابجایی ناپیوستگی‌های متقاطع سبب واژگون شدن ستون‌های سنگی می‌گردد که با واژگونی خمیده سنگ‌های شکسته شده همراه است.

۲-۳-۴- شکست راه-پله‌ای^۲

به طور کلی مکانیزم شکست راه-پله‌ای در مقایسه با سایر مدهای شکست با/بدون کنترل ساختاری کمتر شناخته شده و معروف می‌باشد، در حالی که این مد شکست در واقعیت بیشتر رخ می‌دهد. به طور خاص در شیب‌های بزرگ مقیاس، یک صفحه شکست تنها که باعث شکست برشی صفحه‌ای گردد معمولاً به ندرت ایجاد می‌گردد. ولی این شکست در امتداد چندین صفحه لغزش کوچکتر که در نهایت شکل یک "راه-پله" را به خود می‌گیرد از احتمال رخداد بالاتری برخوردار است (Stead et al., 2007).

در فضای دو بعدی، در صورتی که دو دسته درزه توأم (که به خوبی توسعه یافته‌اند) در شیب سنگی وجود داشته باشند که امتداد هر دوی آنها تقریباً موازی با امتداد شیب سنگی باشد، شکست راه-پله‌ای می‌تواند کاملاً با کنترل ساختاری رخ دهد (شکل ۲-۸-الف). اما اگر فقط دسته درزه با شیب کمتر بخوبی توسعه یافته باشد، شکست راه-پله‌ای اصلی تنها در صورتی رخ خواهد داد که پله‌هایی از سنگ بکر نیز قبلاً^۳ دچار شکست گردند (شکل ۲-۸-ب) (این امر به خوبی اهمیت بالای

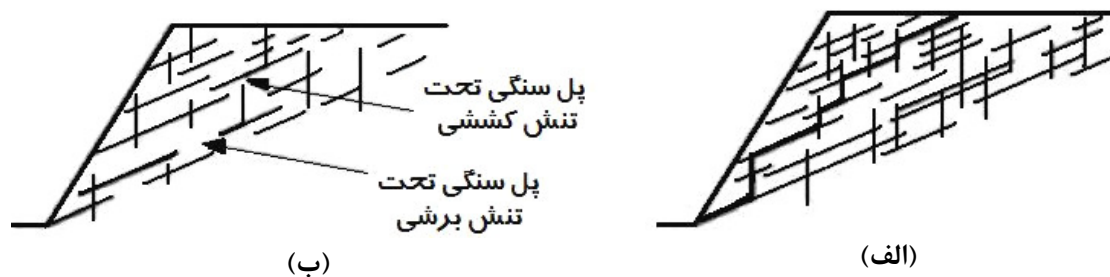
¹ Persistence

² Step-path failure

³ Strike

⁴ Intact rock bridges

مقاومت سنگ بکر را در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی نشان می‌دهد).



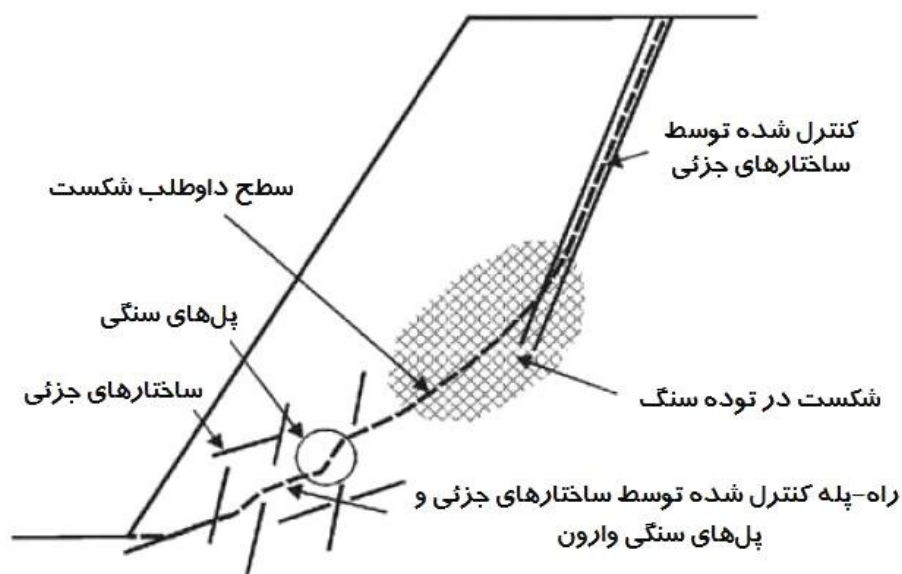
شکل ۲-۸- هندسه مکانیزم راه-پله‌ای در یک شیب سنگی: الف) راه-پله‌ای پیوسته، ب) راه-پله‌ای ناپیوسته با پل‌های سنگ بکر (Call & Nicholas, 1978)

۲-۳-۵- شکست در شیب‌های سنگی بزرگ مقیاس

رخداد شکست‌هایی با مکانیزم کنترل ساختاری نظیر شکست‌های برشی صفحه‌ای و گوه‌ای نیازمند وجود ساختارهای زمین‌شناسی اصلی در همان مقیاس شیب سنگی مورد مطالعه است. مکانیزم‌های شکست بدون کنترل ساختاری نیز مدل ژئوتکنیکی را در نظر می‌گیرند که بر پایه خصوصیات توده سنگ خردشده یا خاک مانند است (و در آن فرض می‌شود که توده سنگ توسط ناپیوستگی‌های متعددی تا حد زیادی ضعیف شده است). هوک و همکاران متذکر شده‌اند که این دو دسته به تنهایی برای تحلیل شیب‌های بزرگ مقیاس کافی نبوده و در حقیقت در این مورد، مدهای شکست گوناگون در اندرکنش با یکدیگر باعث به وجود آمدن شکست نهایی می‌گردند (Hoek et al., 2000a). برای مثال، شکست در امتداد ناپیوستگی‌ها و شکست در سنگ بکر در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.

ناپیوستگی‌های کنترل کننده شیب معمولاً قبل از حفاری و به وجود آمدن شیب سنگی در توده سنگ وجود دارند، با این حال امکان رشد ترک‌ها و شکست‌هایی که احتمالاً منجر به وجود آمدن سطوح شکست بزرگ مقیاس می‌گردند در هر زمانی از حفاری (به دلیل تغییر در تنش‌ها و کرنش‌های مرتبط با شیب) وجود دارد. استیسی بیان می‌دارد که دانش کنونی از نظر شناخت رفتار و مکانیزم‌های

شکست شیب‌های بزرگ مقیاس محدود بوده و این مسئله به طور خاص در مورد شیب‌هایی که در شرایط تنش‌های برجای بالاتری هستند، حادث می‌باشد (Stacey, 2006a). این مسئله در حال حاضر "بسیار جدی" تلقی می‌شود، چرا که امروزه عمق معادن روباز بزرگ به تدریج از مرز ۱۰۰۰ متر نیز فراتر می‌رود.



شکل ۲-۹- سطح شکست در شیب سنگی بزرگ مقیاس شامل مکانیزم‌های شکست مختلف (Hoek et al., 2000a)

برخی محققان در گذشته به نقش پله‌های سنگ بکر (شکل ۲-۹) در پایداری شیب‌های سنگی بزرگ مقیاس پرداخته‌اند که از میان آنها می‌توان به دایت^۱ اشاره کرد که از آنها به عنوان ساختارهای "ناشناخته" در تعدادی از ناپایداری‌های تجربه شده یاد کرده است (Dight, 2006). براون^۲ خاطر نشان می‌کند که چنین مکانیزم‌های شکستی به سختی قابل پیش‌بینی هستند، و اغلب مسیر شکست به راحتی قابل پیش‌بینی نیست (Brown, 2004). رخ دادن چندین شکست اصلی از این نوع در معادن روباز بزرگ در سال‌های اخیر باعث شده است که این مد شکست بیشتر از قبل مورد توجه محققان قرار گیرد (Stacey, 2006b and 2006c).

¹ Dight
² Brown

هوک و همکاران مثالی از یک شکست گوه‌ای شکل به ارتفاع ۱۶۵ متر را در یک شیب سنگی معدن روباز ارائه کرده‌اند که در آن گسل‌های پشتی و جانبی در ۵ تا ۷ پله بالای نقش کنترل ساختاری را بازی می‌کنند (شکل ۲-۱۰). با این حال، در تحلیل‌های پس از شکست این موضوع روشن نشد که آیا شکست در سه پله پایینی در نتیجه یک گسل با شیب کم بوده، یا در اثر اتساع توده سنگ به شدت درزه‌خورده و ناشی از شکست در توده سنگ ضعیف شده بوده است (Hoek et al., 2000a). بنابراین هوک و همکاران خاطر نشان می‌کنند که نیاز فراوانی به مطالعات اصولی و سیستماتیک برای مشخص نمودن جنبه‌هایی از زمین‌شناسی که بایستی در تحلیل شیب‌های سنگی پیچیده و عمیق در نظر گرفته شود، وجود دارد. همین طور، چگونگی اندرکنش این پارامترها در سطوح تنش در چنین مقیاسی و نیز تأثیر این فاکتورهای بحرانی در توسعه مکانیزم‌های شکست اصلی از اهمیت فراوانی برخوردار است (Hoek et al., 2000b).



شکل ۲-۱۰- نمونه‌ای از یک شکست شیب بزرگ مقیاس با کنترل ساختاری بخشی و مکانیزم شکست تا حد زیاد ناشناخته (Hoek et al., 2000a)

در نهایت به طور خلاصه، واضح است که علیرغم بهبودهای صورت گرفته در سال‌های اخیر در روش‌های برداشت و جمع‌آوری اطلاعات و توسعه ابزارهای پیشرفته عددی، مکانیزم‌های شکست تلفیقی بزرگ مقیاس هنوز به حد کافی شناخته شده نیستند. بنابراین، برآون ادعان می‌دارد که توسعه رویکردهای سیستماتیک به منظور شناسایی شکست‌های بزرگ مقیاس در شیب‌های سنگی، احتمالاً^۱ "برجسته‌ترین نیاز تحقیقاتی ژئومکانیکی" در معدنکاری روباز است (Brown, 2004).

۲-۴- رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

روش‌های متعددی برای طراحی و تحلیل پایداری شیب‌های سنگی در گذشته توسعه داده شده‌اند که هدف نهایی تمامی آنها حصول اطمینان از دستیابی به شیب‌های پایدار می‌باشد. تمام این روش‌ها در یک نقطه اشتراک دارند: تلاش همگی آنها در این است تا پیش‌بینی کنند که "شکست"^۱ یا "ناپایداری"^۲ چه زمانی رخ خواهد داد.

ذکر این نکته اهمیت دارد که عبارت‌های "شکست" و "ناپایداری" در موارد مختلف مفاهیم متفاوتی را دارا هستند. در یک عملیات معدن روباز بزرگ مقیاس، شکست‌ها و تغییرشکل‌های کوچک مقیاس در شیب‌ها بعضاً^۱ می‌تواند قابل قبول باشد. بنابراین تا زمانی که شیب قابل مدیریت و در کنترل بوده و مانعی برای عملیات (تا حد غیر قابل قبول) پیش نیاید، واژه "ناپایداری" به خوبی می‌تواند رفتار شیب را تشریح نماید. این تعریف در تضاد کامل با رویکرد رایج در مهندسی عمران است که در آن تغییرشکل‌هایی در این حد اغلب با عنوان "شکست" شیب در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، شیب‌های سنگی نگهدارنده پایه‌های یک پل، معمولاً^۲ بایستی مقادیر بسیار پایینی از جابجایی را تحمل نمایند که در غیر این صورت پروژه با مشکل جدی مواجه خواهد شد. در معدنکاری روباز بزرگ مقیاس، "شکست" شیب رخدادی است که سبب ایجاد وقفه عمده در عملیات معدنی نظیر از بین

¹ Failure

² Instability

رفتن مسیرهای انتقال مواد یا نوار نقاله می‌گردد (Hoek et al., 2000a). بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت که وجه تمایز میان "ناپایداری" و "شکست" به معیارهای خاص پروژه و کاربرد شیب‌های سنگی مورد نظر بستگی دارد.

بر مبنای چنین مفاهیمی از پایداری شیب، این پدیده می‌تواند توسط پارامترهایی به صورت عددی به شرح زیر بیان گردد (Wyllie & Mah, 2004):

الف- ضریب ایمنی^۱: نشان‌دهنده میزان تعادل و پایداری یک شیب است و چنانچه $FOS > 1$ باشد، وضعیت آن پایدار می‌باشد.

ب- جابجایی یا کرنش^۲: شکست می‌تواند توسط کرنش‌ها و جابجایی‌هایی شروع شود که به اندازه‌ای بزرگ هستند که قادرند شرایط ناامنی را برای انواع فعالیت‌ها ایجاد نمایند.

ج- احتمال شکست^۳: پایداری را می‌توان از طریق توزیع احتمال تفاضل بین نیروهای جداکننده و مقاوم به صورت عددی درآورد. در این حالت، هر یک از نیروها نیز دارای توزیع احتمال جداگانه‌ای خواهند بود.

امروزه استفاده از ضریب ایمنی جزو مرسوم‌ترین روش‌ها 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^۴ ضریب ایمنی مورد قبول برای انواع مختلف 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 ترزاچی^۴ و همکاران و انجمن ژئوتکنیک کانادا^۵ اشاره نمود (Terzaghi et al., 1997; Canadian Geotechnical Society, 1992). مفهوم ضریب ایمنی در طراحی شیب‌های معادن روباز نیز به طور معمول مورد

¹ Factor of Safety (FOS)

² Strain

³ Probability of Failure

⁴ Terzaghi

⁵ Canadian Geotechnical Society

استفاده قرار می‌گیرد؛ با این حال، این ضریب اغلب شاخصی بر پایه تجربه و قضاوت طراح شیب است که تمام مراحل جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sullivan, 2005) و بنابراین بایستی با در نظر گرفتن تکنیک‌های برداشت و پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی مورد استفاده در تحلیل‌ها در مورد آن قضاوت گردد (Mostyn & Li, 1993).

در این بخش به معرفی رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی با توجه ویژه به کاربرد آنها در معادن روباز پرداخته شده و در هر مورد به مزایا و محدودیت‌های آنها اشاره می‌گردد.

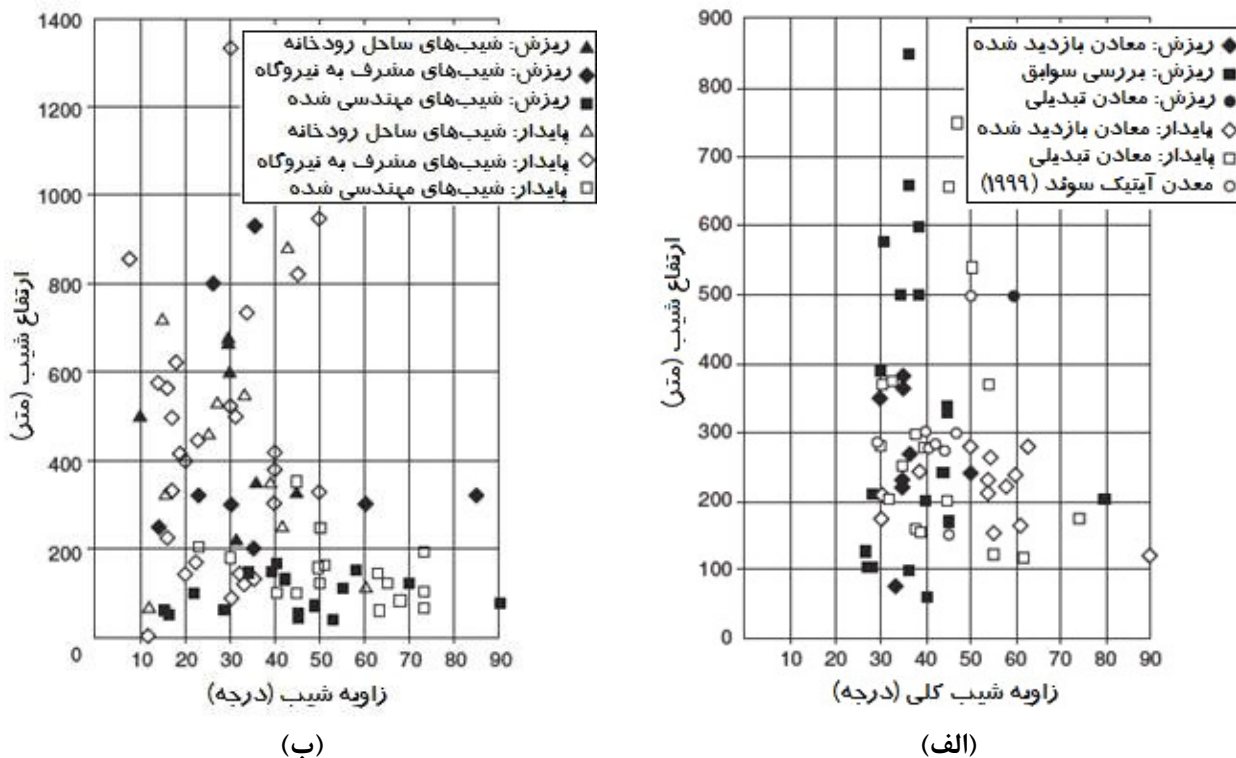
۲-۴-۱- روش‌های تجربی

هوک و بری یک رابطه تجربی میان زاویه شیب کلی و ارتفاع شیب معادن روباز ارائه کردند که در اصل بر مبنای اطلاعات جمع‌آوری شده توسط لوتون^۱ در ۱۹۷۰ و راس-براون^۲ در ۱۹۷۳ می‌باشد (Hoek & Bray, 1981). در مورد پیت‌های عمیق (شیب‌های مرتفع)، این روش بر پایه اطلاعات محدودی است، که این واقعیت را آشکار می‌سازد که در شیب‌های مرتفع یک زاویه شیب کم به طور ثابت صدق می‌کند. سوبرگ^۳ در سال ۱۹۹۹ نیز رابطه‌ای گرافیکی برای زاویه شیب/ارتفاع شیب در معادن روباز و شیب‌های طبیعی و مهندسی شده ارائه کرده است که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که شیب‌های ناپایدار در محدوده گسترده‌ای از مقادیر ارتفاع شیب (در زاویه شیب ثابت) و نیز زاویه شیب (در ارتفاع شیب ثابت) رخ می‌دهد، که نشان می‌دهد در این رویکرد به عواملی نظیر زمین‌شناسی منطقه و ساختارهای سنگی به هیچ وجه توجه نشده است.

^۱ Lutton

^۲ Ross-Brown

^۳ Sjoberg



شکل ۲-۱۱- رابطه میان ارتفاع و زاویه شیب: الف) شیب‌های سنگی معادن روباز (Sjoberg, 1999).

ب) شیب‌های طبیعی و مهندسی شده (Sjoberg, 1999; data from Chen 1995a,b)

علاوه بر این روش‌ها، سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ نیز به منظور تحلیل پایداری شیب‌ها ارائه شده‌اند، که مهمترین آنها با قابلیت کاربرد در شیب‌های معادن روباز عبارتند از:

- سیستم طبقه‌بندی شیب‌های سنگی پیشنهاد شده توسط هاینس^۱ و تربروگ^۲ در سال ۱۹۹۱ و هاینس در سال ۱۹۹۳ که بر مبنای سیستم^۳ MRMR (Laubscher, 1990) بوده و در سال ۱۹۹۹ توسط دوران^۴ و داگلاس^۵ مجدداً بهبود یافته است (Haines, 1993; Duran & Douglas, 1999)؛

- سیستم‌های طبقه‌بندی^۶ SMR (Romana, 1985 and 1993) و^۷ CSMR (Chen, 1995a) که

^۱ Haines

^۲ Terbrugge

^۳ Mining Rock Mass Rating

^۴ Duran

^۵ Douglas

^۶ Slope Mass Rating

^۷ Chinese Slope Mass Rating

با تغییرات و بهبودهای اعمال شده بر روی سیستم رده‌بندی توده سنگ^۱ RMR^۱ پیشنهادی توسط بینیاوسکی^۲ در ۱۹۸۹ به دست آمده‌اند (Bieniawski, 1989)؛ و

- سایر سیستم‌های طبقه‌بندی نظیر سیستم ارزیابی ریزش شیب سنگی (RDA^۳) پیشنهاد شده توسط نیکلسون^۴ (Nicholson, 2002 and 2004)، طبقه‌بندی احتمالاتی شیب سنگی (SSPC^۵) توسط هک^۶ و همکاران (Hack et al., 2003)، رده‌بندی ایمنی شیب‌های سنگی آتشفشانی (VRFSR^۷) به وسیله سینگ^۸ و کنولی^۹ (Singh & Connolly, 2003)، شاخص خطر سقوط سنگ (FRHI^{۱۰}) توسط سینگ (Singh, 2004)، سیستم ارزیابی ریسک سقوط سنگ (ROFRAQ^{۱۱}) پیشنهاد شده توسط آلخانو^{۱۲} و همکاران (Alejano et al., 2008) و سیستم ارزیابی پایداری شیب معادن روباز زغال‌سنگ (OPCASSTA-COAL^{۱۳}) توسط جهانوار^{۱۴} (Jhanwar, 2012).

سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ و به طور کلی رویکردهای تجربی از نتایج تجربیات در نقاط خاصی از دنیا و نوع بخصوصی از توده سنگ‌ها در شرایط محلی خاص به دست آمده‌اند. 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 (Pantelidis, 2009). از طرف دیگر روش‌های تجربی از دقت کافی برای استفاده در طراحی شیب نهایی معادن روباز برخوردار نیستند. بنابراین علیرغم اینکه نمودارهای عملکرد و سیستم‌های طبقه‌بندی شیب‌ها اطلاعات با ارزشی را در

¹ Rock Mass Rating

² Bieniawski

³ Rockslope Deterioration Assessment

⁴ Nicholson

⁵ Slope Stability Probability Classification

⁶ Hack

⁷ Volcanic Rock Face Safety Rating

⁸ Singh

⁹ Connolly

¹⁰ Falling Rock Hazard Index

¹¹ Rockfall Risk Assessment for Quarries

¹² Alejano

¹³ Opencast Slope Stability Assessment System for Coal Mines

¹⁴ Jhanwar

اختیار ما قرار می‌دهند، کاربرد اصلی آنها محدود به مرحله مطالعات امکان‌سنجی پروژه می‌باشد (Franz, 2009). این مسئله بخصوص در مورد طراحی شیب معادن روباز بزرگ مقیاس که کمبود اطلاعات مانع از تهیه نمودارهای معتبر طراحی تجربی می‌گردد، مشهودتر است.

۲-۴-۲- روش استریوگرافیک^۱

معمولاً^۲ اولین گام‌ها در طراحی شیب‌های سنگی شامل مطالعات زمین‌شناسی ساختاری و در ادامه یک آنالیز حرکتی^۳ است که در آن مدهای شکست با کنترل ساختاری به وسیله روش استریوگرافیک مشخص می‌گردند. نتیجه این کار، تعیین مناطقی از معدن است که شیب‌های سنگی در آنها بیشتر در معرض شکست (طبق مدهای شکست تعریف شده) قرار دارند (شکل ۲-۱۲).

روش‌های استریوگرافیک اصولاً^۴ بر مبنای امکان‌سنجی شکست در نتیجه ایجاد حرکت گوه‌ها یا صفحات لغزش در شیب‌های سنگی می‌باشند (Hoek & Bray, 1981). در این روش‌ها، نیاز است که ساختار توده سنگ و هندسه دسته درزه‌های موجود که ممکن است باعث ناپایداری در بلوک‌ها شوند، مورد ارزیابی قرار گیرد. این کار می‌تواند با استفاده از شبکه‌های استریونت (شبکه‌های هم‌زاویه ولف^۳، هم‌سطح اشمیت^۴ و یا قطبی) و یا نرم‌افزارهای کامپیوتری صورت گیرد که در هر حال تأکید بر ارزیابی امکان ایجاد گوه‌ها و صفحات در توده سنگ می‌باشد (Eberhardt, 2003; Wyllie & Mah, 2004).

از مزایای روش استریوگرافیک 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 نظریه بلوکی می‌دهد. همین‌طور، 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 غیربحرانی بکار برده می‌شود. در این روش، ناپیوستگی‌های

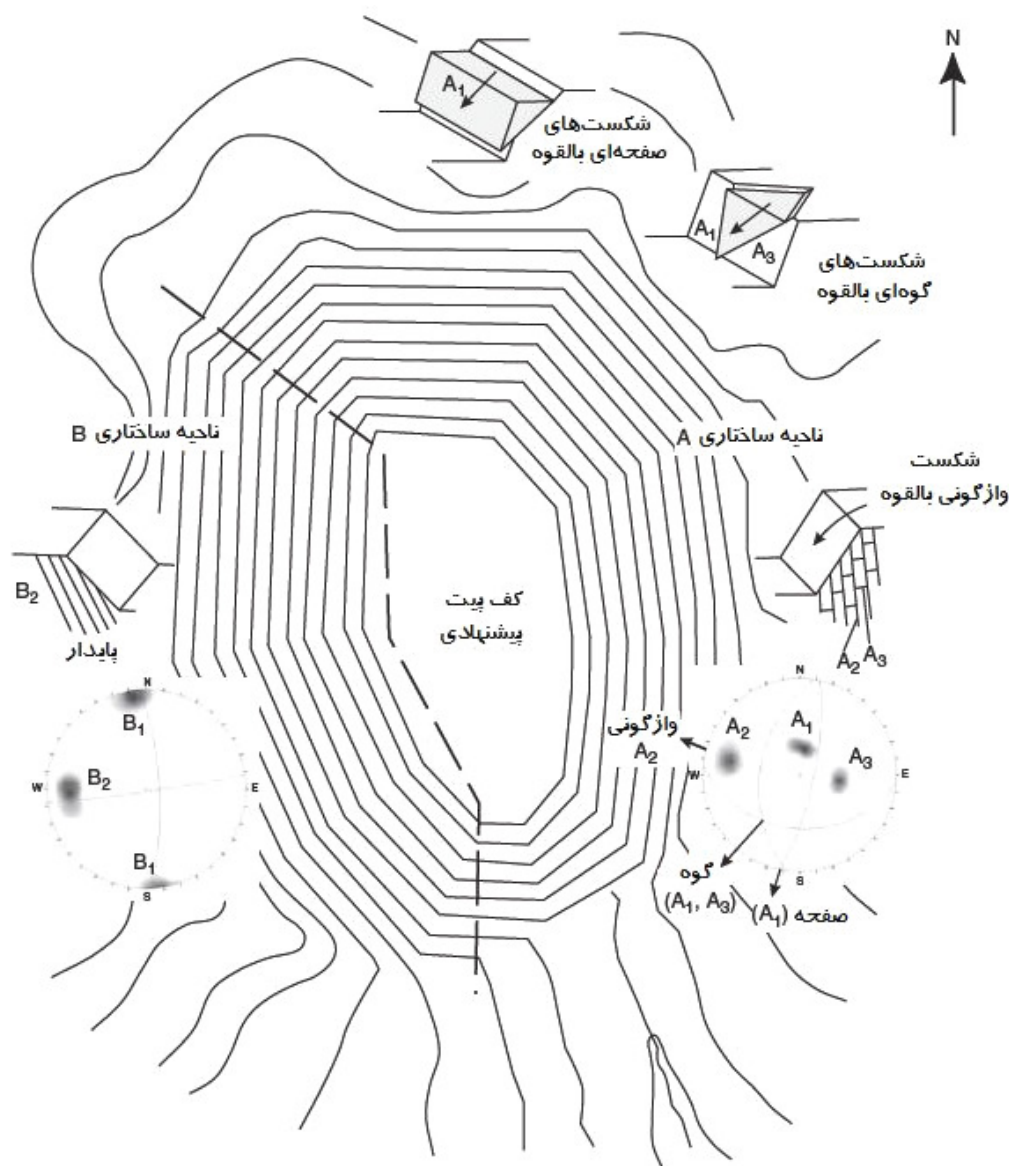
¹ Stereographic method

² Kinematic analysis

³ Wulff

⁴ Schmidt

مهم و تعیین‌کننده در شیب سنگی بایستی مشخص گردند. علاوه بر اینها، در روش مذکور تنها از داده‌های مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها استفاده شده و از سایر مشخصات مهم درزه‌ها صرف‌نظر می‌شود، و بنابراین تنها برای یک ارزیابی اولیه از وضعیت پایداری شیب‌های سنگی بکار می‌رود (Eberhardt, 2003). در مورد معادن روباز، استفاده از روش استریوگرافیک از بخش‌های مهم فرآیند طراحی پله‌ها است، ولی به دلایل ذکر شده در بالا، نقش آن در تحلیل پایداری شیب‌های بزرگ مقیاس بسیار محدود می‌باشد (Franz, 2009).

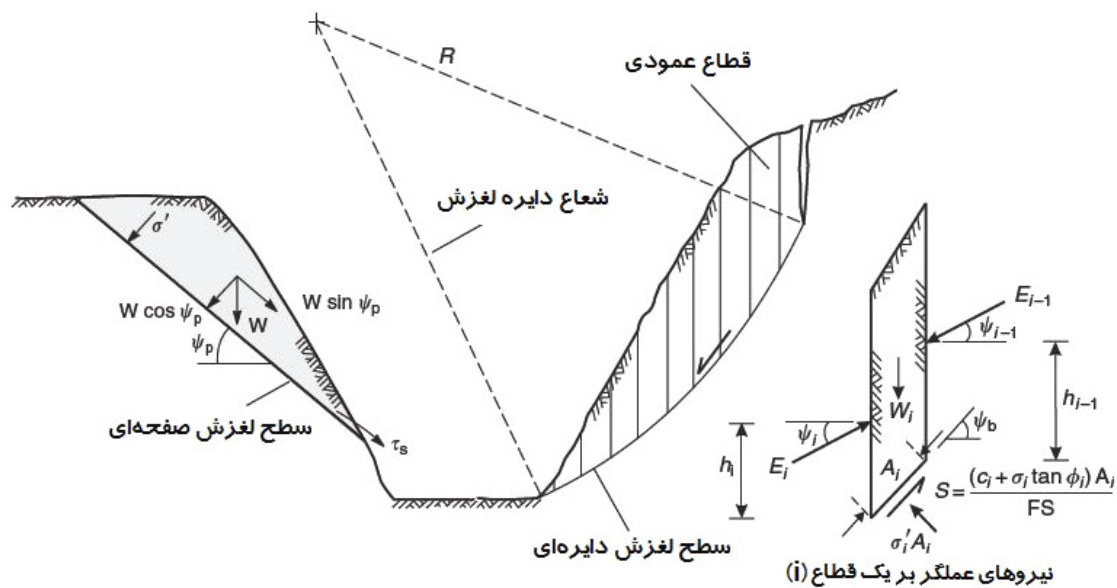


شکل ۲-۱۲- نمایش زمین‌شناسی ساختاری بر روی استریونتها و ارزیابی اولیه پایداری شیب برای یک معدن روباز (Wyllie & Mah, 2004)

۲-۴-۳- روش‌های تحلیل تعادل حدی^۱

روش‌های تعادل حدی در تحلیل پایداری و حرکت انتقالی یا دایره‌ای صفحات جدا شده از شیب‌ها کاربرد بسیار مرسوم دارند. مهمترین تحقیقات منجر به توسعه این روش‌ها در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی انجام گرفته است. این تحلیل‌ها اغلب به یک ضریب ایمنی (FOS) ختم می‌شوند که همان نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک (وارده) و شروع‌کننده جابجایی در امتداد یک سطح شکست می‌باشد. رویکرد دیگر، استفاده از آنالیز برگشتی و به دست آوردن پارامترهای برشی در لحظه شکست است. طبق تعریف، یک شیب سنگی در شرایط تعادل حدی قرار دارد به شرطی که نیروهای محرک برابر با نیروهای مقاوم باشند ($FOS = 1$). مقادیری از FOS که به طور معمول برای طراحی شیب‌های معادن روباز قابل قبول هستند در جدول ۲-۱ آورده شده‌اند.

این روش‌ها با توجه به مکانیزم شکست شیب به سه دسته آنالیز حرکت انتقالی (صفحه‌ای و گوه‌ای)، واژگونی و دایره‌ای تقسیم می‌شوند (Wyllie & Mah, 2004). شکل ۲-۱۳ سطوح شکست و تحلیل آنها را برای دو نوع شکست صفحه‌ای و دایره‌ای نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۳- شکست صفحه‌ای و دایره‌ای (Wyllie & Mah, 2004)

¹ Limit equilibrium methods

جدول ۱-۲- ضرایب ایمنی برای طراحی شیب‌های معادن روباز (Sullivan, 2006)

ضریب ایمنی مورد استفاده یا قابل قبول در عمل		موقعیت طراحی	
مقدار ترجیحی (%)	محدوده (%)	شرایط ژئوتکنیکی	المان طراحی
۱/۲	۱/۲-۱/۳ ^(۱)	شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی ساده	طراحی کلی شیب
۱/۳	-	زمین‌شناسی پیچیده، خاک یا سنگ نرم	
۱/۱	۱/۰-۱/۳	پایداری یک شیب در حال ریزش	
۱/۱	-	تحلیل بازگشتی شکست بزرگ مقیاس	
۱/۳	۱/۲-۱/۵ ^(۲)	-	شیب زیرین رمپ یا یک زیرساخت کلیدی

^(۱) هوک و براون (۱۹۸۱) مقدار ۱/۵ را برای این مورد توصیه کرده‌اند.

^(۲) هوک و براون (۱۹۸۱) مقدار ۱/۳ و نیز انتخاب محافظه‌کارانه پارامترهای مقاومتی را پیشنهاد کرده‌اند.

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). از طرف دیگر، این روش‌ها هیچ یک از شرایط معادلات مکانیک محیط‌های پیوسته را به طور کامل ارضا نمی‌کنند. علاوه بر این، در رویکرد تحلیل تعادل حدی، مقاومت برشی در تمام طول صفحه شکست یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان انتظار داشت که این روش‌ها تنها در شرایطی نتایج قابل قبولی ارائه دهند که صفحه شکست و یا مکانیزم شکست شیب بحرانی از قبل شناخته شده باشد (Franz, 2009).

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

شکست‌های صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی و دایره‌ای است. همچنین این روش‌ها قابلیت انجام آنالیز حساسیت ضریب ایمنی برای تغییر در هندسه و ابعاد شیب و خصوصیات مواد را دارند. همین طور با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه می‌توان شیب‌هایی متشکل از چند نوع سنگ با جنس‌های مختلف را مورد تحلیل قرار داد. با این حال، ضریب ایمنی که در روش‌های مربوط به تعادل حدی تنها پارامتر خروجی به حساب می‌آید، به هیچ وجه نشان‌دهنده مکانیزم ناپایداری نیست. همچنین در تحلیل تعادل حدی، دو پارامتر جابجایی‌ها و شکست در سنگ بکر هرگز در نظر گرفته نمی‌شوند. ساده‌سازی‌های اعمال شده در اصول نظری این روش‌ها، اصلی‌ترین عامل چنین محدودیت‌هایی است که باعث می‌گردد تحلیل تعادل حدی در برخی موارد با مشکلات اساسی روبرو شود (Aryal, 2006; Eberhardt, 2003).

۲-۴-۴- روش‌های احتمالاتی

به طور کلی، روش‌های 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 قدری 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 شیب سنگی بر مبنای روش احتمالاتی، تغییرات و انحرافات طبیعی (واقعی) پارامترهای ورودی در نظر گرفته شده و تأثیر آنها بر پایداری شیب سنجیده می‌شود در این روش معمولاً برای هر پارامتر محدوده‌ای از مقادیر یک تابع احتمال (که معمولاً یک تابع توزیع نرمال است) اختصاص یافته و سپس احتمال شکست برآورد می‌شود. در واقع در این روش، احتمال شکست به جای ضریب ایمنی به دست می‌آید که نسبت به بیان پایداری یک سیستم مانند پایداری شیب با استفاده از ضریب ایمنی

قطعی به واقعیت نزدیکتر است. احتمال شکست عموماً^۱ از مقایسه نیروهای مقاوم و محرک و با استفاده از یکی از روش‌های زیر به دست می‌آید (Hack et al., 2003):

- روش حاشیه اطمینان^۱، که در آن نیروهای مقاوم و محرک به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته می‌شوند؛ و
- روش مونت کارلو^۲، که مناسب‌ترین روش برای مسائلی است که شامل پارامترهای متعدد هستند. این روش امروزه متداول‌ترین روش تحلیل پایداری احتمالاتی شیب‌های سنگی می‌باشد.

در تحلیل‌های احتمالاتی از روش‌هایی مشابه روش‌های طراحی (تحلیل) قطعی استفاده می‌شود. همچنین مکانیزم‌های شکست و مدلی که چگونگی این شکست را توضیح دهد، بایستی شناخته شده باشند. بنابراین مرحله اول تحلیل‌های احتمالاتی در شیب‌های سنگی بر مبنای مدل‌های شکست بکار گرفته شده در روش‌های تعادل حدی است، با این تفاوت که در روش‌های احتمالاتی توزیع‌های آماری پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد بر اساس روابط موجود میان توزیع‌های آماری پارامترهای ورودی و میزان احتمال شکست، این احتمال محاسبه می‌گردد (Wyllie & Mah, 2004). مقادیری از احتمال شکست که به طور معمول در عمل برای طراحی شیب‌های معادن روباز قابل قبول هستند در جدول ۲-۲ آورده شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود، احتمال ۱ درصدی برای طراحی شیب کلی پیشنهاد شده است، در حالی که برای طراحی شیب پله احتمال شکست ۵۰-۱۰ درصد نیز قابل قبول به نظر می‌رسد.

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،

^۱ Margin of safety

^۲ Monte Carlo

نیست. یکی از دلایل آن را می‌توان مشکلات مربوط به بیان کمی و عددی یک توده سنگ و همچنین تعیین یک مدل معرف جهت تحلیل میزان نیروی مقاوم و بار اعمالی روی هر المان از توده سنگ دانست (Young, 1993).

جدول ۲-۲- احتمال‌های شکست برای طراحی شیب‌های معادن روباز (Sullivan, 2006)

احتمال شکست مورد استفاده یا قابل قبول در عمل		موقعیت طراحی		
مقدار ترجیحی (%)	محدوده (%)	شرایط ژئوتکنیکی	کاربرد	المان طراحی
-	۱۰-۵۰	-	کلی	شیب پله
۱۰	۰-۱۰	ضعف‌های پیوسته		
۲۰-۳۰	۱۰-۵۰	ضعف‌های ناپیوسته		
-	۱-۳	-	کلی	شیب کلی یا میان‌رمپی
-	<۱	-	-	شیب کلی یا میان‌رمپی دربرگیرنده یک زیرساخت کلیدی

همان طور که ذکر گردید، 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 ضریب ایمنی واحد تحلیل نمایند. با این حال، این روش‌ها به داده‌ها و اطلاعات ورودی بسیار زیادی به منظور استفاده در توزیع‌های احتمال پارامترها نیازمند می‌باشند. 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).

۲-۴-۵- 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 مکانیزم 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. استید^۱ و همکاران خاطر نشان می‌کنند که شروع و رخداد مکانیزم‌های شکست در شیب‌ها ممکن است شامل سطوح جابجایی قابل تحلیل با روش تعادل حدی ایده‌آل شده باشد، ولی فرآیندهایی که سبب لغزش می‌گردند بسیار پیچیده‌تر از آن هستند که بتوان به سادگی آنها را با تعادل نیروهای مقاوم و محرک بیان نمود (Stead et al., 2006). 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 و 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).

روش‌های عددی یاد شده 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 توده سنگ‌های به شدت درزه‌خورده بهترین ابزار به شمار می‌رود که شامل روش‌های تفاضل محدود (FDM^۲)، المان محدود (FEM^۳) و المان مرزی (BEM^۴) می‌باشد. اما مدل‌سازی ناپیوسته برای شیب‌هایی مناسب است که توسط رفتار ناپیوستگی‌ها

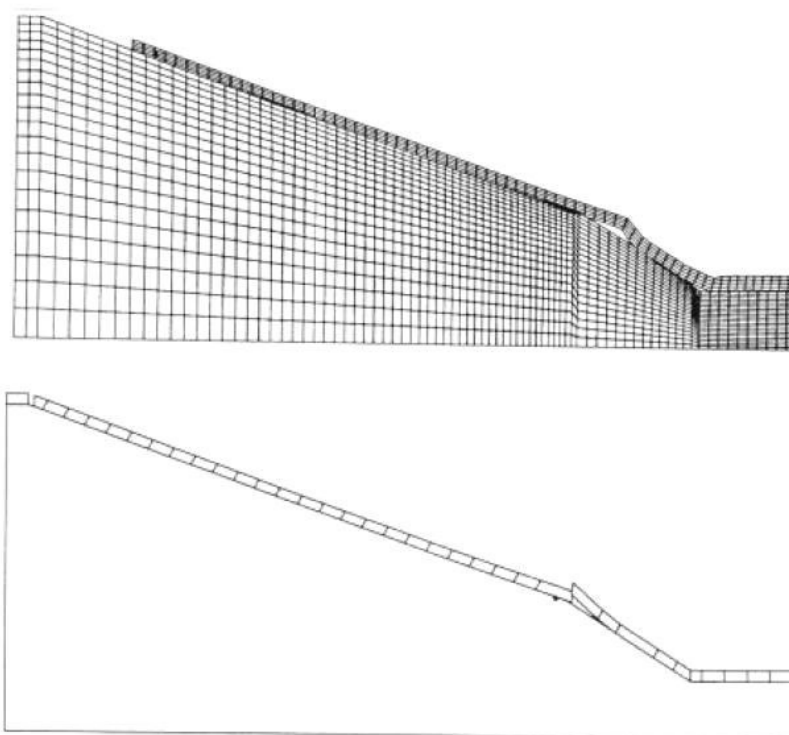
^۱ Stead

^۲ Finite Difference Method

^۳ Finite Element Method

^۴ Boundary Element Method

کنترل می‌شوند و شامل روش المان مجزا (DEM¹) می‌باشد (Eberhardt, 2003; Franz, 2009). 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. شکل ۲-۱۴ کاربرد دو نوع مدل‌سازی پیوسته و ناپیوسته را در یک مسئله پایداری شیب سنگی (یک شکست کمانشی پیچیده در امتداد یک شیب معدن روباز زغال‌سنگ) نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۴- روش‌های مدل‌سازی عددی پیوسته (بالا) و ناپیوسته (پایین) برای شکست کمانشی در امتداد یک شیب معدن روباز زغال‌سنگ (Stead & Eberhardt, 1997)

در جدول ۲-۳ خلاصه‌ای از مزایا و محدودیت‌های ذاتی روش‌های مختلف مدل‌سازی عددی در تحلیل پایداری شیب‌ها آورده شده است.

¹ Discrete Element Method

جدول ۲-۳- روش‌های مدل‌سازی عددی در تحلیل پایداری شیب‌ها (Coggan et al., 1998)

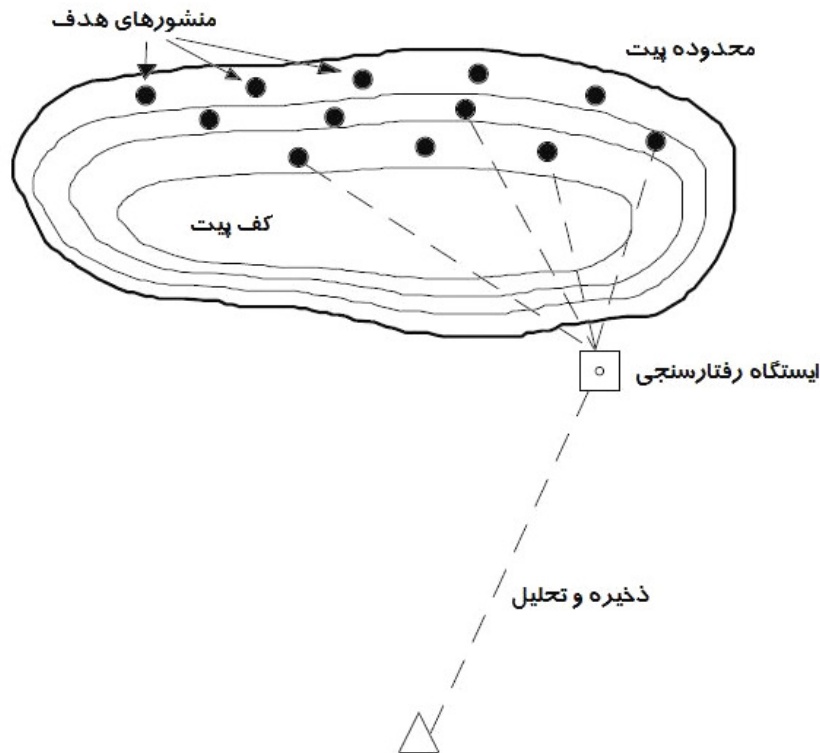
روش مدل‌سازی	پارامترهای اساسی	مزایا	محدودیت‌ها
مدل‌سازی پیوسته	ابعاد و هندسه شیب؛ معیارهای ساختاری (نظیر الاستیسیته، پلاستیسیته، خزش و ...); مشخصات آب زیرزمینی؛ مقاومت برشی مواد؛ وضعیت تنش برجا	اجازه تغییرشکل و شکست در مواد را می‌دهد؛ توانایی مدل‌سازی رفتار و مکانیزم‌های پیچیده؛ توانایی مدل‌سازی فشار منفذی، تغییرشکل 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؛ مشکل بودن انجام تحلیل 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؛ وضعیت تنش برجا	اجازه تغییرشکل و حرکت بلوک‌ها نسبت به یکدیگر را می‌دهد؛ توانایی مدل‌سازی رفتار و مکانیزم‌های 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 ناپیوستگی‌ها (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 پیوسته و ناپیوسته	مدل‌های توأم المان محدود/مجزا قادرند گسترش شکست در سنگ بکر و تغییرشکل سنگ درزه‌دار را همزمان شبیه‌سازی نمایند.	مسائل پیچیده نیاز به میزان حافظه بالا دارند؛ تجربه کم استفاده در عمل؛ مدل‌ها نیاز به شرایط و کالیبراسیون خاص دارند.

۲-۴-۶- روش‌های رفتارسنجی^۱

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 غیرمنتظره در این پروژه‌ها وجود داشته است. برای فائق آمدن بر این موارد غیر قابل پیش‌بینی، روش‌های رفتارسنجی 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). ساده‌ترین روش در این زمینه استفاده از وسایل ابزار دقیق و نصب حسگرها و جابجایی‌سنج‌ها در نقاط مختلف شیب با یک شبکه و چیدمان حساب‌شده است (شکل ۲-۱۵). علاوه

¹ Monitoring

بر این، تکنولوژی‌های استفاده از دوربین و منشور، دوربین‌های لیزری و رادارهای پایداری شیب (SSR)¹ هم اکنون در معادن روباز و سایر پروژه‌های مهم کاربرد روزافزونی یافته‌اند (Little, 2007).



شکل ۲-۱۵- شبکه کلی سیستم رفتارسنجی برای یک معدن روباز (Call, 1982)

شکل ۲-۱۶ نمونه‌ای از نصب این تجهیزات را در یک معدن روباز نشان می‌دهد. این تجهیزات برای رفتارنگاری سطح شیب‌ها و دیواره آنها و همچنین اطلاع از وضعیت سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای رفتارنگاری زیرسطحی شیب‌ها نیز از جابجایی‌سنج‌های گمانه استفاده می‌شود (Call, 1982; Call & Savely, 1990).

¹ Slope Stability Radar



شکل ۲-۱۶- نمونه‌ای از جانمایی نصب تجهیزات SSR در معدن روباز Sandsloot در آفریقای جنوبی (Little, 2007)

این روش آگاهی از پایداری شیب‌های سنگی امروزه جزو بهترین و موثرترین روش‌ها بخصوص در معادن روباز (به دلیل مجتمع بودن شیب‌ها و امکان نصب تجهیزات و انجام رفتارسنجی) به شمار می‌رود. با این حال، هزینه بالای خرید و نصب تجهیزات مربوط به این روش و همین طور 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 رفتارسنجی اعم از میزان جابجایی‌ها و یا فشار آب زیرزمینی نیاز به تفسیرها و تحلیل‌هایی دارد تا به صورت قابل استفاده درآید. همین طور 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; Noon, 2003).

۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا کلیات روش‌ها و اجزای طراحی شیب‌های معادن روباز مرور شده و سپس

مکانیزم‌های شکست شیب‌های سنگی با نگاهی ویژه به شیب‌های بزرگ مقیاس ارائه گردید. با مروری بر مطالعات قبلی نشان داده شد که در مورد شیب‌های بزرگ مقیاس، مکانیزم شکست تا حد زیادی متفاوت و پیچیده بوده و مسیرهای شکست اغلب ناشناخته هستند. همچنین رویکردهای کلی در زمینه تحلیل پایداری این ساختارها و بررسی عملکرد آنها شامل روش‌های تجربی، استریوگرافیک، تعادل حدی، احتمالاتی، عددی و رفتارسنجی مورد بررسی قرار گرفته و در هر مورد به مزایا و محدودیت‌های آنها اشاره گردید.

فصل سوم

سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

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. در هنگام طراحی یک ساختار در یک توده سنگ، 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 (اندرکنش آنها) نیز در نظر گرفته شود. به عنوان ابزاری برای برقراری ارتباط میان اصول مکانیک سنگی و کاربردهای مهندسی سنگ، بایستی قادر باشیم چنین اندرکنش‌های 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 مکانیزم‌های ارتباط‌دهنده میان آنها شناسایی شوند. همچنین باید این اطمینان حاصل شود که تمامی فاکتورهای تأثیرگذار و اندرکنش‌های مابین آنها در نظر گرفته شده باشد. به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام اندرکنش‌ها، 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. پارامترهای اصلی مرتبط با مسئله مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس لیست شده و اندرکنش‌های هر جفت از پارامترها در سایر درایه‌ها شکل می‌گیرند. مراحل

مانند کدگذاری^۱ اندرکنش‌ها و عملیات جبری برای سطرها و ستون‌ها اعمال شده و روش با خروج نمودارهایی ادامه می‌یابد.

هدف از ارائه این فصل از رساله، تشریح اصول کلی سیستم‌ها و بخصوص رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ می‌باشد که لازمه آن اشاره به اجزای تشکیل‌دهنده آن از قبیل ماتریس اندرکنش، نحوه کدگذاری آن، نمودار علت-اثر و نحوه تفسیر این نمودارها و نیز بررسی سابقه موضوع از نقطه نظر کاربردها و بهبودهای انجام گرفته در زمینه رویکرد RES است. البته ذکر این نکته ضروری است که یک کاربرد واقعی از RES در یک پروژه نیازمند اطلاعات دیگری از جمله نحوه تعریف شاخص‌ها^۲، تشکیل فهرست‌های 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 اندرکنش، روش‌های کدگذاری، نمودارهای علت-اثر خروجی و تفسیر آنها پرداخته می‌شود. در نهایت نیز به طور کامل در زمینه سابقه موضوع بحث می‌گردد.

۳-۲- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی

آلن‌بای^۳ سیستم را به صورت گروهی از بخش‌ها و اعضای مستقل و دارای اندرکنش 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 شده و روش‌هایی که به نوعی از این تفکر استفاده می‌کنند، روش‌های سیستمی نام دارند. طبق نظر جیائو^۴، 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

¹ Coding

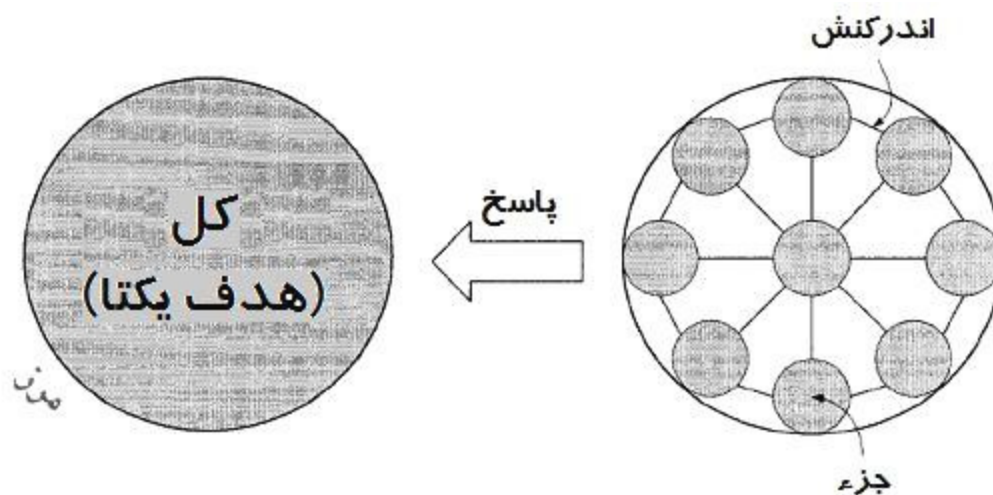
² Indices

³ Allenby

⁴ Jiao

سادگی قادر به حل آنها نمی‌باشند (Jiao, 1995).

بنا بر نظریه سیستم‌ها که همزمان توسط برتالانفی^۱ و راپوپورت^۲ در سال ۱۹۶۸ ارائه شده است، یک سیستم به عنوان یک "کل"^۳، هدفی یکتا در محدوده یک مرز مشخص دارا است. بدین ترتیب می‌توان سیستم را متشکل از اجزای موثر بر هم با یک مرز مشخص فرض کرد (شکل ۳-۱). بنابراین، کل را می‌توان به صورت پاسخ سیستم ناشی از اندرکنش‌های تمام اجزا (و نه با جمع ساده آن اجزا) تعریف نمود (Bertalanffy, 1968; Rapoport, 1968).



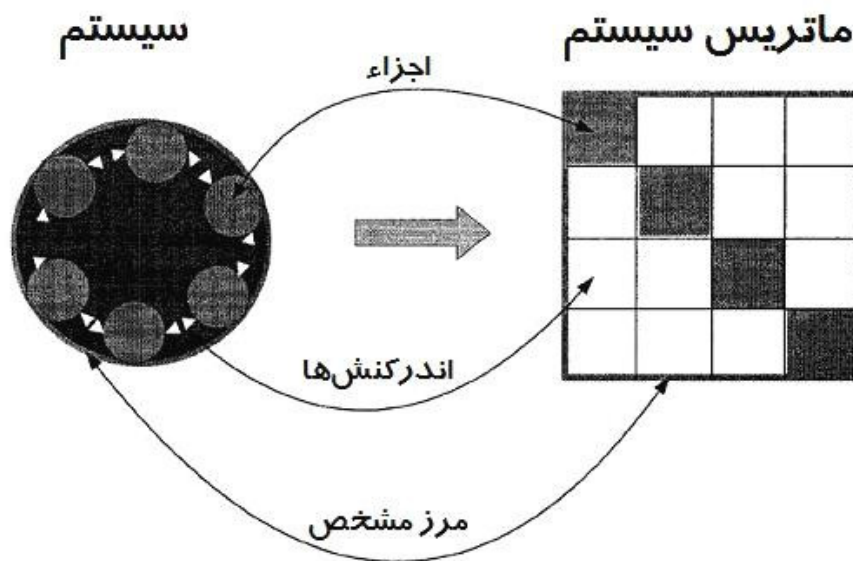
شکل ۳-۱- مفهوم تفکر سیستمی (Rapoport, 1968)

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

¹ Bertalanffy

² Rapoport

³ Whole



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

۳-۳- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

۳-۳-۱- ماتریس‌های اندرکنش

به عنوان مثالی از اندرکنش‌ها در یک توده سنگ درزه‌دار، شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در این شکل سه موضوع و عامل 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 اندرکنش‌ها شناخته می‌شوند (Hudson & Harrison, 1997; Hudson, 1992a).

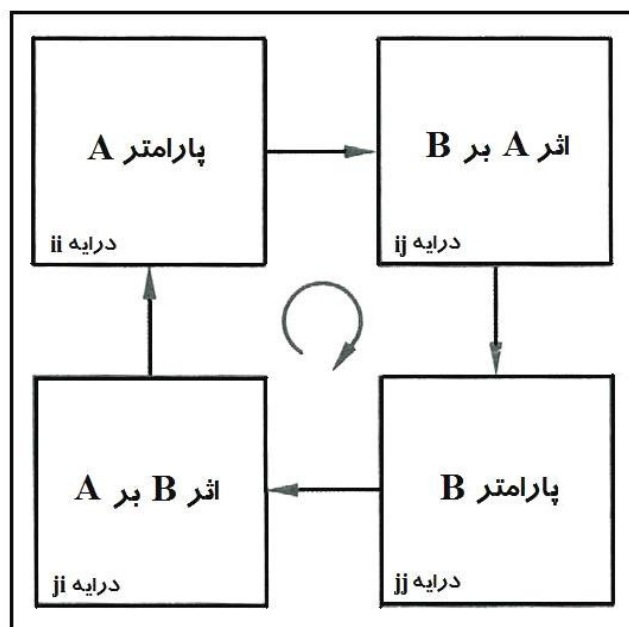
در اندرکنش اول، ساختار سنگ (ناپیوستگی‌ها) تنش محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، زیرا اندازه و جهت تنش‌های اصلی دگرگون می‌شود. در اندرکنش ۲، چگونگی اثر ساختار سنگ بر جریان آب در نظر گرفته می‌شود. نفوذپذیری اولیه تابعی از سنگ بکر و نفوذپذیری ثانویه تابعی از شکستگی‌ها می‌باشد. در ساختارهای مهندسی و موارد کاربردی، 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.



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

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

نشان‌دهنده تغییر در تنش و کرنش توده سنگ در دوره‌های زمانی می‌باشد (Hudson, 1992a). با توجه به مطالب ذکر شده واضح است که نیاز به برخی ابزار و روش‌ها احساس می‌شود تا به خوبی بتواند این اندرکنش‌ها را در نظر گرفته و نشان دهد. روش مرسوم در ارائه و نشان دادن اندرکنش‌ها در سیستم‌ها استفاده از ماتریس‌های اندرکنش^۱ می‌باشد (شکل ۳-۴). پارامترهای اصلی مورد نظر در طول قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند. همان گونه که در شکل ۳-۴ دیده می‌شود، پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست ماتریس قرار گرفته‌اند. درایه بالا سمت راست نشان‌دهنده تأثیر A روی B و درایه پایین سمت چپ نشان‌دهنده تأثیر B روی A می‌باشد. بدین ترتیب، در واقع اصول پایه‌ای ماتریس اندرکنش لیست کردن پارامترهای اصلی در طول قطر اصلی و در نظر گرفتن اندرکنش‌ها در درایه‌های غیراصلی است (Hill & Warfield, 1972; Hudson, 1992a).



شکل ۳-۴- مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B (Hudson, 1992a)

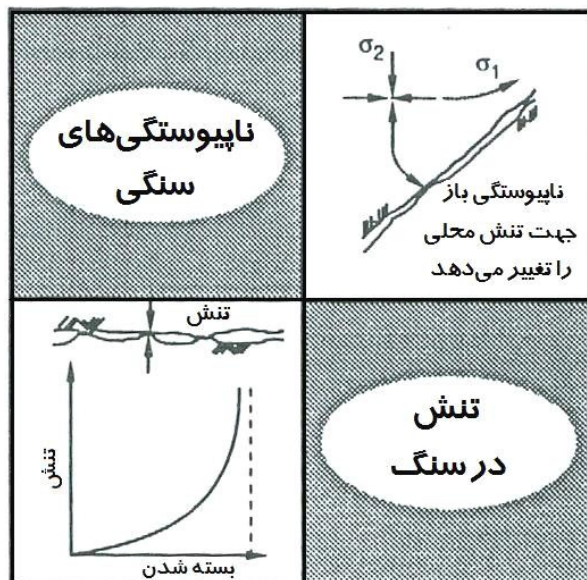
¹ Interaction Matrix (IM)

بدین ترتیب، برای سیستمی نظیر آنچه در شکل ۳-۳ نشان داده شد، نیاز به یک ماتریس 3×3 است که دارای سه درایه در قطر اصلی شامل ساختار سنگ، تنش‌ها و جریان آب و همچنین شش درایه غیراصولی باشد. چنین ماتریسی در شکل ۳-۵ قابل مشاهده است.

روش‌های گوناگونی برای نشان دادن و ارائه اطلاعات در درایه‌های غیراصولی وجود دارند. این درایه‌های اندرکنش می‌توانند شامل آنالیز مکانیزم‌های حاکم بر اثرات به وجود آمده باشند. همین طور می‌توان این مکانیزم‌ها را به صورت گرافیکی نمایش داد (شکل ۳-۶). راه دیگر برای این منظور، استفاده از یک ابزار کدگذاری درایه‌ها و اندرکنش‌ها بین پارامترها می‌باشد که از مباحث اصلی رساله حاضر است. قابل ذکر است که هر یک از روش‌های یاد شده از مزایای بخصوصی در شرایط مختلف برخوردارند.

شبکه شکستگی‌ها نفوذپذیری ثانویه را کنترل می‌کند.	شکستگی‌ها بر مقادیر و جهت تنش‌ها اثر می‌گذارند.	ساختار سنگ F_{ij}
بطور کلی هر چه تنش‌های قائم بزرگتر باشند، نفوذپذیری کمتر است.	تنش‌ها σ_{ij}	تنش‌ها می‌توانند شکستگی‌ها را باز کنند یا ببندند، و یا همینطور آنها را بوجود آورند.
جریان آب K_{ij}	جریان آب در شکستگی‌ها تنش قائم را کاهش می‌دهد.	جریان پیوسته آب در شکستگی‌ها بر خصوصیات آنها تأثیر می‌گذارد.

شکل ۳-۵- ماتریس اندرکنش 3×3 برای پارامترهای مکانیک سنگی در نظر گرفته شده
(Hudson, 1992a)



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

۳-۳-۲- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش

در بخش قبل، ماتریس‌های اندرکنش به عنوان ابزاری قوی به منظور استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و نشان دادن مکانیزم‌های تأثیر عوامل اصلی بر یکدیگر معرفی شدند. در شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶ دیدیم که این مکانیزم‌ها می‌توانند به صورت تحلیلی یا گرافیکی به خوبی نمایش داده شوند. با این حال، بایستی چگونگی عددی‌سازی^۱ اهمیت پارامترها در نظر گرفته شود. برای این منظور نیاز به روشی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش است که از این طریق چگونگی تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر به سبب مکانیزم‌های موجود به صورت عددی بیان گردد.

طبق نظر هادسون، ارائه‌دهنده رویکرد RES، پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد (Hudson, 1992a):

الف- روش اول به روش دوتایی^۲ معروف است. در این شیوه کدگذاری، مکانیزم مابین دو پارامتر به

^۱ Quantification

^۲ Binary

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 مکانیزم مورد نظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه مربوط به آن قرار می‌گیرد. در یک ماتریس 12×12 مانند ماتریس مربوط به اطلس مکانیزم‌های مهندسی سنگ برای حفريات زیرزمینی (Hudson, 1991)، ۱۳۲ 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 ۹ درایه با مقدار واحد به دست آید و ۱۲۳ درایه به اصطلاح خاموش باقی بمانند، در خواهیم یافت که سیستم از نظر تعاملی بودن^۱ در حد پایینی قرار دارد. بالعکس، اگر تعداد درایه‌های روشن زیاد باشد، سیستم تا حد زیادی تعاملی به شمار می‌رود.

ب- روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره (ESQ^۲) 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 اندرکنش، ۱ برای اندرکنش 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 مکانیزم‌های مربوطه ناتوان ساخته است. از طرفی در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس یا خبره^۳ و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مسئله باعث ذهن‌گرایی^۴ کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌گردد (این در مقابل حالتی است که روش شی‌گرا یا برون‌ذات 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

¹ Interactivity

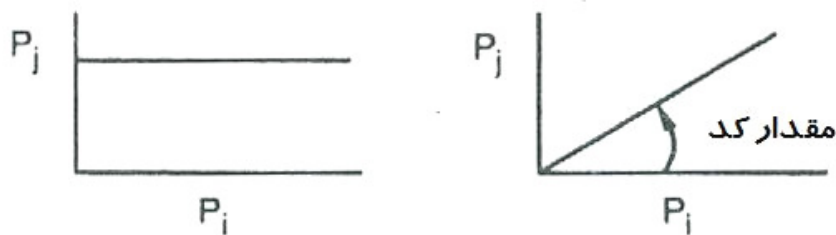
² Expert Semi-Quantitative

³ Expert

⁴ Subjectivity

برخوردار است (به سابقه استفاده از این رویکرد در بخش‌های آینده پرداخته خواهد شد).

ج- روش سوم از شیب نمودار پارامترها (در اینجا برای نمونه 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، مکانیزم 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.



شکل ۳-۷- روش دوم کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES: استفاده از شیب خط نمودار P_i-P_j (Hudson, 1992a)

د- روش چهارم، تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم می‌باشد. در این روش، فرض بر این است که تمام مکانیزم‌ها در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله مشتقات جزئی (PDE^1) بیان شوند. به عنوان مثال، اگر فرض کنیم که تمام مکانیزم‌های موجود در ماتریس را بتوان توسط معادلات مشتقات جزئی مرتبه اول بیان کرد، 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 این که اعمال معادلات مشتقات جزئی مرتبه دوم راه حل واقعی‌تری به نظر می‌رسد، ولی همین کار می‌تواند در ماتریس‌های بزرگ، عملی بسیار سخت و

¹ Partial Differential Equation

پیچیده (و گاه غیرممکن) به شمار آید.

ه- روش پنجم، روش صریح^۱ نام دارد. در این حالت فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل مکانیزم‌های ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی (Numerical) آنها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها 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.

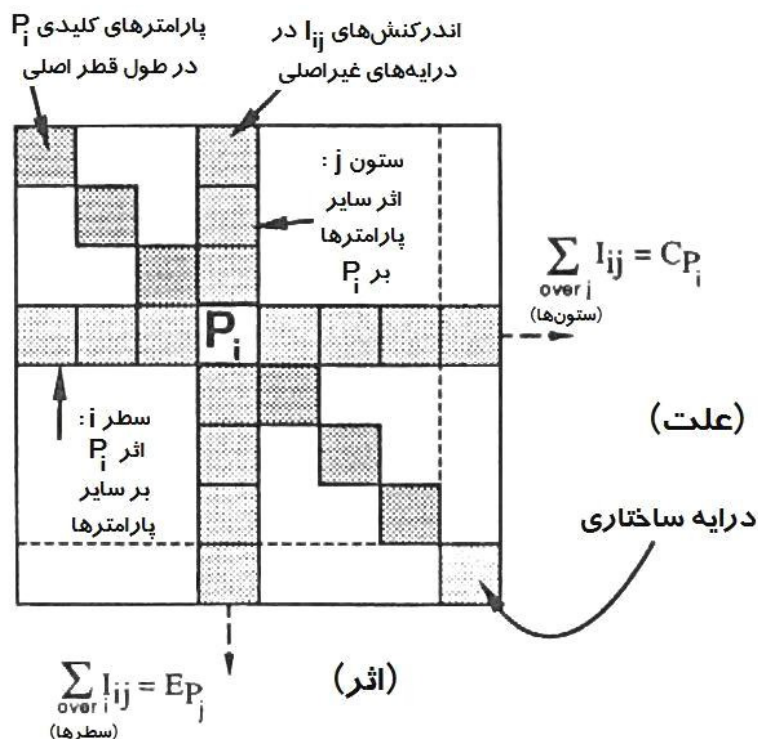
روش ESQ در میان سایر روش‌ها، با وجود ضعف‌های آشکار، تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون از بیشترین کاربرد برخوردار بوده است و به صورت اولیه در بسیاری از موارد پیشنهاد شده است. در مورد این کاربردها و سایر موارد مربوط به آنها در بخش‌های بعد با تفصیل بیشتری بحث خواهد شد.

۳-۳-۳- نمودار علت-اثر^۲

نحوه شکل‌گیری محورهای علت و اثر در نمودار 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 نشان‌دهنده تأثیر آن بر تمام پارامترهای دیگر موجود در سیستم است. بالعکس، هر ستون عبوری از P_i نشانگر تأثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن می‌باشد. به محض این که ماتریس به صورت عددی کدگذاری شد، می‌توان جمع جبری مقادیر هر سطر و هر ستون آن را به دست آورد. مجموع مقادیر عددی هر سطر با نام "علت" (Cause) و همین‌طور مجموع مقادیر هر ستون با نام "اثر" (Effect) شناخته می‌شوند که در نهایت سبب به وجود آمدن محورهای C و E می‌گردند. بنابراین، C ارائه‌گر نحوه تأثیرات P_i بر سیستم و E نشان‌دهنده تأثیری است که سیستم بر P_i می‌گذارد.

^۱ Explicit

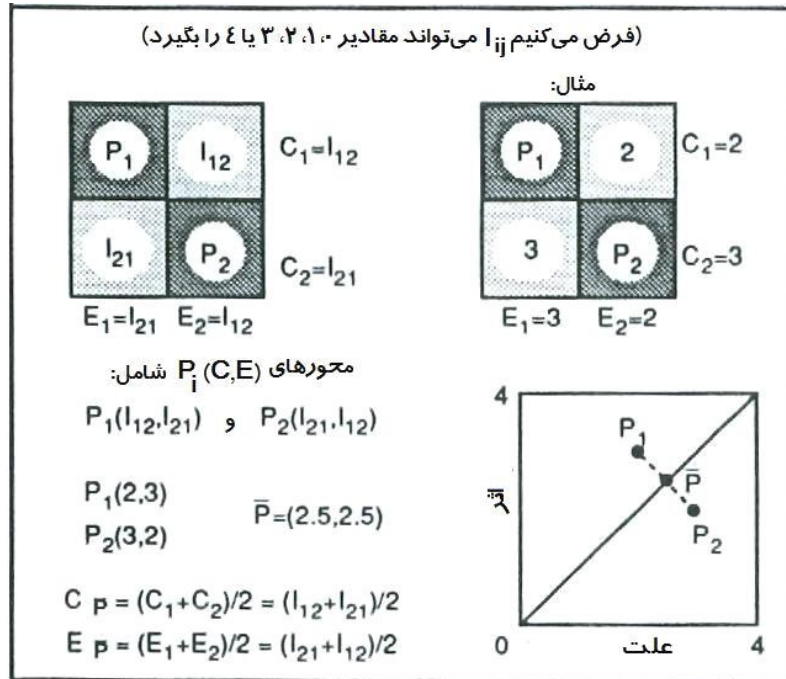
^۲ Cause-Effect Plot



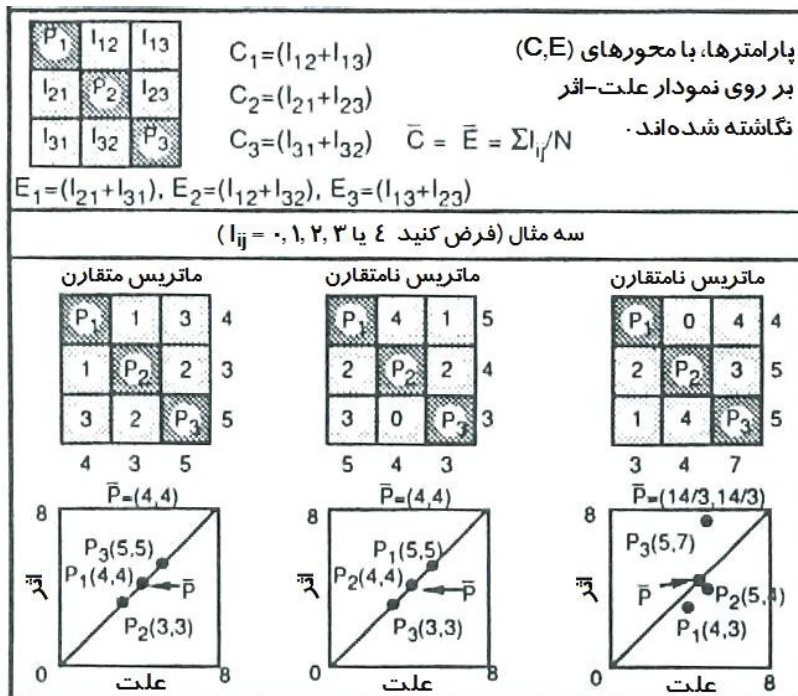
شکل ۳-۸- نحوه شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش (Hudson, 1992a)

مقادیر محورها برای هر پارامتر می‌تواند بر روی نموداری به نام نمودار علت-اثر انتقال یابد. برای معرفی اولیه 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 یاد شده 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 نامتقارن ارائه شده است. همچنین قرارگیری \bar{P} به عنوان میانگین P_i ها بر روی خط $C=E$ قابل توجه است.

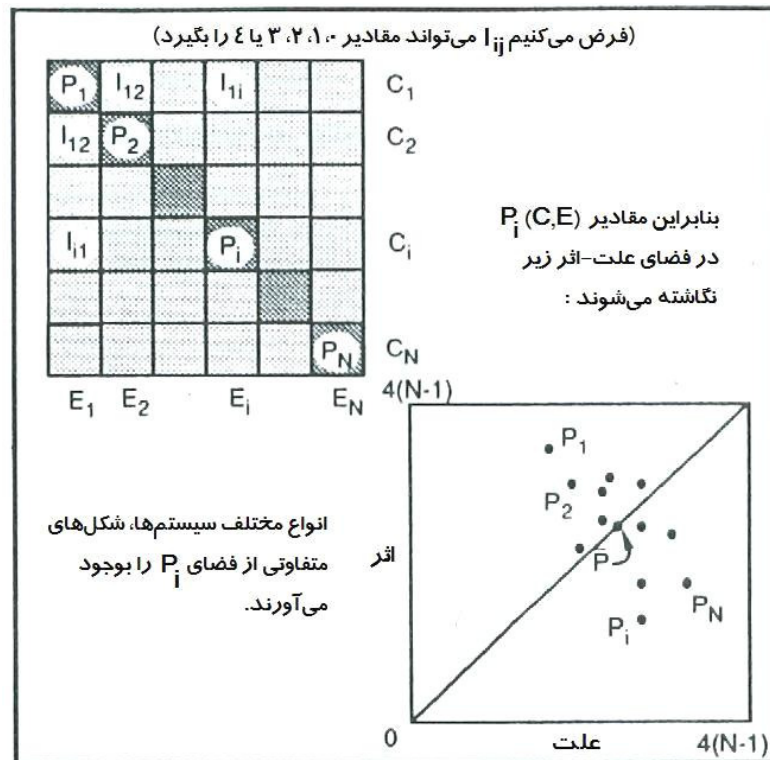
در شکل ۳-۱۱، نمودار (C, E) تعمیم داده شده به N پارامتر قابل مشاهده است. در این مورد کلی، پارامترها به صورت "ابر مانند" در فضای C و E درآمده و از سیستمی پیچیده حکایت دارند. توجه به موقعیت این نقاط که در واقع نماینده پارامترهای اصلی سیستم هستند، در توسعه و سودمندی نظریه سیستمی ارائه شده در این بخش از اهمیت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



شکل ۳-۹- نمونه‌ای از یک ماتریس اندرکنش 2×2 کدگذاری شده و نمودار علت-اثر آن (Hudson, 1992a)



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



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

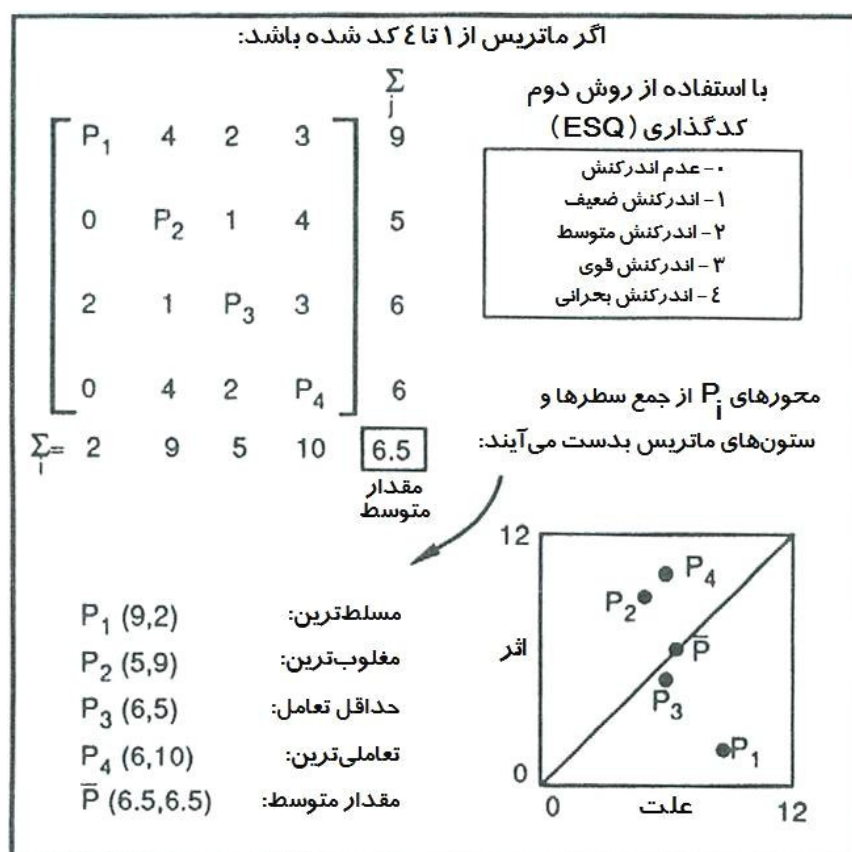
در شکل ۳-۱۲، نحوه تشکیل نمودار (C, E) به خوبی نشان داده شده است. برای مقادیر کدگذاری شده در این شکل، مجموع سطرها و ستون‌ها برای هر پارامتر محاسبه شده و در نمودار وارد شده است. موقعیت نقاط در فضای علت-اثر نشان‌دهنده نوع اندرکنش هر پارامتر است. تعاملی‌ترین پارامتر P_4 می‌باشد، چرا که دارای بیشترین مقدار $C+E$ است. کمترین فعل و انفعال نیز مربوط به پارامترهای P_3 و P_1 است که دارای کمترین مقادیر $C+E$ هستند. غالب‌ترین^۱ (یا مسلط‌ترین) پارامتر P_1 به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار $C-E$ می‌باشد. این بدان معنی است که بیشتر از آن که سیستم بر روی P_1 تأثیرگذار باشد، این پارامتر سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تابع‌ترین^۲ (یا مغلوب‌ترین) پارامترها نیز P_2 و P_4 می‌باشند که دارای کمترین مقدار $C-E$ هستند.

چنین تفسیرهایی را می‌توان مستقیماً از نمودار (C, E) نیز انجام داد. شکل ۳-۱۳ مفهوم مربوط به دو

¹ Most dominant

² Most subordinate

خصوصیت شدت اندرکنش^۱ و تسلط پارامتر^۲ را نشان می‌دهد. این شکل بیان کننده این موضوع است که شدت اندرکنش یک پارامتر در امتداد خط $C=E$ اندازه‌گیری شده و تسلط پارامتر نیز با فاصله عمودی نقطه مربوط به آن تا خط یاد شده سنجیده می‌شود.



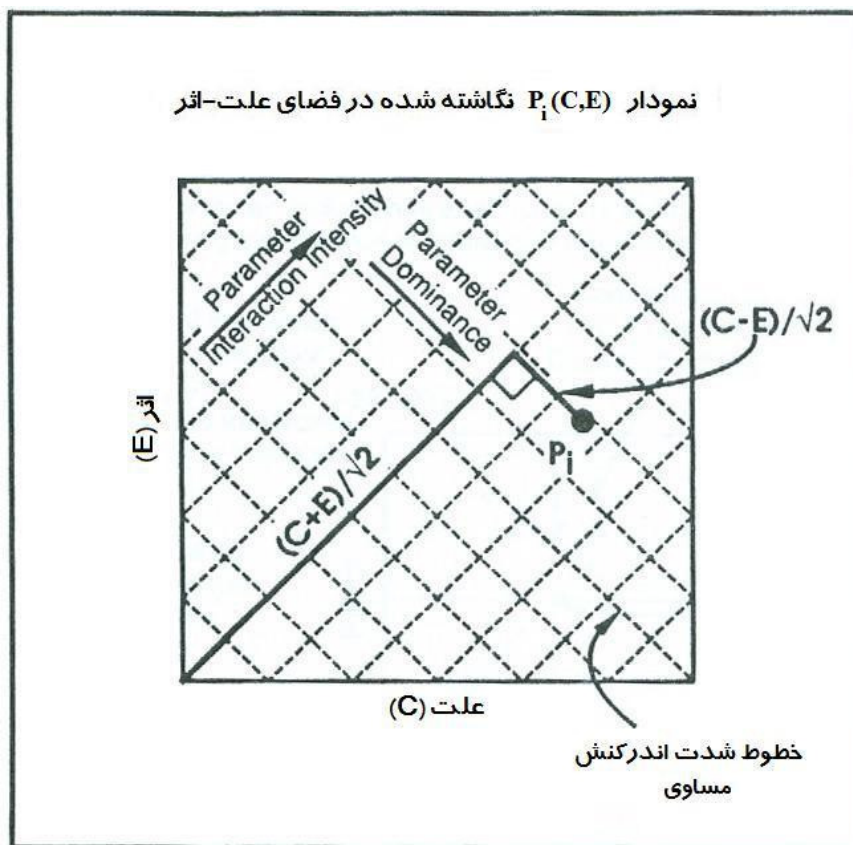
شکل ۳-۱۲- مثالی از یک نمودار علت- اثر برای یک ماتریس 4×4 (Hudson, 1992a)

دو مجموعه خطوط ۴۵ درجه در نمودار نشان‌دهنده کنتورهای مقادیر مساوی از هر یک از خصوصیات شدت اندرکنش و میزان تسلط پارامترها هستند. نکته مهمی که وجود دارد این است که با افزایش خصوصیت شدت اندرکنش از صفر تا حداکثر، مقدار حداکثر ممکن برای تسلط پارامتر مربوطه از صفر تا ۵۰ درصد شدت اندرکنش افزایش یافته و سپس در حداکثر مقدار شدت اندرکنش، به صفر بازمی‌گردد. در نهایت، همان طور که در شکل نشان داده شده است، مقدار عددی مربوط به

¹ Interaction intensity

² Parameter dominance

خصوصیات یاد شده به ترتیب با $(C+E)/\sqrt{2}$ و $(C-E)/\sqrt{2}$ قابل محاسبه هستند.



شکل ۳-۱۳- مفهوم شدت اندرکنش و تسلط پارامتر (Hudson, 1992a)

ذکر این نکته ضروری است که رویکرد RES بسته به کاربرد مورد نظر و متصور از آن، دارای مراحل دیگری شامل تعریف شاخص با توجه به موضوع کار و تشکیل فهرست‌های رده‌بندی پارامترها نیز می‌باشد که در بخش‌ها و فصول آتی در هنگام کاربرد آشکارتر بیان خواهند شد.

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 زمینه‌های 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. مطالعات و کاربردهای مرتبط با موضوع رساله در بخش‌های بعد مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت.

رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) برای اولین بار توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ معرفی شد (Hudson, 1992a; Hudson & Harrison, 1992). طی این معرفی، وی اصول اولیه رویکرد و نحوه استفاده از آن را به طور کامل ارائه داد و بدین ترتیب به عنوان نخستین بار 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 مباحث متنوعی غیر از مهندسی سنگ نیز مطرح شده و کاربرد یافته است که در این بخش سعی شده است به تمامی آنها از ابتدا تا کنون 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^۱ در سال ۱۹۹۴ به ارزیابی زمین‌شناسی مهندسی 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 این روش داشت (Jiao, 1995). مازوکولا^۲ 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^۳ 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

¹ Smith

² Mazzoccola

³ Skagius

بود. ماتیوس^۱ و لوید^۲ (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^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۸، اثرات ناشی از زلزله را بر پایداری شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آپنینز^۴ ایتالیا با روش سیستمی و در دو حالت استاتیکی و دینامیکی تحلیل نمودند (Castaldini et al., 1998). ون‌دورپ^۵ و همکاران در سال ۱۹۹۹، ماتریس‌های اندرکنش را در بخشی از تحلیل‌های بکار 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^۶ و همکارانش طی مطالعه‌ای محدود، اقدام به بررسی مشکلات ناشی از ریزش مجاری فاضلاب در محیط‌های شهری با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش نمودند (Davies et al., 1999). همچنین در این سال لاتام^۷ و لو^۸ از روش RES با کدگذاری اصلاح‌شده در ارائه یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار انفجار توده سنگ‌ها بهره بردند (Latham & Lu, 1999). آخرین مطالعه در این سال مربوط به استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به منظور ارزیابی میزان مهاجرت برخی عناصر در اکوسیستم‌های جنگلی توسط آویلا^۹ و موبرگ^{۱۰} می‌باشد (Avila & Moberg, 1999).

در سال ۲۰۰۰، شانگ^{۱۱} و همکارانش از روش RES جهت انتخاب بهترین محل برای ساخت نیروگاه زیرزمینی شیشان-لینگ^{۱۲} در چین استفاده کردند (Shang et al., 2000). آنها برای این منظور شاخصی به نام شاخص تناسب جامع را تعریف کردند که در نهایت بهترین مکان را با توجه به آن

¹ Matthews

² Lloyd

³ Castaldini

⁴ Apennins

⁵ Van Dorp

⁶ Davies

⁷ Latham

⁸ Lu

⁹ Avila

¹⁰ Moberg

¹¹ Shang

¹² Shisan-Ling

انتخاب نمودند. علی^۱ و حسن^۲ در سال ۲۰۰۲ در کاری کاملاً^۳ مشابه با مطالعه مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶)، با تعریف شاخص ناپایداری توده سنگ، اقدام به ارزیابی ناپایداری شیب‌های طبیعی منطقه بندربان^۳ در بنگلادش نمودند (Ali & Hasan, 2002). ژانگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ خطر سقوط سقوط سنگ از شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه چنگدو- لاسا^۵ به طول ۴۳۰ کیلومتر در چین را در ۱۹ ایستگاه به کمک روش سیستم‌های مهندسی سنگ تحلیل نمودند (Zhang et al., 2004). شاخص مورد استفاده آنها شاخص خطر سقوط سنگ نام داشت. در همین سال، بناردوس^۶ و کالیامپاکوس^۷ در ارزیابی خطرات ژئوتکنیکی در حفر تمام مقطع تونل متروی آتن یونان از روش RES استفاده کرده و با تعریف شاخص آسیب‌پذیری یا حساسیت به ریزش در ایستگاه‌های مختلف حفاری تونل توانستند این خطرات را برآورد نمایند (Benardos & Kaliampakos, 2004). در سال ۲۰۰۵، شانگ^۸ و همکارانش با استفاده از ماتریس اندرکنش تشکیل شده از فاکتورهای زمین‌شناسی به ناحیه‌بندی^۹ زمین‌شناسی مهندسی منطقه‌ای واقع در حاشیه بزرگراه سیچوان- تیبِت^۹ پرداختند (Shang et al., 2005). آنها برای این منظور اقدام به تعریف و تشکیل شاخص ناحیه‌بندی زمین‌شناسی نمودند. بندز^{۱۰} و همکاران نیز در سال ۲۰۰۵ آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از بکار بردن ضایعات صنعتی در مصالح راه‌سازی را به کمک ماتریس‌های اندرکنش مورد مطالعه قرار دادند (Bendz et al., 2005). در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷، ماورولیدو^{۱۱} و همکارانش طی مطالعه‌ای جامع، اقدام به نگاشت آلودگی ناشی از ترافیک هوای شهر گیلفورد^{۱۲} انگلستان نمودند (Mavroulidou et al., 2004 and 2005 and 2007). آنها برای این کار، علاوه بر استفاده از RES و

¹ Ali

² Hasan

³ Bandarban

⁴ Zhang

⁵ Chengdu-Lhasa

⁶ Benardos

⁷ Kaliampakos

⁸ Zonation

⁹ Sichuan-Tibet

¹⁰ Bendz

¹¹ Mavroulidou

¹² Guildford

تشکیل ماتریس اندرکنش با فاکتورهای تأثیرگذار بر کیفیت هوای شهر، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز برای نگاشت نهایی استفاده کرده و در نهایت نتایج خود را با نتایج به دست آمده از روش‌های عددی مقایسه نمودند. فرنتینو^۱ و ساکلاریو^۲ نیز در سال ۲۰۰۷ همین روش را برای پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش و ارزیابی عملکرد شیب‌های طبیعی پیشنهاد کردند (Ferentinou & Sakellariou, 2007). اندریوکس^۳ و حاجیجورجیو^۴ 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 شاخصی به منظور رسیدن به هدف یاد شده، توانستند تصحیحاتی در روش مرسوم طراحی پایه‌های بزرگ مقیاس ارائه نمایند. دی پیپو^۵ 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^۶ و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۸ با استفاده از یک الگوریتم بر مبنای GIS و RES، نگاشت خطرات وقوع زمین‌لغزش را برای ناحیه کیلنتو^۷ ایتالیا انجام دادند (Budetta et al., 2008). همچنین، جِریانو^۸ جِریان با استفاده از ماتریس‌های اندرکنش به مطالعه و ناحیه‌بندی حساسیت ریزش شیب‌های طبیعی ناحیه دوگانکت^۹ در کشور ترکیه پرداختند (Ceryan & Ceryan, 2008). به عنوان آخرین تحقیق در این زمینه مربوط به سال ۲۰۰۸، روزوس^{۱۰} و همکارانش نیز کاری مشابه را برای شیب‌های طبیعی استان کاردیتسا^{۱۱} در یونان انجام دادند (Rozos et al., 2008) که مشابه کار انجام شده توسط آنها در استان آچایا^{۱۲} در

¹ Ferentinou

² Sakellariou

³ Anderiux

⁴ Hadjigeorgiou

⁵ De Pippo

⁶ Budetta

⁷ Cilento

⁸ Ceryan

⁹ Dogankent

¹⁰ Rozos

¹¹ Karditsa

¹² Achaia

یونان در ۲۰۰۶ بوده است (Rozos et al., 2006). در سال ۲۰۰۹، شین^۱ و همکارانش با استفاده از رویکرد RES و تعریف شاخص خطر ریزش تونل، روشی برای ارزیابی کمی خطرات پایداری تونل‌ها در کره جنوبی ارائه دادند (Shin et al., 2009). در همین سال، کندور^۲ و اصغری^۳ از تلفیق این رویکرد و روش‌های تصادفی برای تحلیل داده‌های رفتارنگاری خطر نشت دی‌اکسیدکربن از دیواره چاه‌ها و مخازن استفاده کردند (Condor & Asghari, 2009). فرنتینو و همکاران در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ از رویکرد RES برای تحلیل خصوصیات ژئوتکنیکی رسوبات دریایی در منطقه زاکینتوس^۳ یونان بهره بردند (Ferentinou et al., 2010 and 2011). در نهایت در سال ۲۰۱۱ روزوس و همکاران با تلفیق رویکرد RES و GIS به مطالعه ارزیابی خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های حساسیت برای شیب‌های طبیعی شرق شبه‌جزیره پلوپونسوس^۴ در جنوب یونان پرداختند (Rozos et al., 2011).

۳-۵- تلاش‌های انجام شده در جهت بهبود رویکرد RES

با وجود گذشت حدود ۲۰ سال از ارائه رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، تا به امروز تحقیقات اندکی در زمینه بهبود این رویکرد صورت گرفته است. همان طور که در بخش قبل اشاره شد، ماتریس اندرکنش به عنوان یک جزء بنیادی در روش‌های سیستمی و بخصوص در RES به شمار می‌رود. از این رو، بهبودهای صورت گرفته نیز در همین جهت و بیشتر بر روی نحوه کدگذاری این ماتریس انجام شده است. در این بخش به هر یک از تحقیقات انجام شده در جهت ارتقای رویکرد به صورت جداگانه پرداخته می‌شود.

¹ Shin

² Condor

³ Zakynthos

⁴ Peloponnesus

۳-۵-۱- استفاده از نظریه سیستم‌های خاکستری^۱

در سال ۱۹۹۴، لو و لاتام با بکارگیری نظریه سیستم‌های خاکستری از نظریه‌های علم کنترل، شیوه‌ای جدید برای کدگذاری ماتریس اندرکنش در رویکرد RES ارائه نمودند (Lu & Latham, 1994).

در نظریه کنترل، تیرگی و روشنی رنگ‌ها همواره نشان‌دهنده میزان اطلاعات موجود است. سیستمی که در آن پارامترها، ساختار و مشخصات به طور کامل شناخته شده باشند، بنام سیستم "سفید" و سیستمی که پارامترها، ساختار و مشخصات آن کاملاً ناشناخته هستند به سیستم "سیاه" معروف است. با این حال، اکثر سیستمها در عمل نه کاملاً شناخته شده و نه به طور کامل ناشناخته هستند. از این رو، سیستمی که شامل هر دو اجزای شناخته شده و ناشناخته باشد، یک سیستم "خاکستری" نام می‌گیرد. به طور کلی اجزای یک سیستم خاکستری شامل آنالیز سیستمی، توسعه مدل‌های سیستمی، پیش‌بینی خاکستری، تصمیم‌گیری خاکستری و کنترل خاکستری می‌باشد. ابزار مورد استفاده در این آنالیز سیستمی نیز شامل آنالیز همبستگی خاکستری، تولید داده‌ها بر اساس تحلیل آماری خاکستری و دسته‌بندی خاکستری است. طبق این نظریه، توسعه یک مدل سیستمی مستلزم یک مدل مشتقات جزئی با استفاده از داده‌های اصلی می‌باشد (Den, 1982).

طبق نظر لو و لاتام، یک سیستم مهندسی سنگ با پارامترها و اندرکنش‌های میان آنها به دلیل خاصیت ذاتی آن، سیستمی با اطلاعات اولیه اندک است که کاملاً بر خصوصیات یک سیستم خاکستری منطبق است. به همین دلیل با استفاده از نظریه یاد شده اقدام به ارائه یک شیوه کدگذاری جدید با نام کدگذاری عددی پیوسته (CQC^۲) نمودند که در آن، ماتریس با استفاده از کلاس‌های خاکستری کدگذاری شده و سپس این کلاس‌ها تبدیل به اعداد (کدها) می‌شوند. آنها در اولین گام روش خود را با روش کدگذاری مرسوم ESQ (Hudson, 1992a) مقایسه کردند. برای این منظور،

^۱ Grey Systems Theory

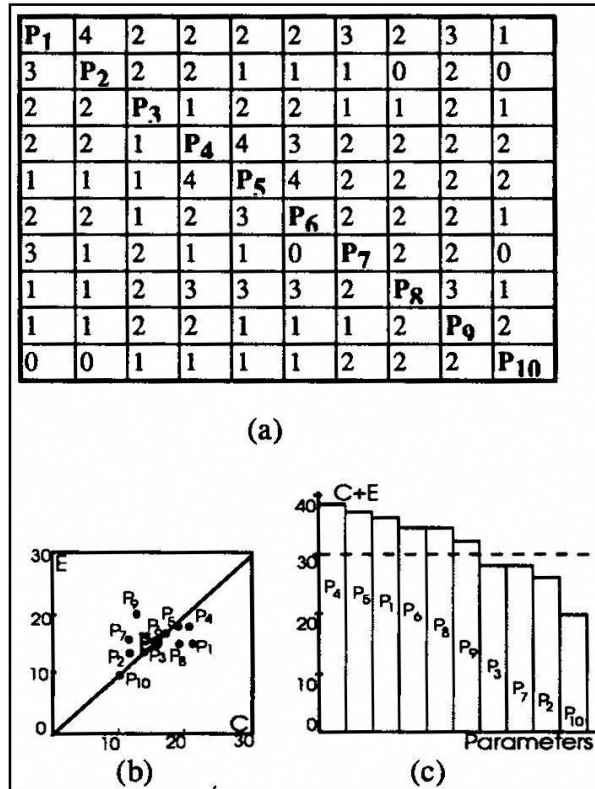
^۲ Continuous Quantitative Coding

عمل کدگذاری برای یک ماتریس اثر متقابل با ۱۰ پارامتر با هر دو روش انجام شده و رتبه‌بندی اهمیت پارامترها و نمودارهای علت-اثر با یکدیگر مقایسه شدند. شکل ۳-۱۴ نتیجه این کاربرد و مقایسه را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده می‌شود، کدهای اختصاص یافته به اندرکنش‌ها در ماتریس دوم به کمک نظریه سیستم‌های خاکستری تا حد زیادی متفاوت با کدهای داده شده توسط روش ESQ می‌باشند (با در نظر داشتن مقیاس)، و بدین ترتیب موقعیت نقاط پارامترها در فضای علت-اثر نیز متفاوت می‌باشد. با این حال، مقایسه هیستوگرام‌های شدت اندرکنش پارامترها نشان می‌دهد که دو روش کدگذاری تخمیه‌های تقریباً یکسانی از اهمیت پارامترهای سیستم داشته‌اند.

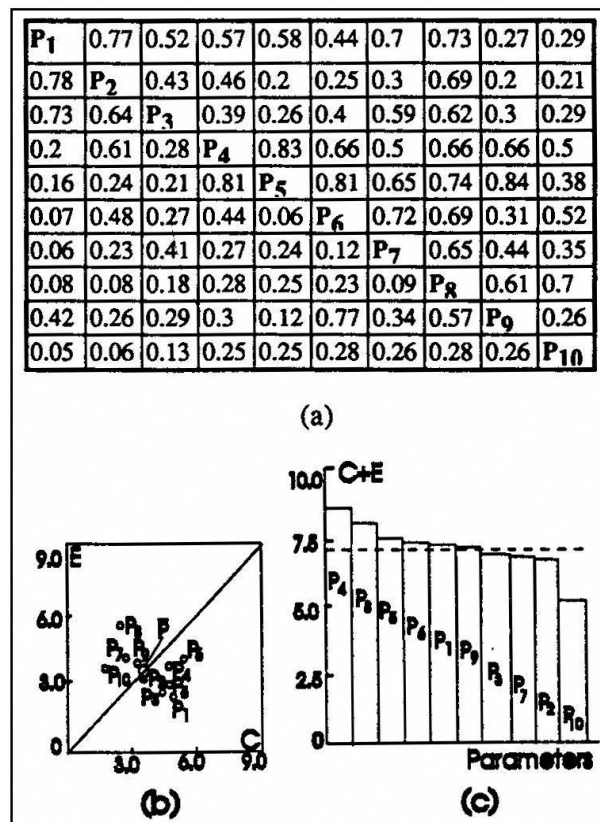
تنها استفاده عملی از روش کدگذاری جدید، توسط خود ارائه‌دهندگان آن در سال ۱۹۹۹ و برای توسعه یک سیستم ارزیابی قابلیت انفجار توده سنگ‌ها بوده است (Latham & Lu, 1999). در این مطالعه، ماتریس اندرکنش ساخته شده برای ۱۲ پارامتر مربوط به خصوصیات توده سنگ با استفاده از روش CQC کدگذاری شده است.

از مزایای روش کدگذاری CQC نسبت به ESQ می‌توان به محدوده وسیع‌تر عددی آن اشاره کرد که از ۰ تا ۱۰۰ را در نظر گرفته و طبق طبقه‌بندی نظریه سیستم‌های خاکستری به صورت اعداد اعشاری از ۰/۰۰ تا ۱/۰۰ نشان داده می‌شود. این قابلیت باعث می‌شود که حساسیت نسبت به در نظر گرفتن تأثیرات بالاتر رفته و در نتیجه کوچکترین تفاوت در اثرات متقابل نیز در نتایج منعکس گردد.

با این حال، در این روش نیز علی‌رغم پیوسته بودن مقادیر عددی و عدم توجه به اصول مجموعه‌های کلاسیک و اعداد صحیح، کماکان جنبه ذهنی بودن کدگذاری‌ها و استفاده از قضاوت مهندسی در تعیین کلاس‌های خاکستری برای نشان دادن اندرکنش بین پارامترها باقی است. این امر بیانگر ضعف مشترک روش‌های کدگذاری CQC و ESQ می‌باشد.



(الف)

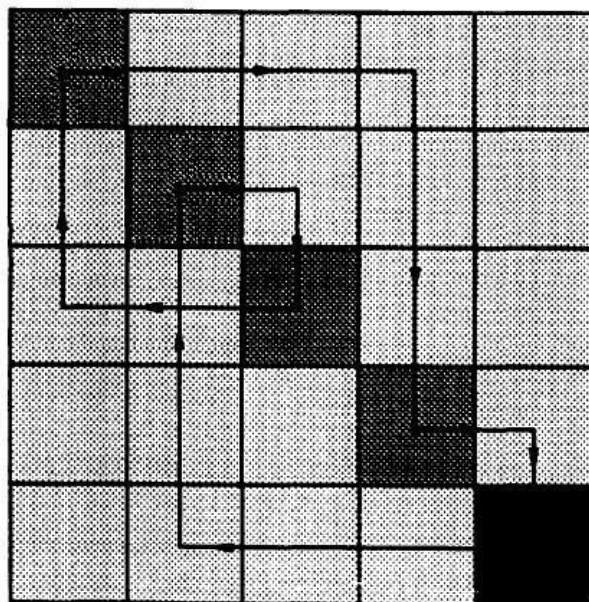


(ب)

شکل ۳-۱۴- مقایسه نتایج حاصل از روش کدگذاری (الف) ESQ و (ب) CQC (Lu & Latham, 1994)

۳-۵-۲- استفاده از نظریه گراف^۱

جیائو و هادسون در سال ۱۹۹۵، با بهره‌گیری از نظریه گراف توانستند مدل تمام مرتبط (FCM^۲) را برای کاربرد در مفاهیم سیستم‌های مهندسی سنگ و البته تنها برای مکانیزم‌های خطی ارائه دهند (Jiao & Hudson, 1995). هدف اصلی از این کار، در نظر گرفتن رابطه همزمان بیش از دو پارامتر در ماتریس اندرکنش بوده است. در ارائه این رویکرد فرض بر این بوده است که در دنیای واقعی، فرآیندهای مکانیک سنگی تنها شامل اثر متقابل دوتایی جفت پارامترها بر یکدیگر نبوده و هر پارامتر به واسطه تأثیر همزمان بر پارامترهای دیگر، از آنها و بنابراین از خود نیز تأثیر می‌پذیرد (در حقیقت علت نام‌گذاری رویکرد بنام تمام مرتبط به همین دلیل بوده است). این فرضیه با مفهوم خط سیرهای مکانیزم^۳ ارائه شده است که در نهایت تشکیل یک حلقه را برای هر پارامتر می‌دهند. شکل ۳-۱۵ خط سیرهای مکانیزم تشکیل دهنده یک حلقه را برای یک ماتریس پنج پارامتری نشان می‌دهد که در آن مبدأ و انتهای حلقه درایه آخر قطر اصلی (پارامتر پنجم) می‌باشد.



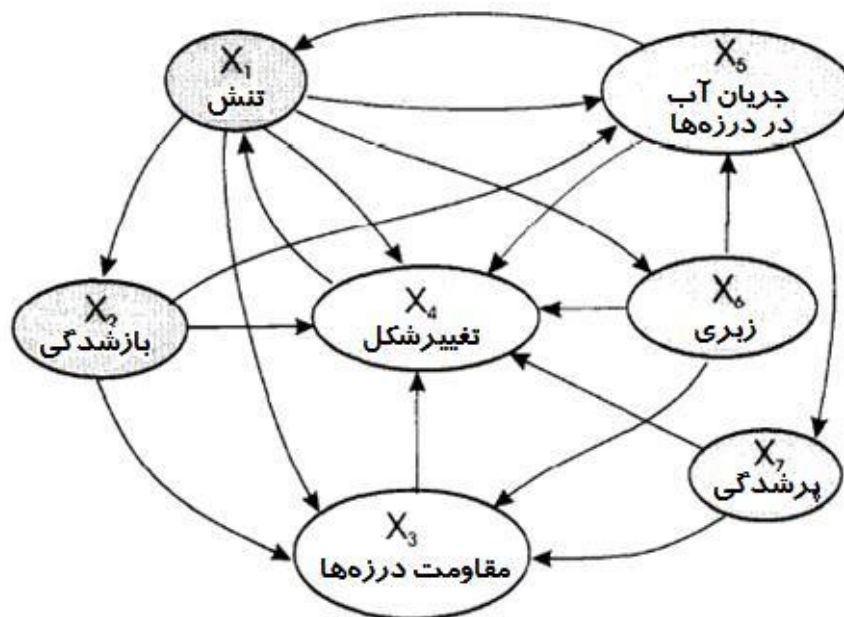
شکل ۳-۱۵- خط سیرهای مکانیزم برای یک ماتریس با ۵ پارامتر (Jiao & Hudson, 1995)

¹ Graph Theory

² Fully-Coupled Model

³ Mechanism pathways

همان طور که گفته شد، در این مطالعه نحوه اثرگذاری پارامترهای یک سیستم بر همدیگر با استفاده از نظریه گراف تحلیل شده است. به عنوان مثال، سیستمی شامل برخی پارامترهای مکانیک سنگی مانند تنش، جریان آب در درزه‌ها، زبری سطح درزه‌ها، مقاومت درزه‌ها، تغییرشکل‌پذیری و یا بازشدگی به صورت شبکه‌ای از مکانیزم‌ها در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است.



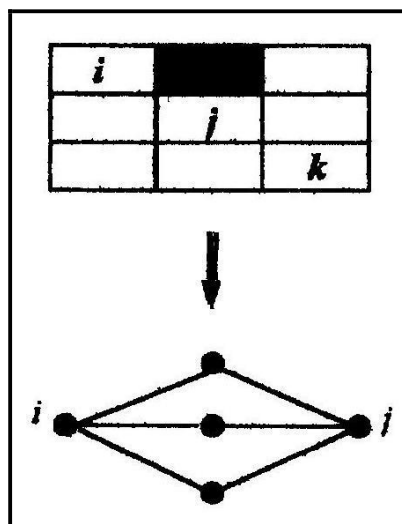
شکل ۳-۱۶- شبکه مکانیزم‌های میان چند پارامتر در مدل تمام مرتبط (Jiao & Hudson, 1995)

آنها معادلات مربوط به چنین اندرکنش‌های تمام مرتبط را نیز ارائه دادند تا روش پیشنهادی قابل استفاده در کاربردهای مختلف باشد. با این حال، این روش در عین دارا بودن مزیتی مانند نزدیکتر بودن به واقعیت، نیاز به آن دارد که ارتباط بین پارامترها به صورت روابط خطی بیان گردد که این امر آگاهی کامل از این روابط و یا دسترسی به اطلاعات کامل را می‌طلبد. به همین دلیل، تاکنون کاربرد قابل توجهی از این پیشرفت انتشار نیافته است. علت دیگر این امر را می‌توان به پیچیدگی نسبتاً زیاد روش‌های مبتنی بر نظریه گراف بخصوص در ماتریس‌هایی با پارامترهای متعدد ربط داد. با این وجود، در این رویکرد تمام خط سیرها در ماتریس در نظر گرفته شده و در نهایت یک ماتریس اندرکنش

یکپارچه (GIM^۱) حاصل می‌گردد که از مزایای این رویکرد به حساب می‌آید. شایان ذکر است که این مدل در فصول آتی رساله مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۳-۵-۳- استفاده از شبکه‌های عصبی

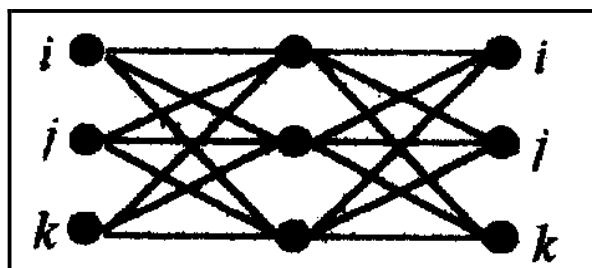
یانگ^۲ و ژانگ در سال ۱۹۹۸ روش جدیدی را بر مبنای هوش محاسباتی برای کاربرد در سیستم‌های مهندسی سنگ ارائه نمودند (Yang & Zhang, 1998). در این روش، برای تحلیل اندرکنش هر جفت پارامتر در ماتریس (i, j) آن دو پارامتر به عنوان ورودی و خروجی یک شبکه عصبی فرض شده و لایه‌های میانی با توجه به میزان اثر سنجدیده شده از قبل و نوع پارامتر تعریف می‌شوند. با آگاهی از پروسه یادگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توان با تغییرات کوچک در ورودی شبکه (i) ، میزان تأثیر در مقدار و حالت خروجی (j) را اندازه‌گیری نمود. اگر یک ماتریس اندرکنش با پارامترهای مشخص را در نظر بگیریم، نحوه قرارگیری پارامترهای i و j در شبکه عصبی به صورت شکل ۳-۱۷ در می‌آید. همین طور در صورت فرض وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس، ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه به صورت شکل ۳-۱۸ نشان داده می‌شوند.



شکل ۳-۱۷- نحوه قرارگیری پارامترهای ماتریس اثر متقابل در یک شبکه عصبی (Yang & Zhang, 1998)

¹ Global Interaction Matrix

² Yang



شکل ۳-۱۸- شبکه عصبی در نظر گرفته شده در صورت وجود اندرکنش میان تمام پارامترهای ماتریس (Yang & Zhang, 1998)

در این روش، ساخت لایه‌های میانی شبکه مستلزم اطلاع کامل از مکانیزم اثرات متقابل میان پارامترهای ورودی و خروجی می‌باشد، بدین معنی که اندرکنش‌های صحیح تنها به شرط در دسترس بودن اطلاعات جامع از سیستم مورد نظر قابل کسب هستند. به عبارت دیگر، این روش همانند سایر روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی نیاز به داده‌های واقعی و دقیق داشته و از پیچیدگی‌های محاسباتی خاص این شبکه‌ها نیز برخوردار است. از ضعف‌های اصلی کار یانگ و ژانگ (۱۹۹۸) می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تکیه بر استفاده از فضای ورودی پارامترها به صورت توان نسبی تأثیر (RSE^1) پارامترهای سیستم و عدم توجه ویژه به این عامل به حالت یکپارچه در تعیین اندرکنش‌ها علیرغم ارائه آن در همان تحقیق؛ این مفهوم سپس در تحقیقات بعدی نظیر تلفیق شبکه‌های عصبی با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (Yang & Rosenbaum, 2001) جنبه کاربردی یافته است.
- عدم توجه کامل به بهینه‌سازی شبکه که ممکن است به دلیل عدم توسعه‌یافتگی برنامه‌های کامپیوتری پرسرعت در زمان ارائه آن تحقیق در سال ۱۹۹۸ باشد که باعث شده است اجرای روش‌های سعی و خطای تکرارشونده برای تعیین شبکه بهینه تا حد زیادی دشوار بوده باشد.

¹ Relative Strength of Effect

همین مسئله تا حد بسیاری بر اندرکنش‌های به دست آمده از شبکه تأثیر می‌گذارد.^۱ مزیت بزرگ روش ارائه شده در این است که ماتریس اندرکنش از حالت استاتیکی خارج شده و به صورت یک سیستم پویا با استفاده از هوش مصنوعی مدل‌سازی می‌شود. همچنین در صورت وجود اطلاعات کافی از سیستم مورد نظر، این روش قادر است تا دقیق‌ترین اندرکنش‌های میان پارامترها را بدون نیاز به کارشناس و بدون استفاده از تخمین‌های ذهنی محاسبه نماید. این تفکر یکی از اصلی‌ترین ابزارها در بهبود رویکرد RES از زمان ارائه آن به شمار می‌رود که در رساله حاضر نیز با رفع مشکلات مربوطه از آن استفاده خواهد شد.

۳-۶- تمرکز بر سوابق استفاده از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌ها

در این بخش به بررسی دقیق‌تر سابقه موضوع رساله از جنبه استفاده از روش سیستمی RES در تحلیل پایداری شیب‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور، به مهمترین مطالعات انجام گرفته در این زمینه اشاره می‌شود. قبل از هر چیز ذکر این نکته ضروری است که تاکنون هیچ تحقیقی بر روی ارزیابی پایداری شیب‌های معادن روباز با روش‌های سیستمی انجام نشده و تمام سوابق اشاره شده در این قسمت مربوط به شیب‌های طبیعی و یا زمین‌لغزش‌ها در مناطق شهری و کوهستانی می‌باشد. همچنین، تمام موارد بحث شده به نوعی مطالعات موردی مشابهی هستند که همگی از مراحل تقریباً^۲ یکسانی پیروی کرده‌اند و از این رو نوآوری مهمی در بین آنها به چشم نمی‌خورد.

۳-۶-۱- مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶)

مازوکولا و هادسون در سال ۱۹۹۶ برای اولین بار از رویکرد RES به منظور تحلیل پایداری

^۱ به منظور حصول اطمینان از ضعف‌های اشاره شده، با محقق اصلی (Dr. Yingjie Yang) در دانشگاه De Montfort انگلیس تماس حاصل گردید که این موضوعات مورد تأیید قرار گرفته و در زمینه نحوه استفاده از عامل توان نسبی تأثیر یکپارچه بحث گردید.

شیب‌های سنگی استفاده کردند (Mazzoccola & Hudson, 1996). این مطالعه که بر روی شیب‌های طبیعی رشته‌کوه‌های آلپ مرکزی در ایتالیا انجام شده است، از جمله اولین و مهمترین تحقیقات در این زمینه به شمار می‌رود. هدف اصلی از انجام این تحقیق، ارائه یک روش طبقه‌بندی شیب‌های سنگی نشان‌دهنده پتانسیل ناپایداری در منطقه و سپس استفاده از آن برای 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 است:

الف- شرایط محیطی حاکم بر منطقه: ۱- زمین‌شناسی؛ ۲- چین‌خوردگی‌ها؛ ۳- گسل‌ها؛ ۴- میزان بارندگی؛ ۵- چرخه‌های ذوب و انجماد؛ ۶- ناپایداری‌های پیشین؛ 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 برای کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش 20×20 ساخته شده استفاده کردند. نمودار علت- اثر خروجی در شکل ۳-۱۹ آورده شده است. رتبه‌بندی اهمیت پارامترها نیز در شکل ۳-۲۰ قابل مشاهده است.

در این تحقیق، پس از تعریف شاخص ناپایداری توده سنگ (RMII^۱) و ساخت فهرست‌های رده‌بندی پارامترها با اعداد ۰، ۱ و ۲ به ترتیب برای مشارکت کم^۲، دخیل^۳ و مشارکت زیاد^۴، شیب‌های سنگی موجود در منطقه (۲۰ شیب) را از نظر میزان خطر ناپایداری طبقه‌بندی نمودند. این طبقه‌بندی در

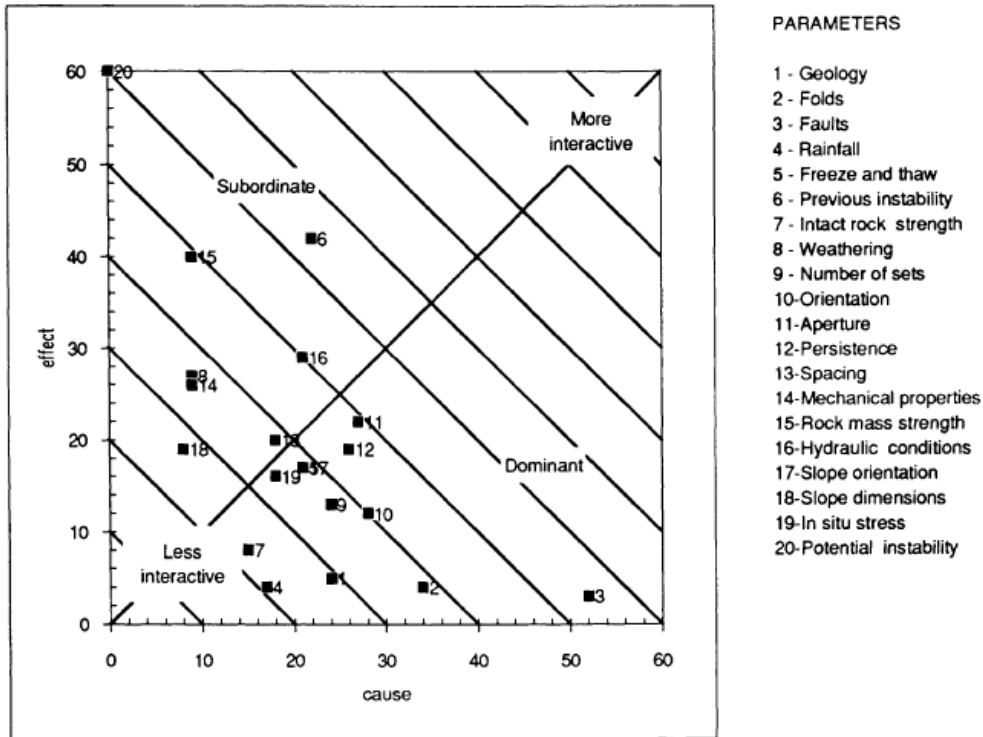
^۱ Rock Mass Instability Index

^۲ Low contribution

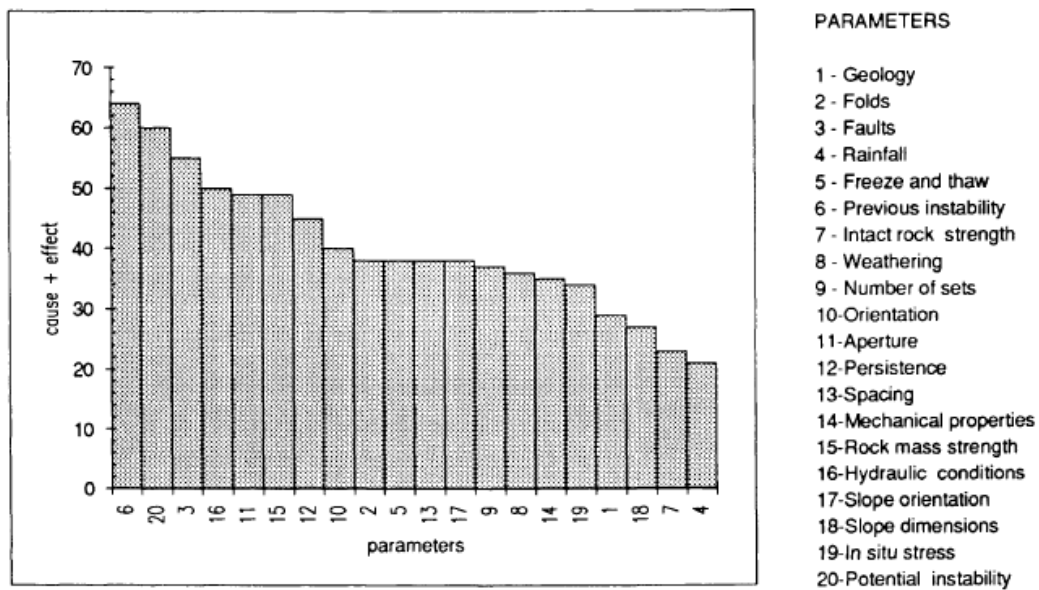
^۳ Contributory

^۴ Strong contribution

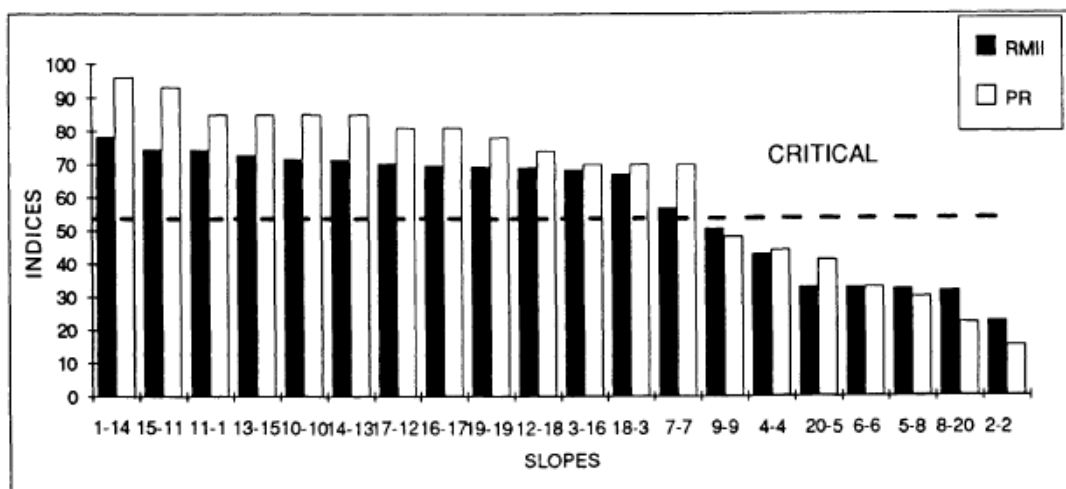
شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۹- نمودار علت- اثر خروجی برای ۲۰ پارامتر سیستم در مطالعه مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)



شکل ۳-۲۰- رتبه‌بندی اهمیت پارامترها برای ۲۰ پارامتر سیستم تحقیق مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)



شکل ۳-۲۱- هیستوگرام شاخص ناپایداری توده سنگ برای شیب‌های منطقه مورد مطالعه در تحقیق مازوکولا و هادسون (Mazzoccola & Hudson, 1996)

کار انجام شده توسط مازوکولا و هادسون با توجه به این که 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.

۳-۶-۲- 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 نیز بر پایداری این شیب‌ها مورد سنجش قرار دهند. برای این منظور آنها دو سری پارامترهای مجزا برای حالت‌های استاتیکی و دینامیکی انتخاب نموده و سپس از روشی کاملاً منطبق بر مراحل انجام کار 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 اندرکنش کدگذاری شده در این تحقیق در شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است.

CAUSE																					
A	1	1	1	0	3	0	2	2	0	3	2	2	1	1	2	2	3	2	0	2	30
B	0	3	2	2	2	1	3	0	0	2	3	3	2	4	4	3	3	3	4	44	
C	1	0	1	2	1	2	0	0	2	3	3	2	4	4	2	3	3	2	35		
D	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	4	3	2	2	3	2	3	2	24	
E	4	0	0	4	0	0	0	0	0	3	0	2	2	3	1	3	3	4	29		
F	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	1	1	1	1	2	1	4	15	
G	2	3	3	0	3	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	2	3	23			
H	2	0	0	0	2	0	3	2	1	2	2	1	2	2	1	4	23				
I	4	0	2	2	2	1	0	0	3	0	0	2	0	0	2	3	3	2	26		
L	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0	0	0	0	0	2	1	4	3	16	
M	2	2	0	0	1	1	2	3	0	2	0	0	2	0	2	0	2	20			
N	0	0	2	0	1	3	0	2	0	0	2	0	0	3	2	1	2	19			
O	1	0	3	2	2	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	3	4	23		
P	1	1	1	1	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	21			
Q	1	0	3	3	4	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	25			
R	1	2	3	3	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25			
S	1	1	5	0	3	3	3	0	0	1	1	5	0	3	3	3	3	22			
T	1	3	0	4	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18			
U	1	0	0	4	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16			
V	1	0	3	2	4	26	0	0	0	2	1	0	3	2	4	4	4	26			
Z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
EFFECT																					
2	1	1	23	2	42	18	26	52	3	6	29	17	11	22	23	22	33	44	39	64	480

EFFECT

شکل ۳-۲۲- ماتریس کدگذاری شده برای ۲۱ پارامتر سیستم برای کار کاستالدینی و همکاران (Castaldini et al., 1998)

۳-۶-۳- ژانگ و همکاران (۲۰۰۴)

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) خطر سقوط سنگ را برای شیب‌های سنگی حاشیه بزرگراه چنگدو- لاسا 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 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 شاخص‌های شدت سقوط سنگ (RII^۱) و فراوانی سقوط سنگ (RFI^۲) کرده و سپس با استفاده از آنها شاخص کلی خطر سقوط سنگ (RHI^۳) را به دست آوردند. با به دست آوردن شاخص‌های یاد شده برای مناطق و ایستگاه‌های مختلف در طول بزرگراه مذکور و با استفاده از فهرست‌های رده‌بندی چهار

^۱ Rockfall Intensity Index

^۲ Rockfall Frequency Index

^۳ Rockfall Hazard Index

قسمتی، آنها توانستند این مناطق را از نظر خطر سقوط سنگ رتبه‌بندی نمایند. در این مطالعه اولین بار شیب‌های سنگی از نقطه نظر خطر سقوط سنگ با روش سیستمی تحلیل شده‌اند.

۳-۶-۴- روزوس و همکاران (۲۰۰۸)

در سال ۲۰۰۸، روزوس و همکارانش روش سیستم‌های مهندسی سنگ 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 اندرکنش ساخته شده را کدگذاری نمودند. پس از مراحل اولیه، ساختار زمین‌شناسی منطقه مهم‌ترین و ارتفاع شیب‌ها کم‌اهمیت‌ترین پارامتر سیستم شناخته شد. در این مطالعه، فهرست‌های طبقه‌بندی دارای پنج بخش بوده و همین امر دقت طبقه‌بندی‌ها را بالاتر برده است.

در نهایت، با استفاده از تعریف یک شاخص ناپایداری 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. با این حال در این تحقیق، عوامل مهمی همچون تنش‌های برجا و خصوصیات ناپیوستگی‌ها در منطقه در نظر گرفته نشده و همین امر از جمله معایب کاربرد اخیر به شمار می‌رود.

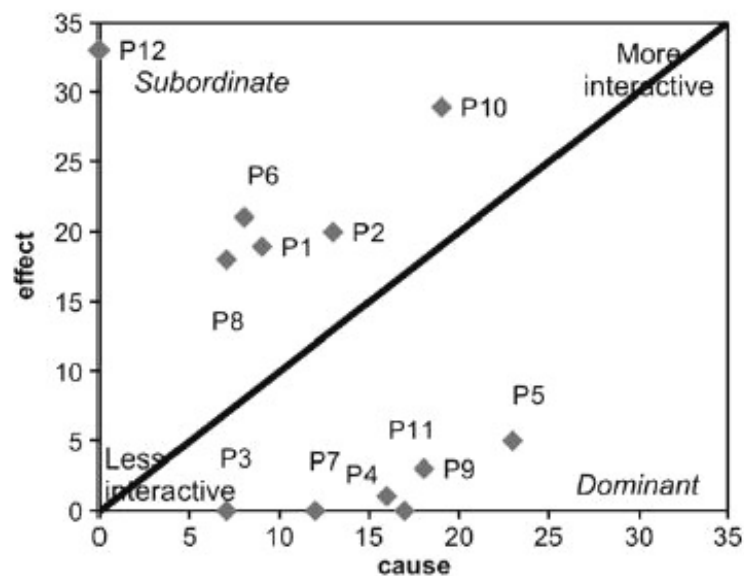
۳-۶-۵- جِریان و جِریان (۲۰۰۸)

مشابه با کار روزوس و همکاران، جریان و جریان در سال ۲۰۰۸ از رویکرد RES به منظور مطالعه و ناحیه‌بندی ریزش شیب‌های طبیعی ناحیه دوگانکت در کشور ترکیه استفاده کردند. مراحل کار در این تحقیق همانند موارد قبلی بوده است. از مزیت‌های این مطالعه می‌توان تعداد طبقه‌های متغیر در فهرست‌ها را نام برد که به اقتضای ماهیت پارامتر از ۴ تا ۷ طبقه برای آنها در نظر گرفته شده است.

همین طور دو ماتریس اندرکنش جداگانه برای شیب‌های سنگی و خاکی ساخته شده است. همچنین از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نیز به منظور ناحیه‌بندی‌ها استفاده شده است که به بهتر نشان دادن نتایج کمک اساسی می‌کند.

۳-۶-۶- 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 شاخصی بنام شاخص ناپایداری تعریف شده است. نمودار علت-اثر پارامترهای این تحقیق در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است.

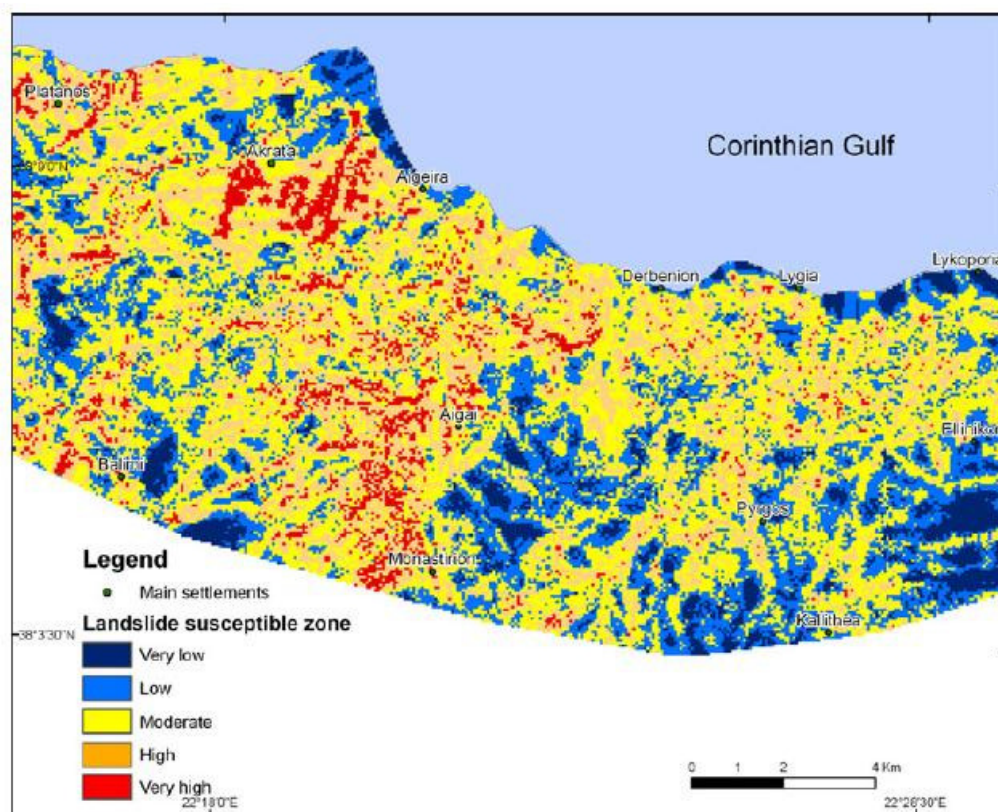


شکل ۳-۲۳- نمودار علت-اثر به دست آمده در مطالعه بودتا و همکاران (Budetta et al., 2008)

۳-۶-۶- روزوس و همکاران (۲۰۱۱)

روزوس و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از رویکرد RES و بهره‌گیری از سیستم اطلاعات

جغرافیایی (GIS) به مطالعه ارزیابی خطر زمین‌لغزش و تهیه نقشه‌های حساسیت برای شیب‌های طبیعی شرق شبه‌جزیره پلوپونسوس در جنوب یونان پرداختند. پارامترهای انتخاب شده در این تحقیق عبارتند از ۱- لیتولوژی؛ ۲- فاصله از خطواره‌های تکتونیکی؛ ۳- زاویه شیب؛ ۴- جهت شیب؛ ۵- میزان بارندگی؛ ۶- ارتفاع محلی؛ ۷- کاربری زمین؛ ۸- فاصله از جاده؛ ۹- فاصله از رودخانه؛ و ۱۰- مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها. فهرست‌های طبقه‌بندی پارامترها شامل ۵ طبقه بوده و پارامترهای زاویه شیب و ارتفاع محلی به ترتیب به عنوان مهمترین و کم‌اهمیت‌ترین پارامترها انتخاب شدند. در نهایت، صحت‌سنجی انجام گرفته بر روی نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش به دست آمده از رویکرد RES (شکل ۳-۲۴) و مقایسه آن با وقایع رخ داده در منطقه، تطبیق قابل قبولی را میان این دو نشان داد.



شکل ۳-۲۴- نقشه حساسیت خطر زمین‌لغزش به دست آمده از رویکرد RES در مطالعه روزوس و همکاران (Rozos et al., 2011)

۳-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا به اصول کلی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ پرداخته شد. همچنین سابقه استفاده از این رویکرد از نقطه نظر بهبود و نیز استفاده از آن در علوم مختلف و به طور ویژه در تحلیل پایداری شیب‌ها بررسی گردید. علاوه بر معایب ذکر شده برای اکثر تحقیق‌های انجام شده تاکنون، به جز چند مورد در تمامی آنها از روش کدگذاری ESQ استفاده شده است که روشی مرسوم ولی متکی بر تصمیمات ذهنی به شمار می‌رود. در این رساله از برخی از بهبودهای انجام گرفته در گذشته بر روی رویکرد RES (بخش ۳-۵) بهره گرفته شده و با تلفیق و بهینه‌سازی آنها روش از حالت ذهنی خارج می‌شود. هدف، بررسی پارامترهای موثر و ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز با ارائه شاخصی برای این منظور است که در فصل‌های آینده به آن پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

**بکارگیری رویکرد RES برای تحلیل پایداری
شیب‌های سنگی**

۴-۱- مقدمه

در این فصل، از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به منظور تحلیل پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی استفاده می‌شود. در این مرحله، به عنوان شروع کار، شیب‌های مهندسی شده کنار جاده‌ای (در منطقه‌ای در شمال شرقی ایران) برای این منظور انتخاب شده‌اند. تمام مراحل رویکرد RES متداول به ترتیب دنبال شده و پس از تحلیل اهمیت پارامترها در سیستم، وضعیت پایداری با تعریف و محاسبه شاخص برای ایستگاه‌های مورد مطالعه به طور ساده بر روی نقشه منطقه نگاشته می‌شود.^۱ در نهایت، نتایج به دست آمده از این رویکرد با نتایج یک روش تجربی طبقه‌بندی شیب سنگی مقایسه شده و بدین ترتیب رویکرد بکار رفته (در حالت متداول آن) مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد.

۴-۲- منطقه انتخاب شده و شیب‌های سنگی مورد مطالعه

منطقه مورد نظر در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ خوش‌بیلاق بین طول‌های جغرافیایی $۵۵^{\circ} ۰۰'$ و $۵۵^{\circ} ۳۰'$ و عرض‌های جغرافیایی $۳۷^{\circ} ۰۰'$ و $۳۶^{\circ} ۳۰'$ واقع شده است. مهمترین راه دسترسی به منطقه، جاده آسفالت‌شده شاهرود-آزادشهر می‌باشد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۰). آب و هوای منطقه خنک و کوهستانی بوده و میانگین میزان بارندگی سالیانه

^۱ این مرحله از کار در قالب یک پژوهش (کاکایی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸) و به منظور شناخت بیشتر رویکرد RES انجام گردیده است.

۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد (اداره کل آمار و فناوری اطلاعات، 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.

از نظر ریخت‌شناسی، منطقه از ارتفاعات و کوه‌های سر به فلک کشیده‌ای تشکیل شده که چهره یک منطقه‌کاملاً 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 شمال‌شرقی- جنوب‌غربی 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).

مهمترین سازند تشکیل‌دهنده منطقه سازند خوش‌بیلاق می‌باشد. این سازند در ناحیه از گسترش و ضخامت بالایی برخوردار است و ارتفاعات متوسطی را تشکیل می‌دهد. سازند مذکور در مجموع از طبقات نازک تا متوسط لایه آهکی با میان‌لایه‌های مارنی و آهک، دولومیت ضخیم‌لایه، انواعی از ماسه‌سنگ، 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 چین‌خوردگی و بهم‌ریختگی، 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 خوش‌بیلاق در گردنه خوش‌بیلاق 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 ماسه‌سنگ کوارتزی سفید، دولومیت و

لایه‌های آهکی است که با توجه به محتوای فسیلی به کووینین تا فرسینین تعلق دارند.

ضخامت این بخش به ۶۳۴ متر می‌رسد.

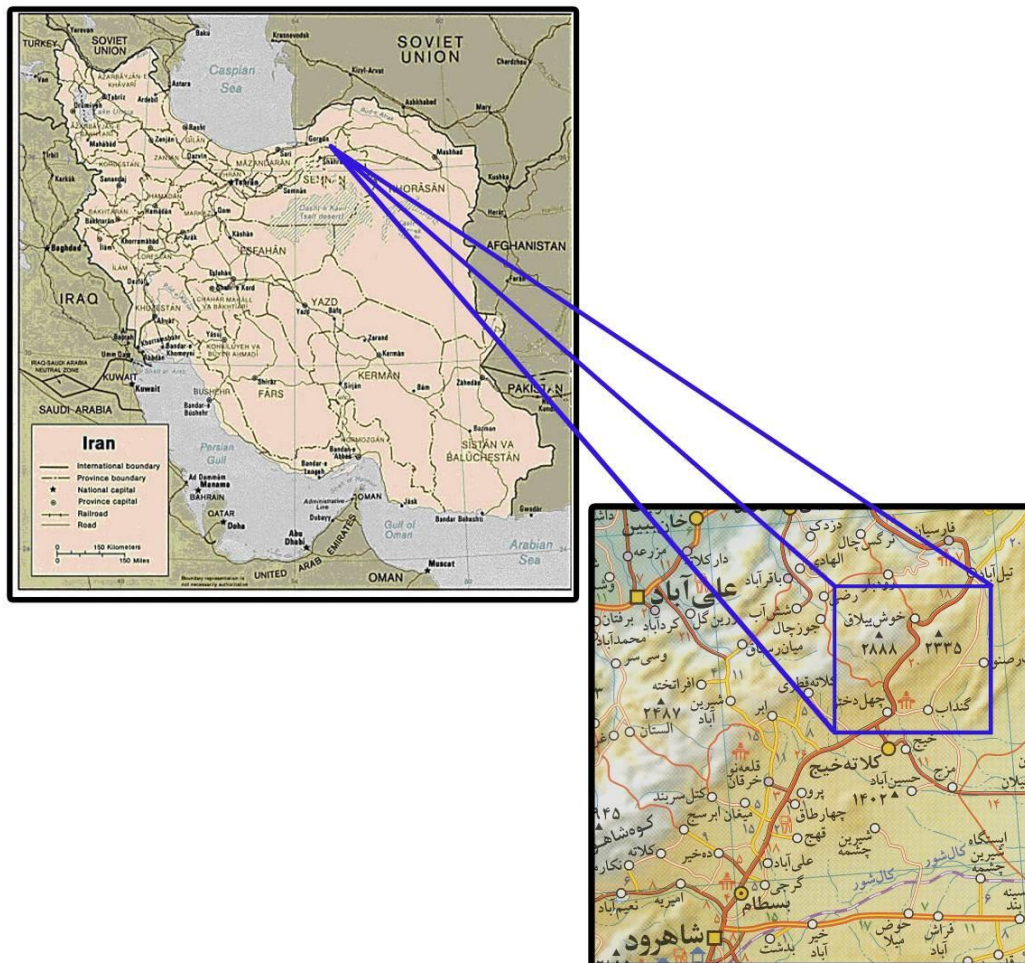
✓ بخش میانی (D_{kh}^2): از ماسه‌سنگ کوارتزی قرمز رنگ به ضخامت ۱۴۵ متر تشکیل شده

است.

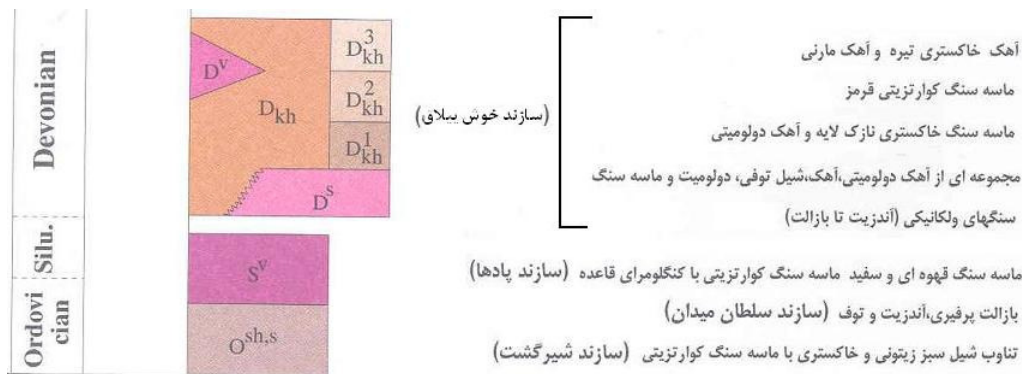
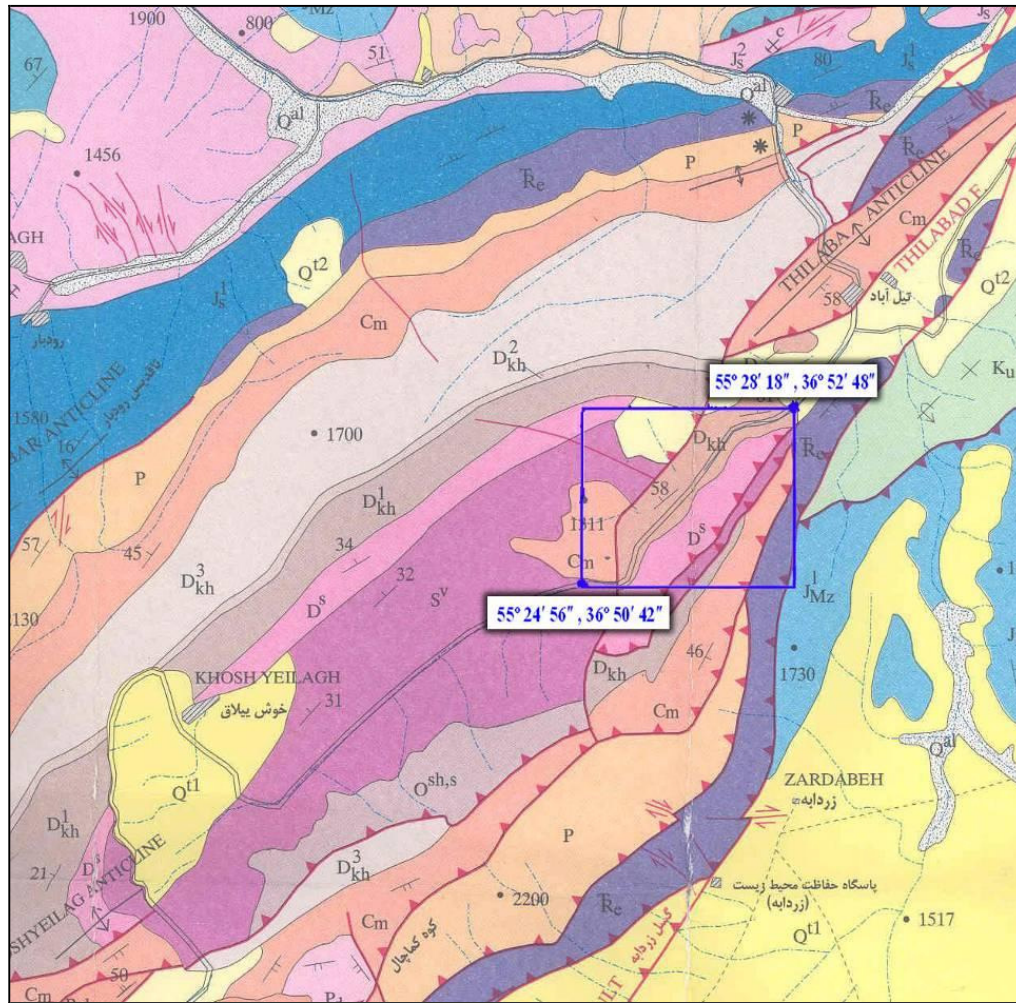
✓ بخش فوقانی (D_{kh}^3): این بخش ۵۷۵ متر ارتفاع داشته و شامل سنگ آهک‌های بایوکلاستیک

و آهک مارنی است. فسیل‌های فراوان براکیوپود موجود در این واحد سن فمینین را نشان

می‌دهد.



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



شکل ۴-۲- بخشی از نقشه زمین‌شناسی خوش ییلاق با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰؛ ناحیه محدوده مورد مطالعه به

صورت کادر مستطیلی مشخص شده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۱۳۸۰)

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

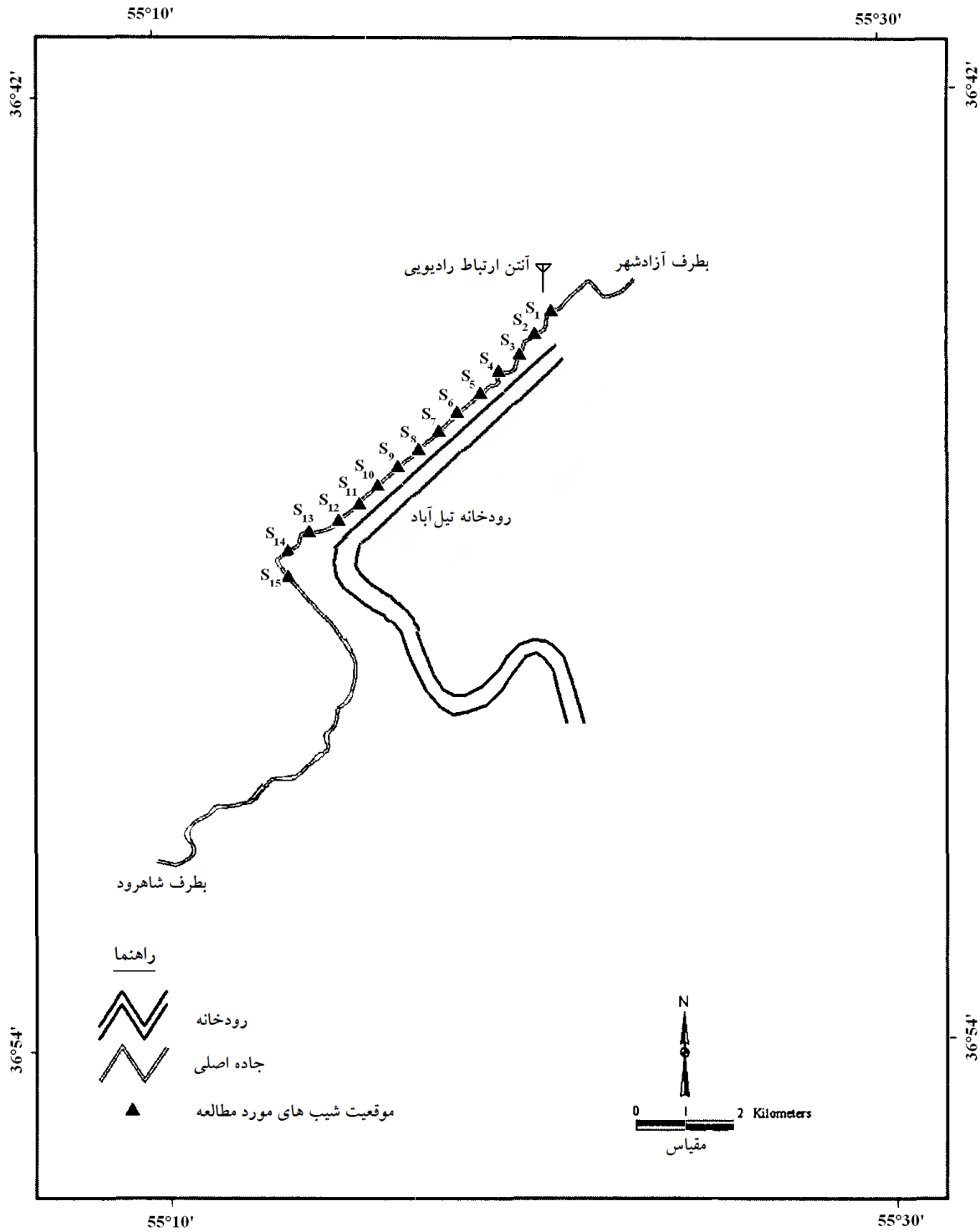
است. گسل‌های امتدادلغز نیز در مقیاس کوچک وجود دارند که معمولاً گسل‌های تراستی را قطع کرده‌اند. گسل اصلی عمل کرده بر روی منطقه دقیق نمونه‌برداری، گسل کلاته‌بن می‌باشد. روند این گسل تقریباً E-W است و از نوع گسل‌های راندگی می‌باشد. همچنین شیب سطح گسلی به سمت شمال است. در اثر عملکرد این گسل، سازند الیکا 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 خوش‌بیلاق 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).

محل دقیق مورد مطالعه در این قسمت از تحقیق، شیب‌های سنگی مشرف به جاده در نواحی شمالی گردنه خوش‌بیلاق 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 ۳-۴ قابل مشاهده هستند. همچنین تصاویر برخی شیب‌های سنگی با نام آنها در شکل‌های ۴-۴ تا ۷-۴ 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 (S4)



شکل ۴-۶- منطقه مورد مطالعه؛ ایستگاه شماره ۹ (S9)



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

۳-۴- عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه

در این بخش، مهمترین عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده (P₁ تا P₁₇) و هر یک جداگانه مورد بحث قرار گرفته‌اند. بدیهی است که این عوامل با توجه به نوع پروژه و شرایط منطقه‌ای متفاوت خواهند بود.

۱-۳-۴- زمین‌شناسی و لیتولوژی

همان‌طور که در بخش 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 پیچیده‌ای از سنگ‌های مختلف لیتولوژی غالب شیب‌های سنگی مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. ماسه‌سنگ‌های مذکور از انواع نسبتاً همگن هستند، در حالی که دانه‌بندی‌ها در مورد آهک‌های مارنی و ترکیب‌های مشاهده شده منظم نمی‌باشد.

۲-۳-۴- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها

گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها در مطالعات مهندسی سنگ از اهمیت بخصوصی برخوردار هستند. این پدیده‌ها معمولاً سبب تشکیل دسته درزه‌های اصلی در همان جهت شکل‌گیری خود می‌شوند. در منطقه خوش‌ییلاق، گسل‌های اصلی در راستای گسل‌خوردگی غالب منطقه بوده و ریخت‌شناسی این ناحیه را کنترل کرده‌اند. همان‌طور که ذکر شد، 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).

۴-۳-۳- 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 قادرند توده سنگ را تحت تأثیر قرار داده و صفحات برش را به مقاومت نهایی و سپس باقیمانده برسانند. همین‌طور، توده سنگ شکسته شده همیشه به پایداری کامل نرسیده و احتمال شکست مجدد در آن وجود دارد. علاوه بر اینها، در اثر حرکت اجزای توده سنگ، به دلیل آزادشدگی تنش و در نتیجه باز شدن شکستگی‌ها، ضعیف‌شدگی به توده سنگ القا می‌گردد.

از دیدگاه دیگر، عامل شکست می‌تواند سبب دستیابی به یک وضعیت پایدارتر گردد، چرا که احتمال قرارگیری سنگ‌ها در زوایای شیب 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 گردید.

۴-۳-۴- مقاومت سنگ بکر

این پارامتر تأثیر بسیاری در مقاومت توده سنگ 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.

۴-۳-۵- هوازدگی

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 توده سنگ‌های 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.

۴-۳-۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها

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

۴-۳-۷- 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.

۴-۳-۸- شرایط هیدرولیکی

این شرایط خصوصیتی از توده سنگ که جریان را کنترل می‌کنند (نظیر نفوذپذیری، اتصال شکستگی‌ها و درزه‌ها به یکدیگر و مسیرهای عبور آب) را در بر می‌گیرد. جریان آب و حتی مرطوب بودن بخش‌هایی از توده سنگ می‌تواند باعث ایجاد هوازگی شدید و نیز به دلیل به وجود آمدن فشار منفذی تأثیر منفی بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی درزه‌های سنگی داشته باشد. 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 آنها است.

۴-۳-۹- 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 اندرکنش‌های ناشی از آنها می‌باشد. بنابراین پارامتر ارتفاع به صورت مستقیم بر شکست و ناپایداری شیب سنگی تأثیر ندارد، بلکه اندرکنش‌های 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 دارا است که این پارامتر نیز مانند ارتفاع شیب‌ها نتیجه اندرکنش‌های میان پارامترهای دیگر است.

۴-۳-۱۰- 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 می‌تواند باعث جدا شدن مواد و سنگ‌ها از پاشنه

شیب‌ها شود؛

- افزایش جریان‌های نزدیک به سطح که موجب فرسایش شیب‌ها می‌شود؛
 - بالا رفتن تراز آب زیرزمینی که بسته به نفوذپذیری توده سنگ می‌تواند باعث اشباع کامل آن گردیده و نیز فشار منفذی اضافی را در درزه‌ها و شکستگی‌ها ایجاد نماید؛ و همچنین
 - افزایش وزن توده سنگ ناپایدار.
- موارد ذکر شده 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.

۴-۳-۱۱- چرخه‌های ذوب و انجماد^۱

پدیده ذوب و انجماد 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 از طریق تلفیق با پاره‌ای از شرایط محیطی می‌تواند موجب تغییر در خصوصیات مقاومتی، تداوم و بازشدگی درزه‌ها، هوازگی و شرایط هیدرولیکی گردد که در نهایت ناپایداری را در شیب سنگی افزایش می‌دهد. به وجود آمدن این پدیده مستلزم وجود شرایطی مانند آب در درزه‌ها و درزه‌های افقی باز است. در منطقه خوش‌بیلاق که جزو 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 ذوب و انجماد می‌باشد.

۴-۴- اندرکنش‌های میان پارامترهای انتخاب شده

به منظور درک چگونگی اندرکنش پارامترهای توضیح داده شده در بخش قبل، نیاز به یک

^۱ Freeze and thaw cycles

مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر تغییر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. بنابراین، شانزده پارامتر لیست شده در قسمت قبل در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش به همراه درایه آخر (درایه پایین سمت راست) که توسط "ناپایداری بالقوه" پر می‌شود، قرار می‌گیرند. درایه آخر اشاره شده در واقع موضوع مورد مطالعه است. ستون اندرکنش‌هایی که از این درایه عبور می‌کند، نشان می‌دهد که چگونه سیستم توده سنگ، ناپایداری بالقوه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به همین شکل سطر عبوری از این درایه نشان دهنده اثر ناپایداری بالقوه بر توده سنگ 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).

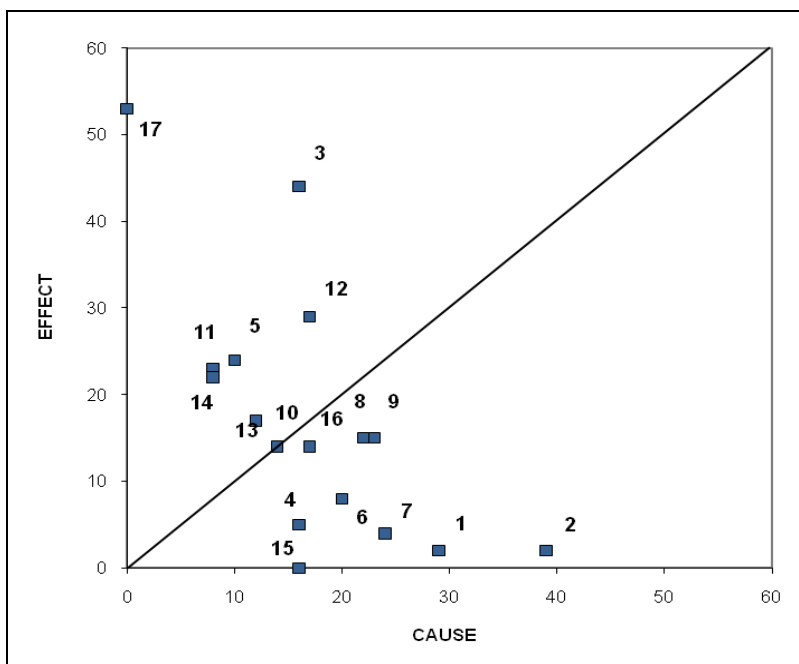
ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق در جدول ۴-۱ آورده شده است. شکل ۴-۸ نیز نمودار علت-اثر پارامترها را نشان می‌دهد. همان طور که در فصل قبل نیز اشاره شد، در این نمودار، قطر نشان‌دهنده مکان هندسی $C=E$ است. در طول این قطر، مجموع $C+E$ افزایش می‌یابد و خطوط شدت اندرکنش مساوی (مقادیر $C+E$) بر روی نمودار رسم می‌شوند تا تفاوت میان اندرکنش‌های 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. نمودار علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه بسیار حائز اهمیت بوده و قادر است اندرکنش‌های سودمند و غیرسودمند از نظر مهندسی را مشخص سازد. محاسبه میزان اندرکنش 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.

جدول ۴-۱- ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق

		Cause																																	
P ₁	2	3	3	3	2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	29	
2	P ₂	3	0	1	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	39	
0	0	P ₃	0	1	0	0	2	0	1	2	1	3	3	3	0	1	2	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	
0	0	2	P ₄	3	2	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	10
0	0	3	2	P ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
0	0	3	0	2	P ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
0	0	3	0	0	0	P ₇	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	22
0	0	3	0	3	0	0	P ₈	2	2	3	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
0	0	3	0	2	0	0	1	P ₉	1	2	3	3	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	14
0	0	3	0	1	0	0	1	1	P ₁₀	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	P ₁₁	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
0	0	3	0	3	0	0	2	1	0	3	P ₁₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
0	0	3	0	0	0	0	0	1	1	0	2	P ₁₃	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	
0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
0	0	3	0	3	0	0	3	2	0	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2	2	44	5	24	8	4	15	15	14	23	29	17	22	0	14	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

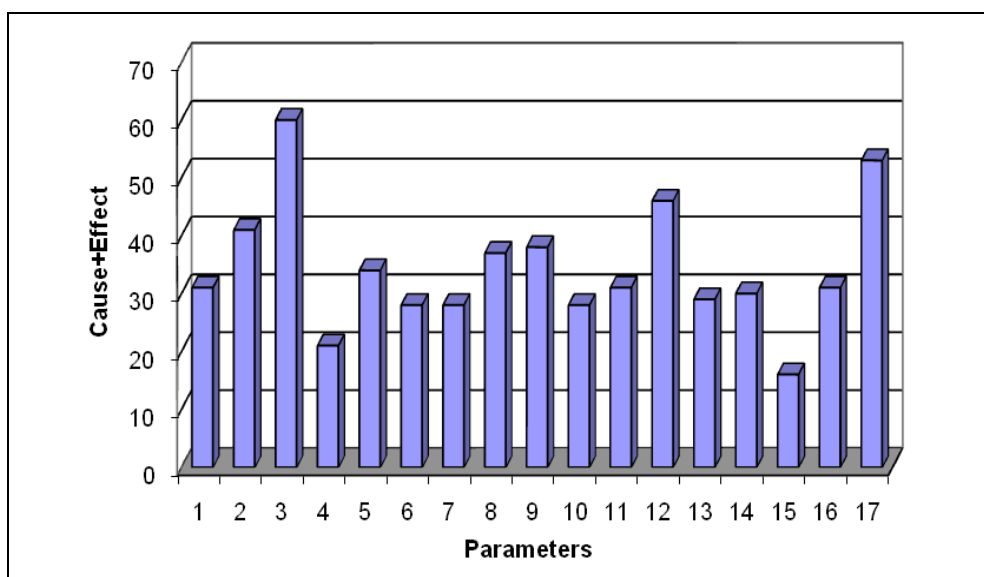
Effect

P₁: زمین‌شناسی و لیتولوژی؛ P₂: گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها؛ P₃: ناپایداری پیشین؛ P₄: مقاومت سنگ بکر؛ P₅: هوازگی؛ P₆: تعداد دسته درزه‌ها؛ P₇: جهت‌یافتگی درزه‌ها؛ P₈: بازشدگی درزه‌ها؛ P₉: تداوم درزه‌ها؛ P₁₀: فاصله‌داری درزه‌ها؛ P₁₁: مقاومت برشی درزه‌ها؛ P₁₂: شرایط هیدرولیکی؛ P₁₃: ارتفاع شیب؛ P₁₄: زاویه شیب؛ P₁₅: میزان بارندگی؛ P₁₆: چرخه‌های ذوب و انجماد؛ P₁₇: ناپایداری بالقوه



شکل ۴-۸- نمودار علت-اثر برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش بیلاق

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 "زمین‌شناسی و لیتولوژی"، "گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها" و "جهت‌یافتگی درزه‌ها" بیشترین تسلط را بر سیستم دارند. با به دست آوردن مجموع علت‌ها و اثرها برای هر پارامتر (C+E) می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم نمود (شکل ۴-۹).



شکل ۴-۹- هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها

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.

هیستوگرام شدت اندرکنش 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.

۴-۵- تشکیل فهرست‌های طبقه‌بندی و به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز

با این که 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 فهرست‌های رده‌بندی انتخاب می‌شوند. لیست ۱۶ پارامتر وابسته در منطقه جاده خوش‌بیلاق در نظر گرفته شده و اطلاعات برای ۱۵ شیب سنگی جمع‌آوری شد (اطلاعات مربوط به این پارامترها شامل برداشتها و آزمایشات انجام شده در پیوست الف رساله آورده شده است). 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 شاخص ناپایداری ممکن نبوده و بنابراین یک طبقه‌بندی برای مقادیر مختلف کیفیت‌ها و مقادیر پارامترها تعیین شده است. سه طبقه برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای "سه‌م کم"، ۱ برای "سه‌م" و ۲ برای "سه‌م زیاد" پارامترها تعیین شده است. بنابراین رده‌های

بالتر به طبقاتی از پارامترها اختصاص می‌یابند که در ارتباط با ناپایداری بیشتری می‌باشند (جدول ۴-۲). در ادامه هر یک از فهرست‌ها جداگانه تشریح می‌شوند.

جدول ۴-۲- فهرست‌های طبقه‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

رده‌بندی اختصاص یافته			پارامتر
۲	۱	۰	
آهک ماری	ترکیب ماسه‌سنگ و آهک ماری	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)
هوازدگی شدید همراه با مواد پرکننده	تغییر رنگ در سطوح	هوازده	هوازدگی (سطوح درزه‌ها)
بیشتر از ۳	۳-۱	۱	تعداد دسته درزه‌ها
بیشتر از ۵	۲ تا ۵	کمتر از ۲	جهت یافتگی درزه‌ها (تعداد دسته درزه‌ها 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	ذوب و انجماد (چرخه‌ها در سال)

۴-۵-۱- 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 فهرست، ماسه‌سنگ خاکستری رده

صفر، ترکیب ماسه‌سنگ و آهک مارنی رده یک، و آهک مارنی رده دو را دارا است.

۴-۵-۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها

برای گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها در یک شیب سنگی در صورت عدم وجود، طبقه صفر، وجود پدیده‌ها به صورت گسل‌ها و چین‌های فرعی و جزئی، طبقه یک و دیده شدن گسل‌ها و چین‌های اصلی طبقه 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 ۴-۱۰ آورده شده است.



شکل ۴-۱۰- نمونه‌ای از گسل‌های اصلی بر روی شیب سنگی شماره ۱۱

۴-۵-۳- ناپایداری پیشین

وجود ناپایداری پیشین در شیب‌های سنگی به سه طبقه غیرفعال، ساکن و فعال تقسیم‌بندی شده است (با رده‌های صفر، یک و دو). با توجه به تعریف ارائه شده توسط وارنز^۱ (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 حرکت‌ایشکست ممکن است مجدداً رخ دهد؛ و شیب‌های فعال شیب‌هایی هستند که هم اکنون در آنها بلوک‌های سنگی در حال حرکت می‌باشند.

۴-۵-۴- 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 طبقه 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).

۴-۵-۵- تعداد دسته درزه‌ها و جهت‌یافتگی

برداشت کاملی از درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در شیب‌های سنگی مورد مطالعه انجام گرفته (پیوست الف) و اطلاعات جمع‌آوری شده برای هر شیب بر روی شبکه‌های قطبی رسم گردید. با استفاده از نقشه‌های کنطوری، دسته درزه‌های اصلی شناسایی شده و همچنین جهت‌های بحرانی اصلی درزه‌ها در هر شیب مشخص شدند. بنابراین این امکان به وجود آمد که جهت‌های اصلی ناپایداری (که شامل سطوح ناپیوستگی موازی با جهت گسل‌ها هستند) و جهت‌های ناپایداری فرعی یا جزئی (شامل سایر

^۱ Varnes

دسته درزه‌ها) تعیین گردند. بنابراین در طبقه‌بندی‌ها از تعداد دسته درزه‌های اصلی و جهت‌های اصلی ناپایداری استفاده شد، بدین ترتیب که طبقه‌های بالاتر به تعداد بیشتر دسته‌ها یا جهت‌های ناپایداری نسبت داده شد.

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

برای این پارامترها، پس از برداشت تمام شیب‌های سنگی مورد مطالعه، میانگین تعداد آنها منظور گردید. برای فاصله‌داری، رده‌های 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^۱ در نظر گرفته شده در نمایی طبیعی بر روی شیب (ایستگاه) شماره ۷ در شکل ۴-۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۱- نمایی از خط برداشت در نظر گرفته شده بر روی شیب سنگی شماره ۷

^۱ Scanline

۴-۵-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها

در مورد شیب‌های سنگی منطقه، مقدار مشخصه پارامترهای چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک (ϕ) برای درزه‌ها تعیین گردید (نتایج آزمایشات مربوطه در پیوست الف آورده شده است). برای رسیدن به یک پارامتر واحد، با استفاده از معیار مقاومت برشی درزه‌های سنگی، مقاومت برشی حداکثر درزه‌ها (τ_p) در تنش قائم (σ_n) یکسان به دست آمد. رابطه بین مقاومت برشی حداکثر و تنش عمودی را می‌توان به صورت معادله مور-کولمب^۱ نمایش داد:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (۴-۱)$$

در فهرست‌های طبقه‌بندی، رده‌های بالاتر به مقاومت‌های برشی پایین‌تر اختصاص یافته است.

۴-۵-۸- 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 برای درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها (ISRM, 2007) با صفر برای درزه‌های خشک، یک برای درزه‌های مرطوب و دو برای درزه‌های دارای جریان قابل توجه آب اختصاص یافت.

۴-۵-۹- 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 و از این رو در طبقه‌بندی‌ها نیز این موضوع لحاظ گردید. مقادیر بیشتر به طبقات بالاتر و معرف ناپایداری بیشتر اختصاص یافت.

^۱ Mohr-Culomb

۴-۵-۱۰- میزان بارندگی و چرخه‌های ذوب و انجماد

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 ذوب و انجماد کسب خواهند کرد. با این حال، فهرست‌های رده‌بندی به گونه‌ای طبقه‌بندی 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 آن و برای پارامتر ذوب و انجماد، تعداد چرخه‌ها در سال با توجه به تغییرات دمایی در طول فصول مختلف در نظر گرفته شده است. با افزایش این مقادیر، رده‌های بالاتر به طبقات ناپایدارتر اختصاص می‌یابند.

۴-۶- رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه از نظر میزان ناپایداری

با توجه به هیستوگرام شدت اندرکنش در قسمت‌های قبل (شکل ۴-۹) می‌توان دریافت که امکان حذف هیچ یک از پارامترها وجود نداشته 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 ۴-۳ آورده شده است. در ردیف ما قبل آخر این جدول، مقادیر نرمالایزشده C+E به جمع کل آن قابل مشاهده است. در ردیف انتهایی جدول مذکور، a_i به عنوان ضریب وزنی هر پارامتر آورده شده است که حاصل مقیاس‌بندی مقدار نرمالایزشده قبلی با رده بیشینه هر پارامتر در فهرست‌های طبقه‌بندی (MP_{ij}) است.

$$a_i = \frac{1}{MP_{ij}} \times \frac{(C+E)}{\sum_i (C+E)} \% \quad (۲-۴)$$

به این ترتیب می‌توان شاخص ناپایداری شیب‌ها (SII^1) را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$SII_j = \sum_{i=1}^{16} a_i \times P_{ij} \quad (3-4)$$

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

پس از محاسبه پارامترهای تعریف شده، شاخص ناپایداری هر شیب (SII) به دست آمده و بدین ترتیب شیب‌های منطقه از نظر میزان ناپایداری ارزیابی و رده‌بندی می‌شوند. جدول ۳-۴ رده‌بندی هر پارامتر در شیب‌های مختلف، ضرایب وزنی پارامترها و در نهایت شاخص محاسبه شده برای هر شیب سنگی را نشان می‌دهد.

پس از به دست آوردن شاخص‌های ناپایداری برای هر شیب سنگی مورد مطالعه، می‌توان آنها را با توجه به جدول ۴-۴ طبقه‌بندی نمود.

¹ Slope Instability Index

جدول ۳-۴ - رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه

P	Parameters rating																SII _i
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄	P ₁₅	P ₁₆	
1	0	1	1	1	2	1	0	1	1	2	0	0	1	2	1	1	3
2	1	1	2	1	2	1	1	0	1	2	0	0	0	2	1	1	6
3	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	0	0	0	2	1	1	7
4	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1	0	0	0	2	1	1	9
5	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	2	1	1	9
6	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	9
7	0	1	2	0	1	2	1	1	0	2	1	0	2	2	1	1	6
8	1	1	2	1	1	1	0	1	2	2	0	0	0	2	1	1	9
9	1	2	2	1	2	2	1	1	1	2	0	0	1	2	1	1	6
10	1	2	2	1	2	2	1	0	2	2	0	0	1	2	1	1	6
11	2	2	2	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	2	1	1	6
12	1	1	1	2	1	1	1	0	1	1	1	0	1	2	1	1	6
13	2	0	0	2	1	1	1	2	2	1	0	0	1	1	1	1	4
14	1	1	0	2	1	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	4
15	1	1	1	2	2	2	1	0	1	2	1	0	1	2	1	1	3
Max P _{ij}	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$\frac{(C+E)}{\sum_i (C+E)} \%$	6	6	3	6	6	9	9	6	8	9	6	6	8	6	9	6	0
a _i	9	8	6	9	3	6	6	9	9	6	6	8	3	6	3	9	

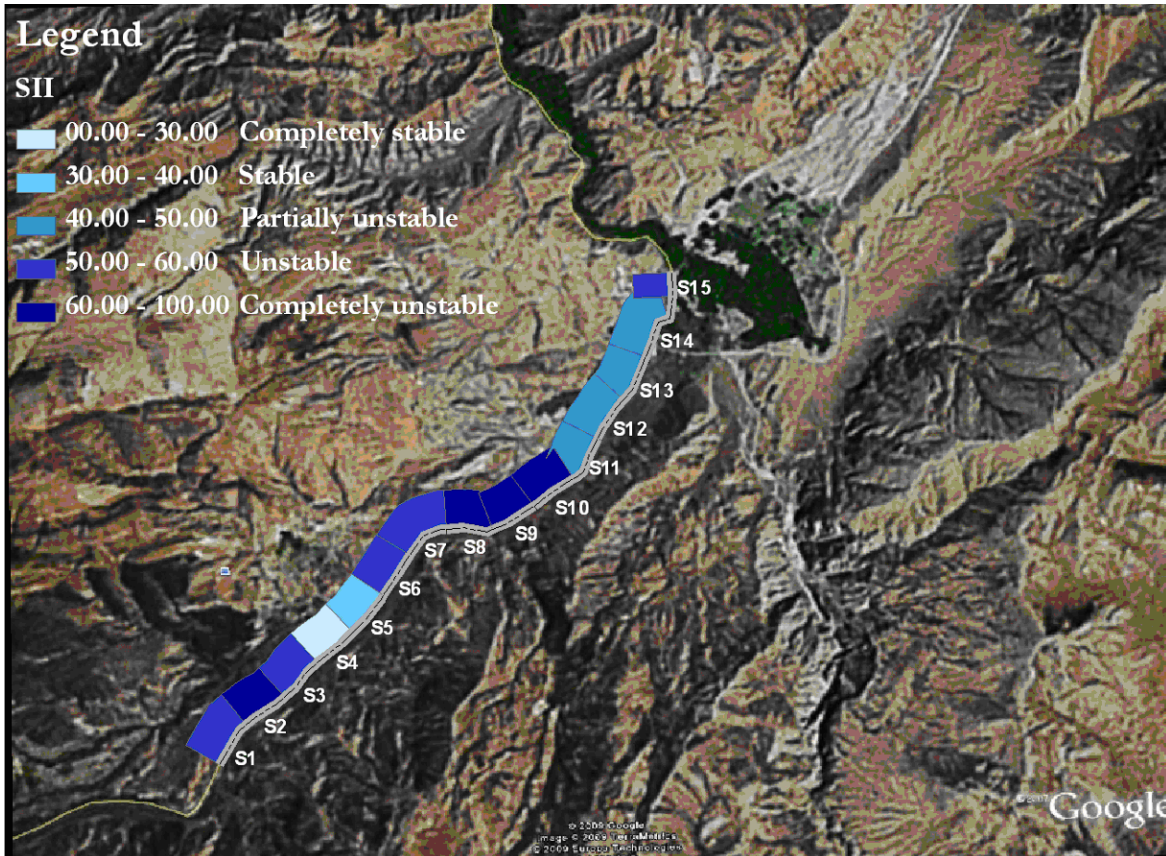
جدول ۴-۴- طبقه‌بندی کیفی پیشنهادی برای شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه

محدوده شاخص ناپایداری	طبقه	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

در نهایت جدول ۴-۵ شاخص‌های ناپایداری، طبقات اختصاص یافته و وضعیت پایداری تعیین شده برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نتایج در شکل ۴-۱۲ به صورت نگاشته شده بر روی نقشه هوایی منطقه نشان داده شده است. از تعداد ۱۵ شیب مورد مطالعه، ۴ شیب در طبقه کاملاً ناپایدار، ۵ شیب ناپایدار، ۴ شیب تاحدی ناپایدار، یک شیب پایدار و یک شیب کاملاً پایدار طبقه‌بندی می‌شوند.

جدول ۴-۵- رده‌بندی نهایی به دست آمده برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه

شماره شیب سنگی	شاخص ناپایداری (SII)	طبقه اختصاص یافته	وضعیت پایداری
S1	۴۵/۸۴	متوسط	تاحدی ناپایدار
S2	۵۰/۸۵	بد	ناپایدار
S3	۶۲/۵۷	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S4	۴۳/۵۰	بد	ناپایدار
S5	۲۵/۹۹	خیلی خوب	کاملاً پایدار
S6	۳۲/۰۴	خوب	پایدار
S7	۵۳/۶۹	بد	ناپایدار
S8	۵۲/۰۸	بد	ناپایدار
S9	۶۳/۶۱	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S10	۶۳/۷۰	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S11	۶۶/۳۵	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S12	۴۶/۹۸	متوسط	تاحدی ناپایدار
S13	۴۱/۶۸	متوسط	تاحدی ناپایدار
S14	۴۴/۶۱	متوسط	تاحدی ناپایدار
S15	۵۵/۴۸	بد	ناپایدار



شکل ۴-۱۲- نتایج شاخص ناپایداری نگاشته شده بر نقشه شیب‌های سنگی منطقه خوش بیلاق

۴-۷- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از یک روش تجربی

در این بخش نتایج و طبقات به دست آمده از روش RES برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه در منطقه، با نتایج روش تجربی طبقه‌بندی شیب سنگی (SMR) مقایسه شده و بدین ترتیب رویکرد بکار رفته در این تحقیق مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. روش SMR از جمله روش‌های تجربی است که توسط رومانا^۱ در سال ۱۹۸۵ ارائه شده است (Romana, 1985). این روش به دلیل در نظر گرفتن برخی پارامترهای مهم و کلیدی، همواره کاربرد ویژه‌ای در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی داشته است. به دست آوردن مقدار عددی SMR برای هر شیب سنگی نیازمند استفاده از رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) و محاسبه ضرایب تعدیل مربوط به هندسه شیب و درزه و روش

^۱ Romana

فصل چهارم بکارگیری رویکرد RES برای تحلیل پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی

حفاری شیب طبق جدول ۴-۶ می‌باشد. در نهایت برای هر شیب مقدار عددی SMR به دست می‌آید که با توجه به طبقه‌بندی مربوطه (جدول ۴-۷)، میزان ناپایداری و طبقه اختصاص یافته به آن مشخص می‌گردد.

جدول ۴-۶- ضرایب تعدیل ناپیوستگی‌ها برای اعمال بر RMR در روش SMR (Romana, 1985)

$\beta_j =$ زاویه شیب درزه		$\alpha_j =$ امتداد درزه			ضرایب تعدیل ناپیوستگی‌ها (F_3, F_2, F_1)
$\beta_s =$ زاویه شیب سنگی		$\alpha_s =$ امتداد شیب سنگی			
بسیار نامطلوب	نامطلوب	متوسط	مطلوب	بسیار مطلوب	
$< 5^\circ$	$5^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$> 30^\circ$	شکست صفحه‌ای: $ \alpha_j - \alpha_s $ واژگونی: $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $
۰/۱۵	۰/۴۰	۰/۷۰	۰/۸۵	۱/۰۰	مقدار F_1
$F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$					رابطه
$> 45^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$< 20^\circ$	$ \beta_j $
۰/۱۵	۰/۴۰	۰/۷۰	۰/۸۵	۱/۰۰	شکست صفحه‌ای مقدار F_2 واژگونی
۱/۰۰					رابطه
$F_2 = \tan^2 \beta_j$					رابطه
$< (-10^\circ)$	$(-10^\circ) - 0$	0°	$0^\circ - 10^\circ$	$> 10^\circ$	شکست صفحه‌ای: $\beta_j - \beta_s$ واژگونی: $\beta_j + \beta_s$
-	-	$> 120^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$< 120^\circ$	مقدار F_3
۰	-۶	-۲۵	-۵۰	-۶۰	مقدار F_3
F_3 (ضرایب تعدیل جهت‌یافتگی درزه ارائه شده توسط بیناوسکی، ۱۹۷۶)					رابطه
$F_4 =$ مقادیر تجربی روش حفاری					F_4 : فاکتور تعدیل روش حفاری
آتشفباری ضعیف	آتشفباری یا حفر مکانیکی	آتشفباری کنترل شده	پیش‌شکافی	شیب طبیعی	مقدار F_4
-۸	۰	+۸	+۱۰	+۱۵	

جدول ۴-۷- طبقه‌بندی شیب‌های سنگی در روش تجربی SMR (Romana, 1985)

طبقه	SMR	رده‌بندی اختصاص یافته	وضعیت پایداری
I	۸۱-۱۰۰	خیلی خوب	کاملاً پایدار
II	۶۱-۸۰	خوب	پایدار
III	۴۱-۶۰	متوسط	تاحدی پایدار
VI	۲۱-۴۰	بد	ناپایدار
V	۰-۲۰	خیلی بد	کاملاً ناپایدار

به منظور محاسبه مقدار SMR برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه، برداشت‌ها و اندازه‌گیری‌های تکمیلی در منطقه انجام گردید. در ابتدا مقدار RMR هر شیب محاسبه شده و سپس ضرایب تعدیل مربوط به هندسه شیب و درزه و روش حفاری شیب به دست آمدند تا مقادیر نهایی SMR برای هر شیب مشخص گردد. مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای مذکور در جدول ۴-۸ قابل مشاهده‌اند.

جدول ۴-۸- محاسبه مقادیر SMR برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه

وضعیت پایداری	مقدار SMR	ضرایب تعدیل				مقدار RMR	شماره شیب سنگی
		F4	F3	F2	F1		
تاحدی ناپایدار	۴۶/۴۳	۰	-۶	۰/۸۵	۰/۷۰	۵۰	S1
ناپایدار	۲۰/۰۰	۰	-۵۰	۱/۰۰	۰/۴۰	۴۰	S2
کاملاً ناپایدار	۱۶/۷۵	۰	-۲۵	۱/۰۰	۰/۸۵	۳۸	S3
ناپایدار	۳۴/۷۵	۰	-۲۵	۱/۰۰	۰/۸۵	۵۶	S4
کاملاً پایدار	۶۵/۲۴	۰	-۶	۰/۸۵	۰/۱۵	۶۶	S5
پایدار	۶۲/۰۰	۰	۰	۱/۰۰	۰/۱۵	۶۲	S6
ناپایدار	۲۸/۷۵	۰	-۲۵	۱/۰۰	۰/۸۵	۵۰	S7
ناپایدار	۵۰/۰۰	۰	-۲۵	۱/۰۰	۰/۴۰	۶۰	S8
کاملاً ناپایدار	۳۷/۰۰	۰	۰	۱/۰۰	۰/۴۰	۳۷	S9
کاملاً ناپایدار	۱۹/۵۰	۰	-۲۵	۱/۰۰	۰/۷۰	۳۷	S10
کاملاً ناپایدار	۳۲/۰۰	۰	-۵۰	۱/۰۰	۰/۴۰	۵۲	S11
تاحدی ناپایدار	۶۰/۰۰	۰	۰	۰/۷۰	۰/۴۰	۶۰	S12
تاحدی ناپایدار	۵۹/۸۰	۰	-۶	۱/۰۰	۰/۷۰	۶۴	S13
تاحدی ناپایدار	۵۷/۶۰	۰	-۶	۱/۰۰	۰/۴۰	۶۰	S14
ناپایدار	۳۵/۸۰	۰	-۶	۱/۰۰	۰/۷۰	۴۰	S15

با مقایسه میان رده‌های داده شده به هر شیب توسط دو روش RES و SMR مشاهده می‌شود که تطبیق نسبتاً خوبی میان نتایج دو روش وجود دارد، به طوری که برای ۱۰ شیب سنگی از ۱۵ شیب مورد مطالعه رده‌های پایداری یکسانی توسط دو روش اختصاص یافته است و در پنج شیب سنگی باقیمانده نیز اختلاف تنها در حد یک طبقه پایداری می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان این گونه نتیجه گرفت که رویکرد سیستمی در مورد منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، تخمین‌های نسبتاً نزدیکی را به یک روش معروف تجربی تحلیل پایداری شیب‌ها داشته است. از طرف دیگر، این نتیجه حاصل شد که رویکرد RES از نظر مطابقت با مشاهدات منطقه‌ای نسبت به روش SMR بهتر بوده است.

۴-۸- نتیجه‌گیری

در این فصل، از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به منظور تحلیل پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی استفاده گردید. برای این منظور، شیب‌های مهندسی شده کنار جاده‌ای در منطقه‌ای در شمال شرقی ایران (منطقه خوش‌بیلاق) در نظر گرفته شدند. با انتخاب ۱۶ پارامتر اصلی موثر بر سیستم، تمام مراحل رویکرد RES متداول به ترتیب دنبال شده و پس از تحلیل اهمیت پارامترها در سیستم، وضعیت پایداری با تعریف و محاسبه شاخص برای ایستگاه‌های مورد مطالعه به طور ساده بر روی نقشه منطقه نگاشته شد. نتایج نشان داد که برای این گونه شیب‌های سنگی با کدگذاری ESQ انجام شده، 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. در نهایت، نتایج به دست آمده از این رویکرد با نتایج روش SMR به عنوان یک روش تجربی طبقه‌بندی شیب سنگی مقایسه شده و بدین ترتیب بکار رفته (در حالت متداول آن) مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که تطبیق نسبتاً خوبی میان نتایج دو روش وجود دارد، به طوری

که برای ۱۰ شیب سنگی از ۱۵ شیب مورد مطالعه، رده‌های پایداری یکسانی توسط دو روش اختصاص یافت. بدین ترتیب می‌توان گفت که رویکرد سیستمی در مورد منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، تخمین‌های نسبتاً نزدیکی را به یک روش معروف تجربی تحلیل پایداری شیب‌ها داشته است. شایان ذکر است که هر چند مقایسه نتایج این دو روش نشان از تطبیق نسبتاً خوب میان آنها دارد، با این حال نیاز به بهبود رویکرد کماکان به دلیل ذهنی بودن کدگذاری‌ها احساس می‌شود که در فصل‌های آینده، تحقیق در جهت غلبه بر این مشکلات هدایت خواهد شد.

فصل پنجم

**کدگذاری نیمه عددی خبره احتمالاتی (PESQ):
یک بهبود در رویکرد RES**

۵-۱- مقدمه

در این فصل، با ارائه یک ایده جدید، بهبودی در رویکرد RES اعمال می‌گردد که طی آن فرآیند کدگذاری از حالت قطعی خارج شده و بدین ترتیب تمام مراحل رویکرد و در نتیجه کل سیستم به صورت احتمالاتی درمی‌آید. برای این منظور در ابتدا، بهبود در نظر گرفته شده به طور خلاصه تشریح شده و سپس نحوه اجرای آن با یک مثال ساده ارائه می‌گردد. در ارائه مطالب، تمرکز اصلی بر مقایسه احتمالاتی اهمیت پارامترها در سیستم (تحلیل احتمالاتی رفتار سیستم) و در نتیجه خروج رویکرد از حالت قطعی بوده و به تعریف یک شاخص بخصوص پرداخته نخواهد شد.

۵-۲- کدگذاری نیمه عددی خبره احتمالاتی (PESQ)^۱

۵-۲-۱- معرفی

همان طور که در فصل سوم و در معرفی رویکرد RES ذکر گردید، در این روش، انتخاب فاکتورهای موثر بر سیستم و کدگذاری اندرکنش‌های میان آنها در ماتریس مربوطه توسط یک کارشناس (یا خبره) و بر پایه تحقیقات میدانی، قضاوت‌های مهندسی، مستندات مربوطه و در صورت نیاز با تحلیل‌های نظری و عددی انجام می‌گیرد. علیرغم این تنوع روش‌ها برای ارزیابی اندرکنش‌ها توسط کارشناس، در روش معمول نیمه عددی خبره (ESQ)، تنها یک کد (مقدار عددی) یکتا برای

¹ Probabilistic Expert Semi-Quantitative

عددی سازی تأثیر یک پارامتر بر پارامتر دیگر در ماتریس اختصاص می‌یابد. با این حال، در بسیاری از موارد، عدم قطعیت‌هایی^۱ در خصوصیات پارامترها و روابط میان آنها وجود دارد که در نتیجه، با انتخاب یک کد دقیق و یکتا نمی‌توان اندرکنش مربوطه را به طور صحیح و کامل بیان نمود. از طرفی در صورت استفاده از نظرات چندین کارشناس برای کدگذاری ماتریس اندرکنش، در نهایت چاره‌ای جز میانگین‌گیری و در نظر گرفتن مقدار متوسط کدهای متفاوت داده شده توسط افراد مختلف وجود ندارد. این در حالی است که در بسیاری از موارد، اندرکنش موجود کاملاً شناخته شده نبوده و کارشناسان مختلف نظرات متفاوتی در مورد اثر متقابل دو پارامتر بر یکدیگر دارند.

به منظور مواجهه با این مشکلات، روش کدگذاری نیمه عددی خبره احتمالاتی (PESQ) ارائه می‌گردد که در آن احتمال‌های متفاوت به مقادیر مختلف کدهای اندرکنش‌های ماتریس اختصاص می‌یابند. به عبارت دیگر، برای هر اندرکنش، احتمال‌های دارا بودن مقادیر کدگذاری (در این مورد از ۰ تا ۴) تخصیص می‌یابد که می‌تواند توسط یک کارشناس و به طریقه ذهنی انجام گیرد و یا با تشکیل توزیع‌های احتمال کدهای داده شده به روش ESQ توسط کارشناسان مختلف و استخراج احتمال رخداد هر کد صورت پذیرد. این کدگذاری را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از ماتریس‌ها ارائه نمود (پنج ماتریس در صورتی که کدها از ۰ تا ۴ انتخاب شوند) که هر یک از ماتریس‌ها در درایه i -ام خود نشان‌دهنده احتمال کد مورد نظر برای تأثیر P_i بر P_j می‌باشد. واضح است که مجموع احتمالات یک درایه واحد برای تمام ماتریس‌ها برابر با ۱ خواهد بود.

با اعمال روش پیشنهادی جدید (PESQ) در کدگذاری ماتریس اندرکنش، سایر مراحل رویکرد RES نیز جنبه احتمالاتی به خود خواهند گرفت. به عنوان مثال، می‌توان توزیع‌های احتمال C و E و نیز نمودارها و هیستوگرام‌های احتمالاتی (C, E) را به دست آورد. در بخش بعد، کاربرد چنین رویکرد احتمالاتی به کمک یک مطالعه موردی بر روی عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی نشان داده خواهد شد.

¹ Uncertainties

۵-۲-۲- کاربرد

به منظور نشان دادن کاربرد روش PESQ در کدگذاری و تحلیل پارامترها در RES، یک سیستم کلی شیب سنگی به طور ساده انتخاب شده است که می‌تواند یک شیب معدن روباز و یا هر شیب مهندسی شده (حفاری شده) دیگر باشد. واضح است که کدگذاری‌ها ممکن است با توجه به شرایط، از منطقه‌ای به منطقه دیگر و برای پروژه‌های مختلف متفاوت باشد، ولی در اینجا هدف ارائه یک مثال ساده برای نشان دادن نحوه کاربرد روش جدید می‌باشد.

۱۰ پارامتر اصلی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم انتخاب شده‌اند که عبارتند از:

۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی؛ ۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها؛ ۳- ناپایداری پیشین؛ ۴- مقاومت سنگ بکر؛ ۵- هوازدگی؛ ۶- خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها؛ ۷- شرایط هیدرولیکی؛ ۸- ارتفاع شیب؛ ۹- زاویه شیب؛ ۱۰- ناپایداری بالقوه.

از آنجا که هدف، پیاده‌سازی اولیه روش جدید پیشنهادی و مشاهده و تحلیل خروجی‌های سیستم بوده است، تعداد پارامترها با اعمال ساده‌سازی‌هایی تا حدودی کم در نظر گرفته شده و برخی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در این لیست قرار داده نشده‌اند.

پیاده‌سازی روش جدید کدگذاری در RES از طریق تشکیل ۵ ماتریس اندرکنش (برای هر یک از مقادیر ۰ تا ۴ یک ماتریس) ممکن می‌گردد. این ماتریس‌ها با نام‌های M_0 تا M_4 شناخته می‌شوند. ۱۰ پارامتر یاد شده به صورت ۹ پارامتر اصلی به همراه "ناپایداری بالقوه" شیب‌ها (موضوع مورد بحث در سیستم) در امتداد قطر اصلی این ماتریس‌ها قرار می‌گیرند. همان طور که در بخش قبل اشاره شد، در روش PESQ احتمال‌ها برای تمام مقادیر کدها در نظر گرفته و اختصاص می‌یابند. بنابراین به جای تعیین یک مقدار کد یکتا (و قطعی) برای هر اندرکنش، احتمال امکان در نظر گرفتن مقادیر مختلف کدها (در این مورد از ۰ تا ۴) به اندرکنش‌ها اختصاص می‌یابد. این احتمالات در ۵ ماتریس نشان داده می‌شوند (M_0 تا M_4) که در آنها درایه‌های غیر اصلی دربرگیرنده احتمال رخداد یک کد بخصوص

برای یک اندرکنش خاص است (جداول ۵-۱ تا ۵-۵).

به عنوان مثالی از فرآیند کدگذاری، نحوه تخصیص پنج مقدار کد به اثر پارامتر هوازدگی (P_5) بر خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها (P_6) (درایه ۶، ۵) در ماتریس‌های M_0 تا M_4 توضیح داده می‌شود. اندرکنش موجود، نسبتاً قوی در نظر گرفته شده و بنابراین احتمال‌های اختصاص یافته عبارتند از: ۵٪ برای احتمال رخداد کد ۰ (بدون اندرکنش)، ۱۰٪ برای رخداد کد ۱ (اندرکنش ضعیف)، ۵۰٪ برای رخداد کد ۲ (اندرکنش متوسط)، ۲۵٪ برای احتمال روی دادن کد ۳ (اندرکنش قوی) و در نهایت ۱۰٪ برای احتمال رخداد کد ۴ (اندرکنش بحرانی) مسلماً هنوز PESQ نیز تا حد بسیاری جنبه ذهنی داشته و از حالت برون‌ذات خارج است، ولی دارای این مزیت نسبی است که به ما این اجازه را می‌دهد تا بهترین تخمین‌های احتمالی از ارتباط پارامترها را وارد تحلیل‌ها نماییم.

جدول ۵-۱- ماتریس اندرکنش M_0 برای احتمال کد ۰ در مسئله پایداری شیب سنگی

P_1	5	5	5	5	5	5	10	5	5
5	P_2	5	90	20	0	0	5	5	5
100	100	P_3	95	20	5	15	0	5	5
100	100	5	P_4	0	0	90	0	0	5
100	100	5	0	P_5	5	100	95	95	5
100	100	0	100	100	P_6	95	90	5	0
100	100	5	95	0	0	P_7	55	80	5
100	100	5	100	100	100	5	P_8	0	5
100	100	0	100	100	100	95	90	P_9	0
100	100	100	100	100	100	100	100	100	P_{10}

P_1 : زمین‌شناسی و لیتولوژی؛ P_2 : گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها؛ P_3 : ناپایداری پیشین؛ P_4 : مقاومت سنگ بکر؛

P_5 : هوازدگی؛ P_6 : خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها؛ P_7 : شرایط هیدرولیکی؛ P_8 : ارتفاع شیب؛ P_9 : زاویه شیب؛

P_{10} : ناپایداری بالقوه

جدول ۵-۲- ماتریس اندرکنش M_1 برای احتمال کد ۱ در مسئله پایداری شیب سنگی

P_1	25	15	5	15	20	15	15	10	5
15	P_2	5	10	55	10	10	25	20	5
0	0	P_3	5	55	25	45	5	10	15
0	0	10	P_4	5	20	10	15	15	10
0	0	5	10	P_5	10	0	5	5	5
0	0	20	0	0	P_6	5	10	20	0
0	0	5	5	5	5	P_7	30	15	5
0	0	5	0	0	0	15	P_8	15	5
0	0	0	0	0	0	5	10	P_9	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	P_{10}

P_1 : زمین شناسی و لیتولوژی؛ P_2 : گسل ها و چین خوردگی ها؛ P_3 : ناپایداری پیشین؛ P_4 : مقاومت سنگ بکر؛
 P_5 : هوازدگی؛ P_6 : خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی ها؛ P_7 : شرایط هیدرولیکی؛ P_8 : ارتفاع شیب؛ P_9 : زاویه شیب؛
 P_{10} : ناپایداری بالقوه

جدول ۵-۳- ماتریس اندرکنش M_2 برای احتمال کد ۲ در مسئله پایداری شیب سنگی

P_1	40	15	15	20	40	40	45	25	15
60	P_2	15	0	15	10	15	40	45	15
0	0	P_3	0	20	40	25	20	25	55
0	0	50	P_4	15	50	0	55	50	40
0	0	15	60	P_5	50	0	0	0	15
0	0	50	0	0	P_6	0	0	65	0
0	0	15	0	15	10	P_7	15	5	15
0	0	15	0	0	0	65	P_8	50	15
0	0	0	0	0	0	0	0	P_9	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	P_{10}

P_1 : زمین شناسی و لیتولوژی؛ P_2 : گسل ها و چین خوردگی ها؛ P_3 : ناپایداری پیشین؛ P_4 : مقاومت سنگ بکر؛
 P_5 : هوازدگی؛ P_6 : خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی ها؛ P_7 : شرایط هیدرولیکی؛ P_8 : ارتفاع شیب؛ P_9 : زاویه شیب؛
 P_{10} : ناپایداری بالقوه

جدول ۵-۴- ماتریس اندرکنش M_3 برای احتمال کد ۳ در مسئله پایداری شیب سنگی

P_1	25	45	50	40	30	25	20	40	55
15	P_2	55	0	10	55	55	20	20	55
0	0	P_3	0	5	25	10	50	45	20
0	0	30	P_4	55	25	0	20	25	30
0	0	55	20	P_5	25	0	0	0	55
0	0	25	0	0	P_6	0	0	10	10
0	0	55	0	60	70	P_7	0	0	55
0	0	55	0	0	0	10	P_8	25	55
0	0	10	0	0	0	0	0	P_9	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	P_{10}

P_1 : زمین شناسی و لیتولوژی؛ P_2 : گسل ها و چین خوردگی ها؛ P_3 : ناپایداری پیشین؛ P_4 : مقاومت سنگ بکر؛
 P_5 : هوازدگی؛ P_6 : خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی ها؛ P_7 : شرایط هیدرولیکی؛ P_8 : ارتفاع شیب؛ P_9 : زاویه شیب؛
 P_{10} : ناپایداری بالقوه

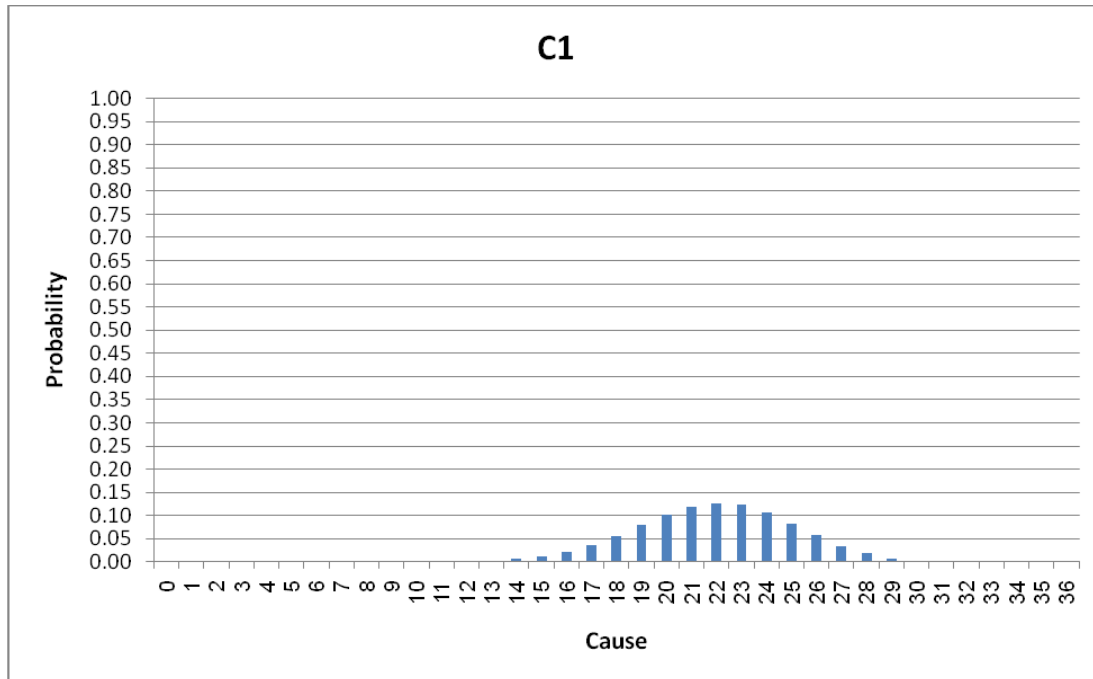
جدول ۵-۵- ماتریس اندرکنش M_4 برای احتمال کد ۴ در مسئله پایداری شیب سنگی

P_1	5	20	25	20	10	15	10	20	20
5	P_2	20	0	0	25	20	10	10	20
0	0	P_3	0	0	5	5	25	15	5
0	0	15	P_4	25	5	0	10	10	15
0	0	20	10	P_5	10	0	0	0	20
0	0	5	0	0	P_6	0	0	0	90
0	0	20	0	20	15	P_7	0	0	20
0	0	20	0	0	0	5	P_8	10	20
0	0	90	0	0	0	0	0	P_9	90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	P_{10}

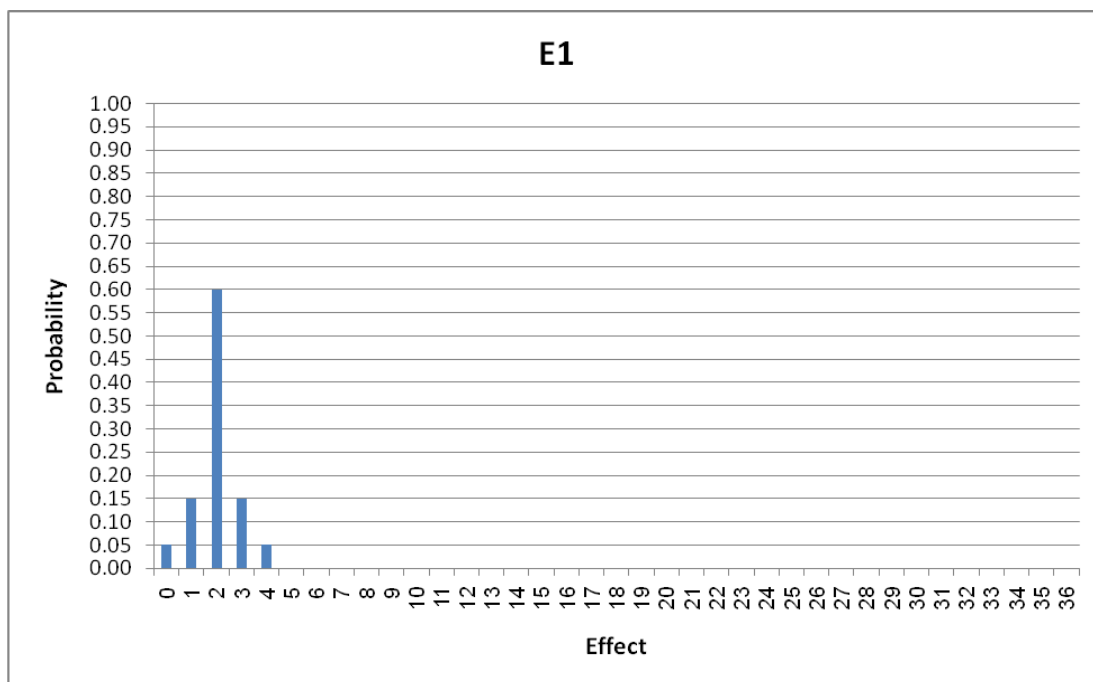
P_1 : زمین شناسی و لیتولوژی؛ P_2 : گسل ها و چین خوردگی ها؛ P_3 : ناپایداری پیشین؛ P_4 : مقاومت سنگ بکر؛
 P_5 : هوازدگی؛ P_6 : خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی ها؛ P_7 : شرایط هیدرولیکی؛ P_8 : ارتفاع شیب؛ P_9 : زاویه شیب؛
 P_{10} : ناپایداری بالقوه

همانطور که قبلاً در فصل سوم ذکر شد، در ماتریس کد شده (به روش قطعی) با روش ESQ مرسوم اثر هر پارامتر بر روی سیستم و نیز اثر سیستم بر روی هر پارامتر به ترتیب با مجموع کدهای سطر و ستون هر پارامتر در ماتریس اندرکنش محاسبه می شود. با این حال، در روش کدگذاری PESQ احتمال های هر کد در درایه های غیراصلی ماتریس وجود دارد و این بدین معنی است که در این روش

به جای مقادیر قطعی و یکتای C_i و E_i ، توزیع‌های احتمال C_i و E_i پارامترها قابل محاسبه است. همچنین با استفاده از این توزیع‌ها و بکارگیری قوانین ساده و پایه‌ای احتمالات می‌توان مقادیر محتمل (امید ریاضی) C_i و E_i را برای پارامتر P_i محاسبه نمود. شکل‌های ۱-۵ تا ۱۰-۵ در ادامه توزیع‌های احتمال را برای علت و اثر پارامترهای P_1 تا P_{10} نشان می‌دهند. شایان ذکر است به دلیل این که در هر سطر و ستون ۹ درایه غیر اصلی با مقادیر اندرکنش ۰ تا ۴ وجود دارند، مقادیر توزیع‌های C و E مابین ۰ و ۳۶ خواهد بود. برای مثال، همان طور که در نمودارهای شکل ۴-۵ دیده می‌شود، برای پارامتر P_4 ، مقدار C_4 با احتمال بیش از ۵۰٪ مابین ۱۴ و ۱۷ خواهد بود، و همین طور مقدار E_4 با احتمال بیش از ۵۰٪ مابین اعداد ۶ و ۷ خواهد بود (چنین تحلیلی برای تمام پارامترها قابل بیان است).

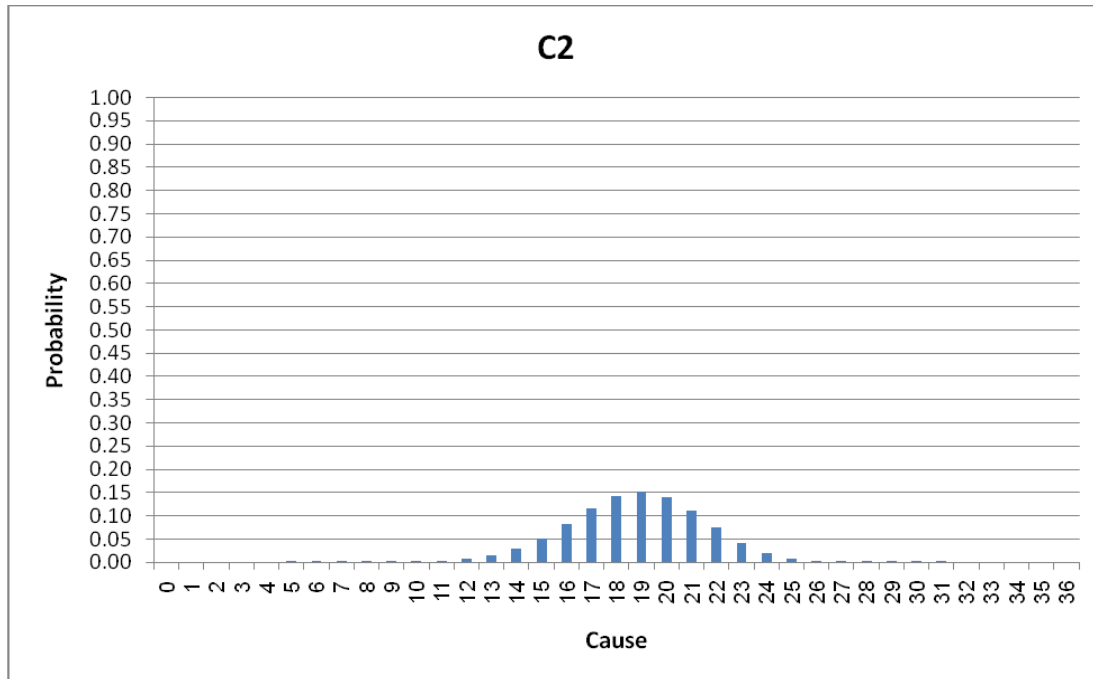


(الف)

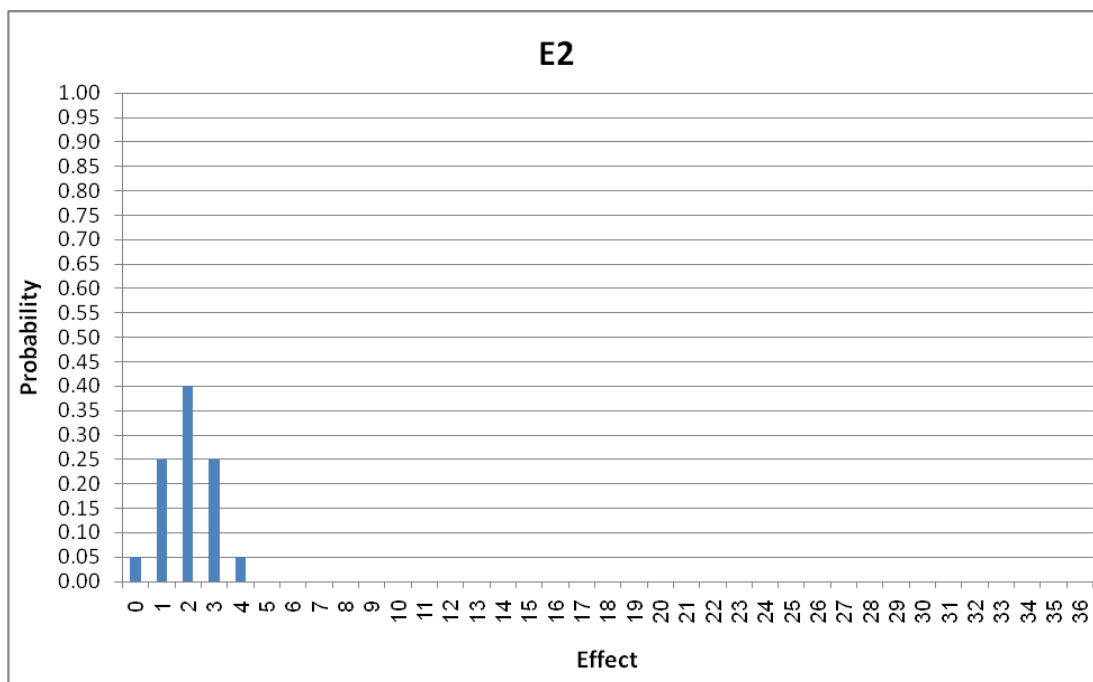


(ب)

شکل ۵-۱- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "زمین‌شناسی و لیتولوژی" (P_1):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

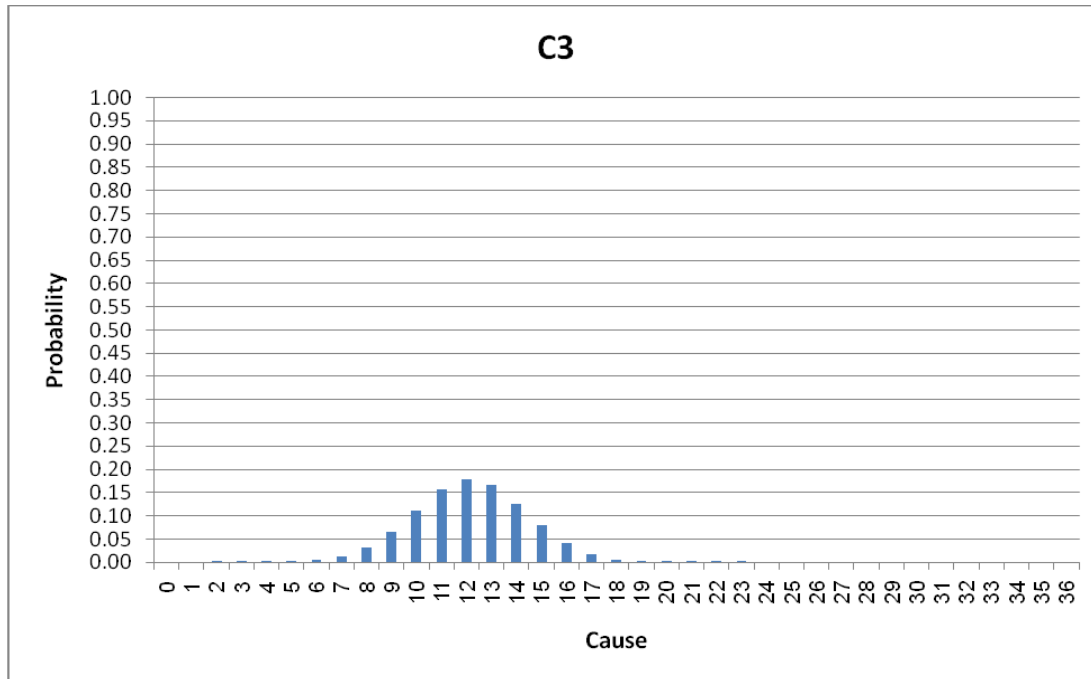


(الف)

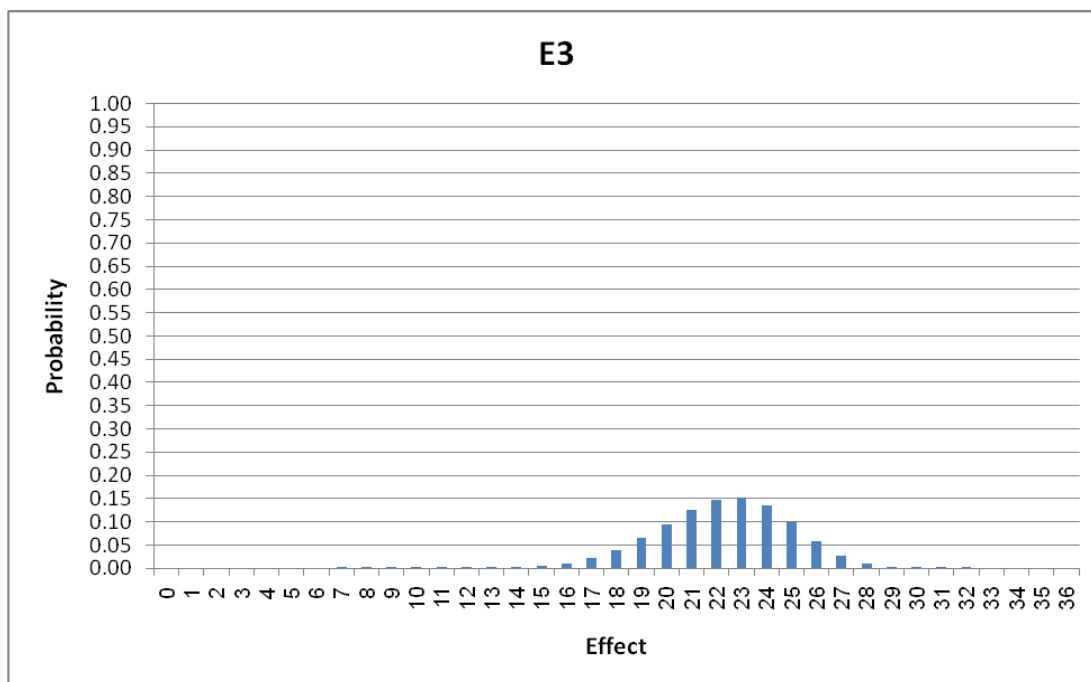


(ب)

شکل ۵-۲- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "گسل‌ها و چین خوردگی‌ها" (P_2):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

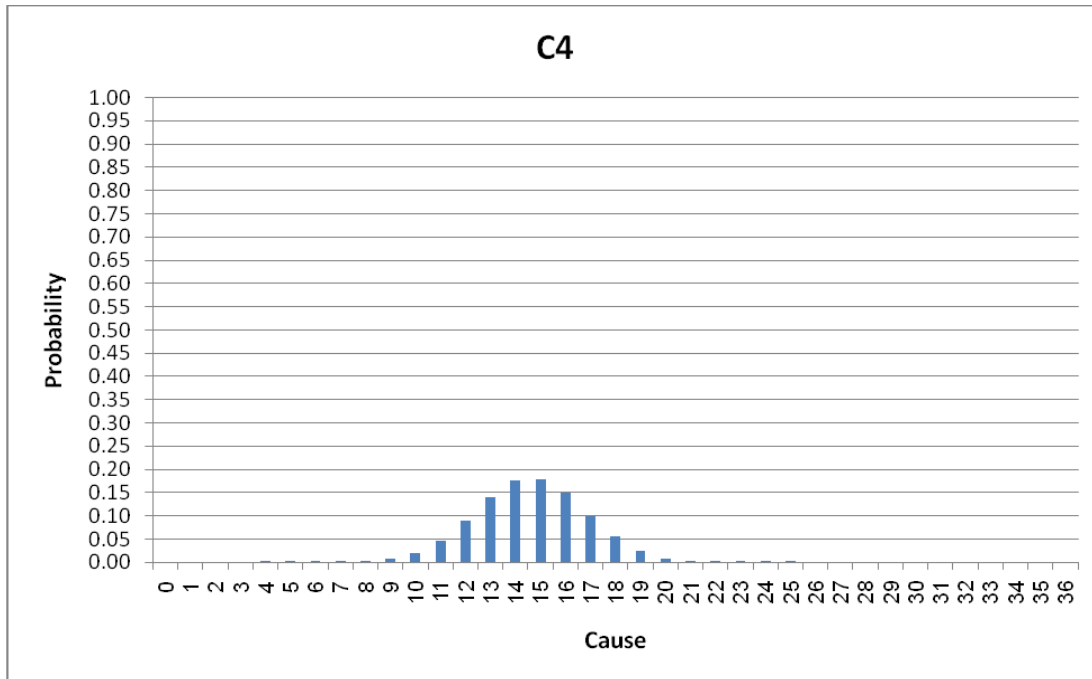


(الف)

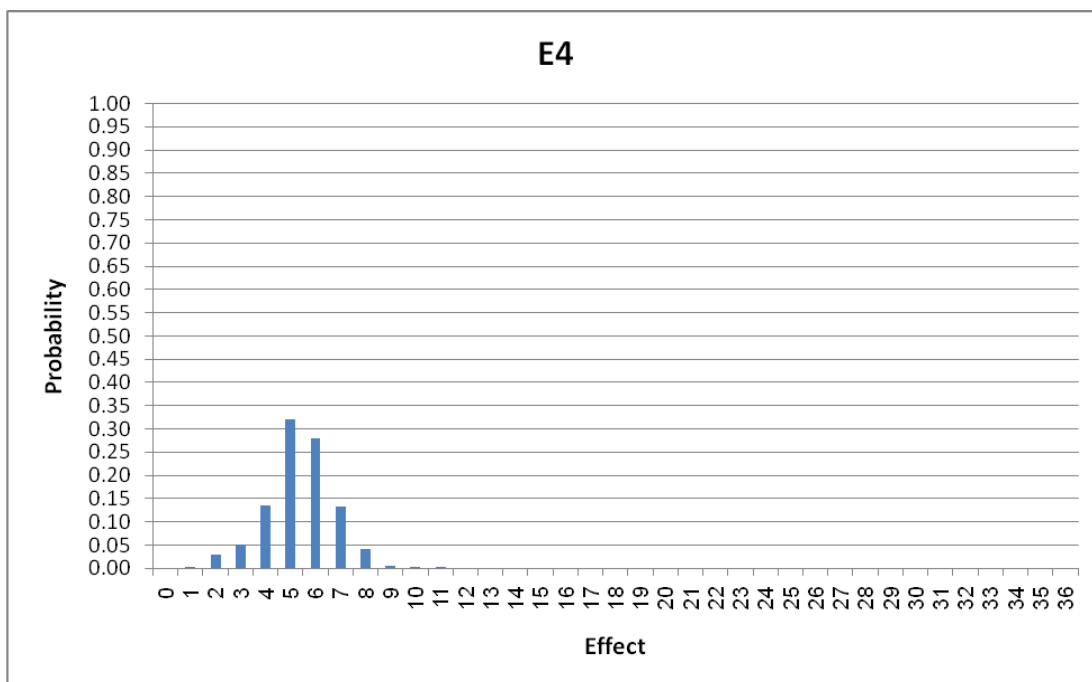


(ب)

شکل ۵-۳- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ناپایداری پیشین" (P_3):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)



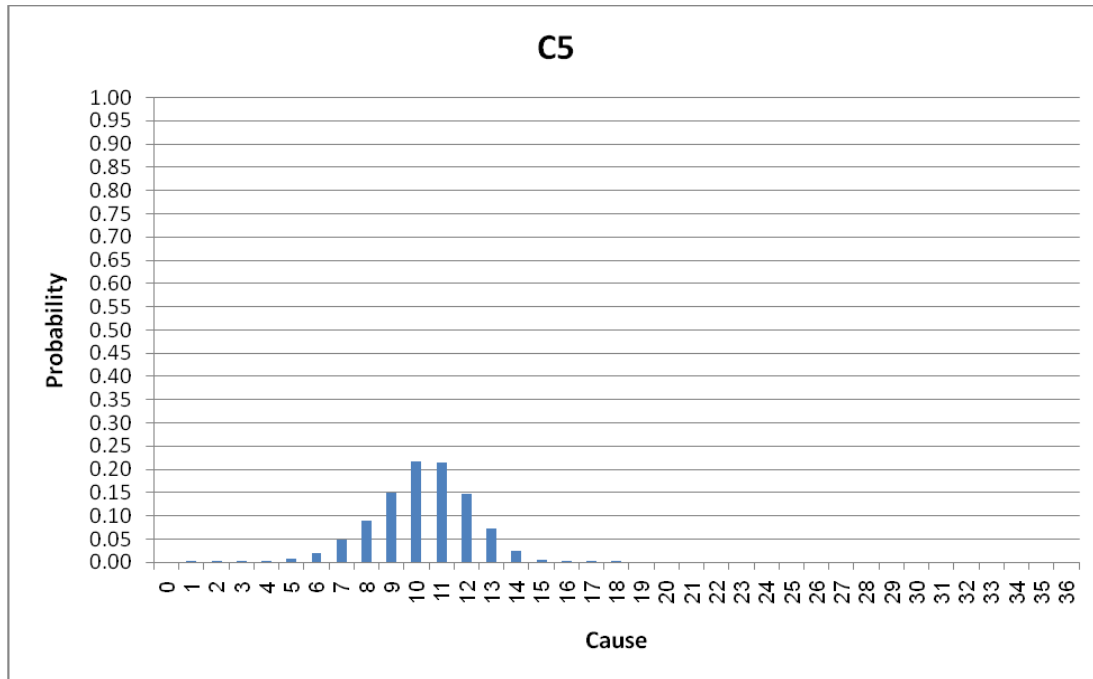
(الف)



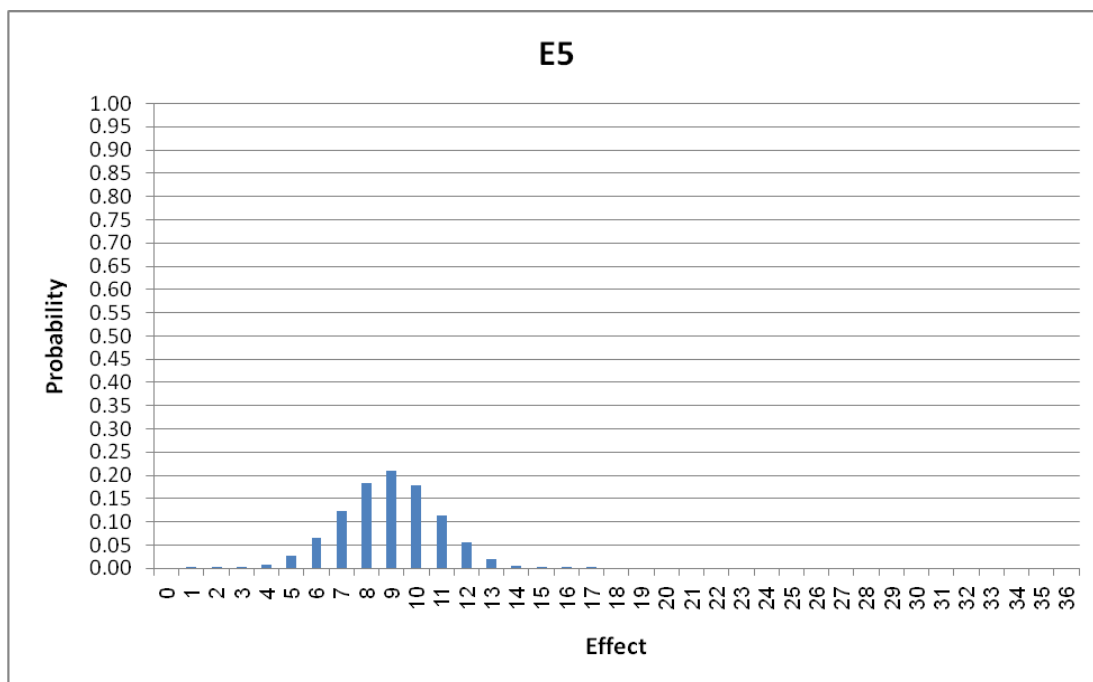
(ب)

شکل ۵-۴- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "مقاومت سنگ بکر" (P_4);

الف: علت (C)، ب: اثر (E)



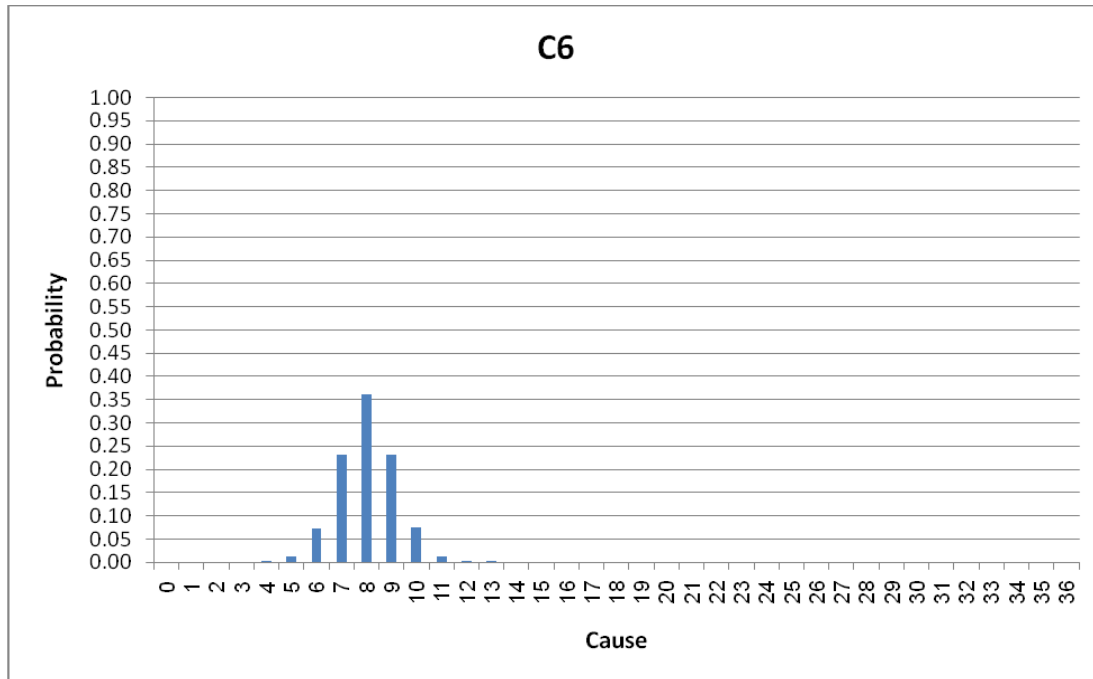
(الف)



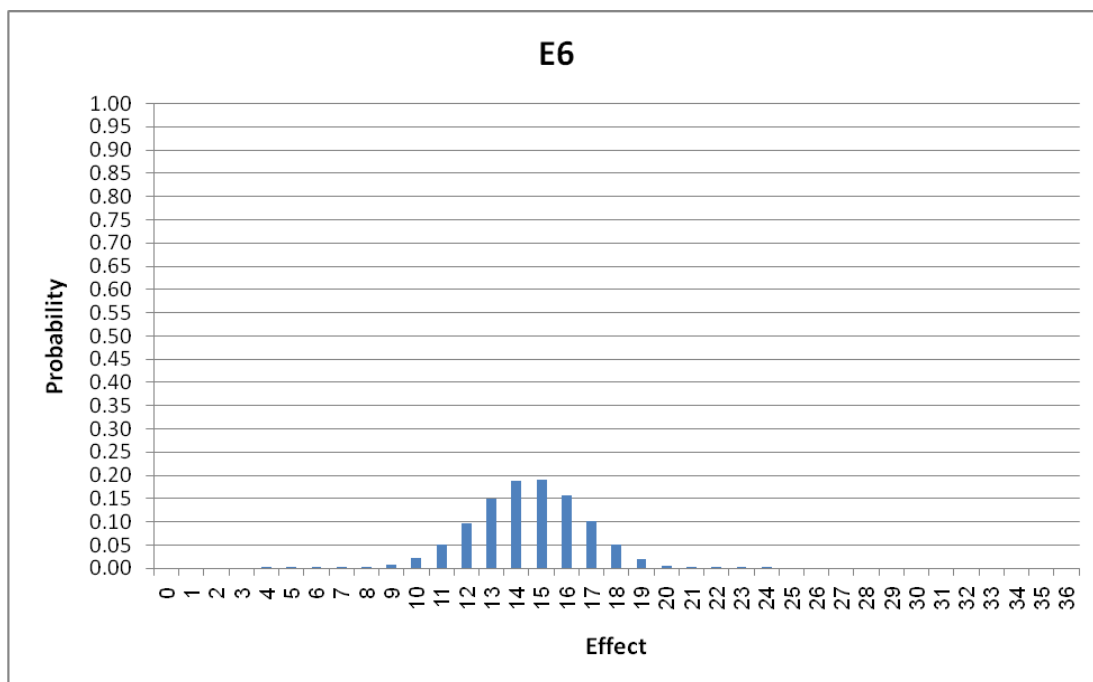
(ب)

شکل ۵-۵- توزیع های احتمال علت و اثر برای پارامتر "هوازدگی" (P_5);

الف: علت (C)، ب: اثر (E)

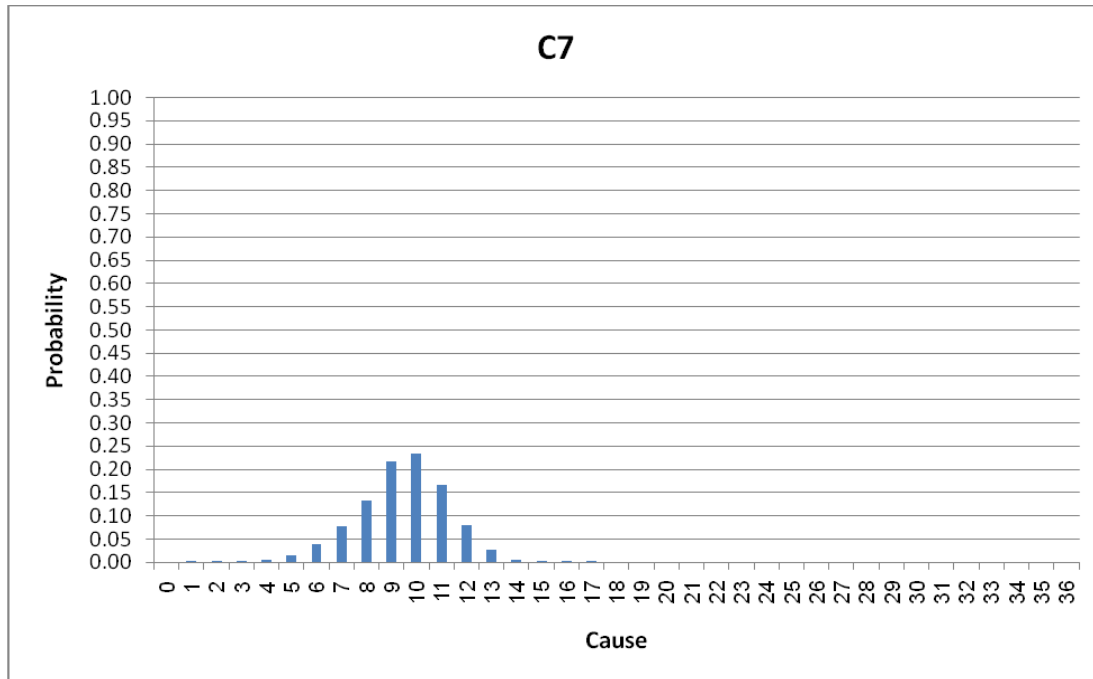


(الف)

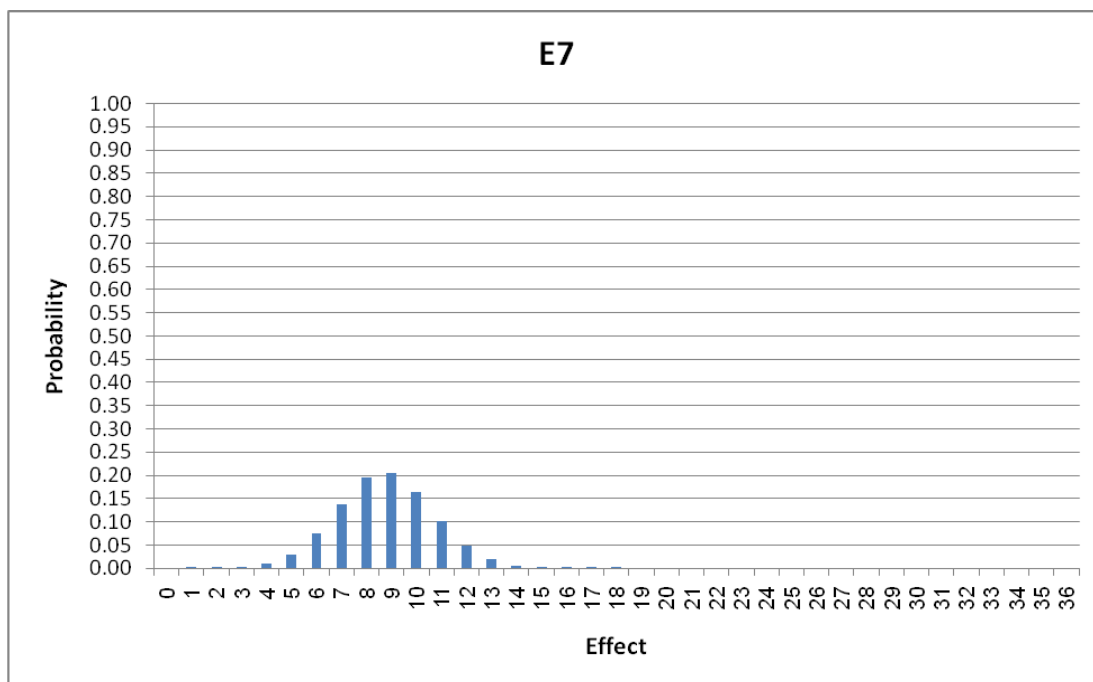


(ب)

شکل ۵-۶- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها" (P_6):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

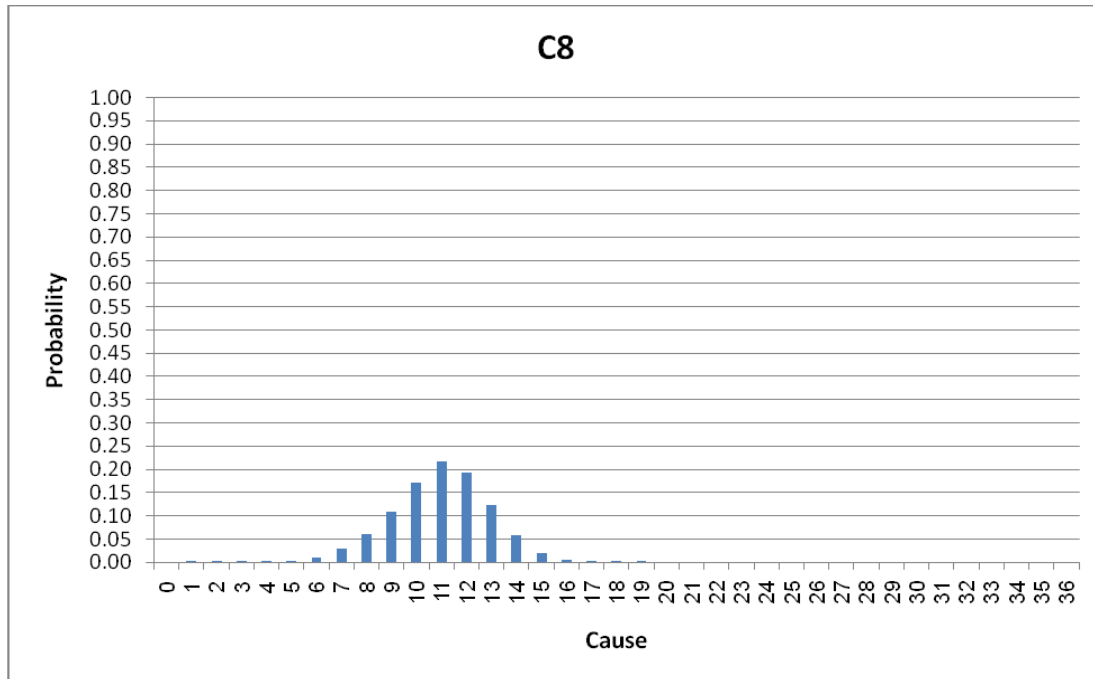


(الف)

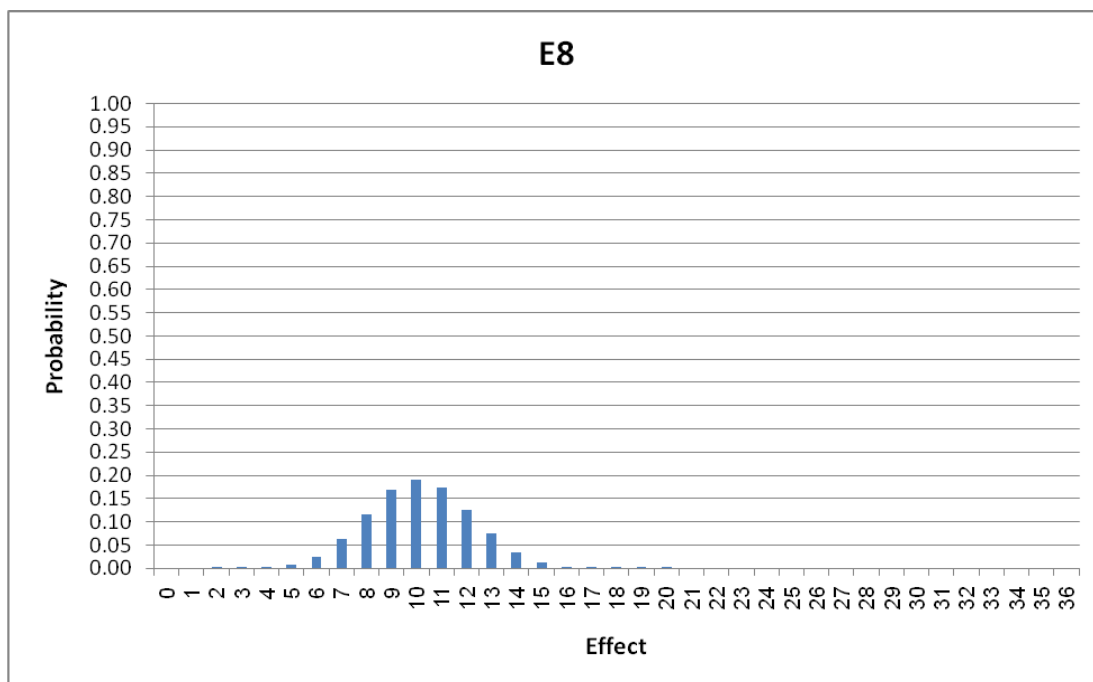


(ب)

شکل ۵-۷- توزیع های احتمال علت و اثر برای پارامتر "شرایط هیدرولیکی" (P_7):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

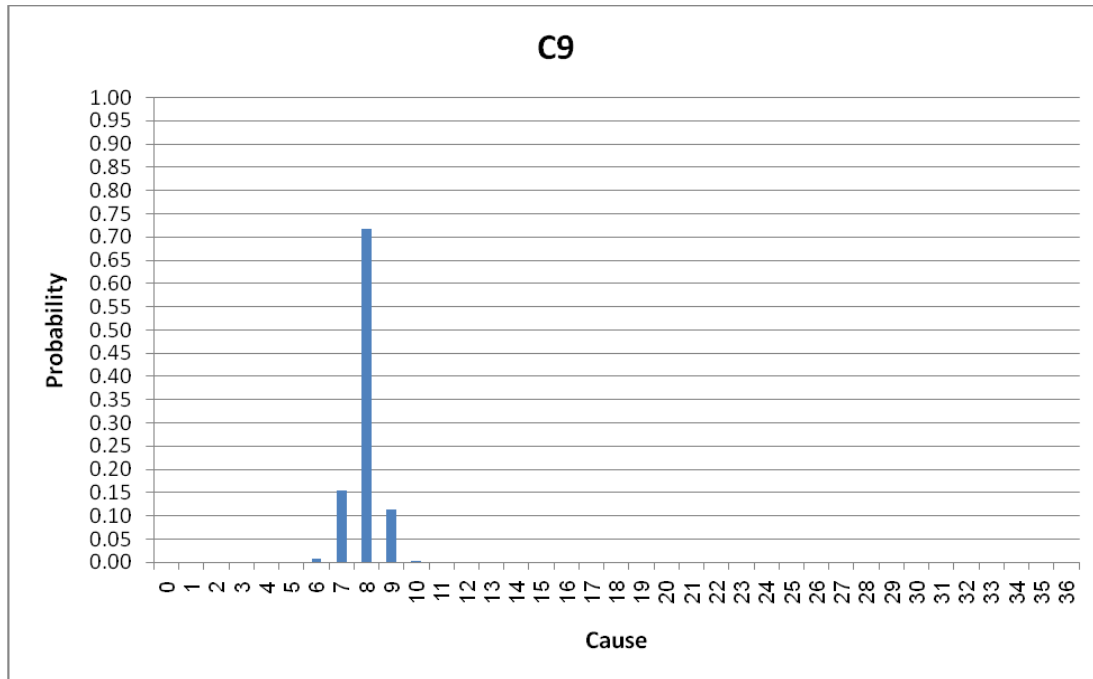


(الف)

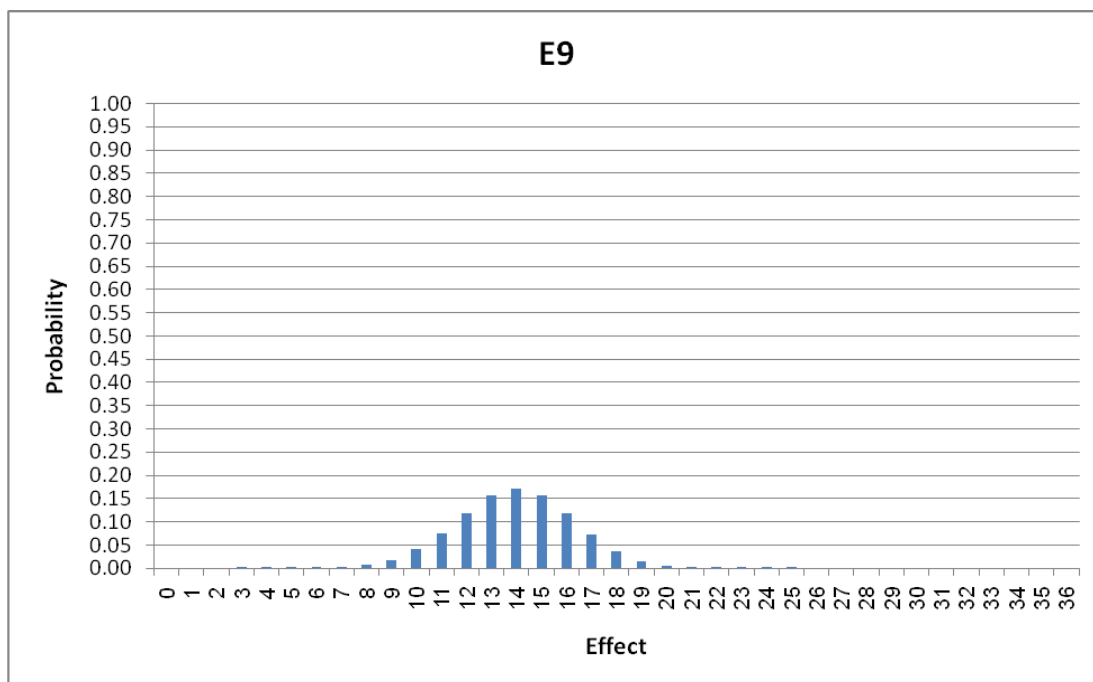


(ب)

شکل ۵-۸- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ارتفاع شیب" (P_8);
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

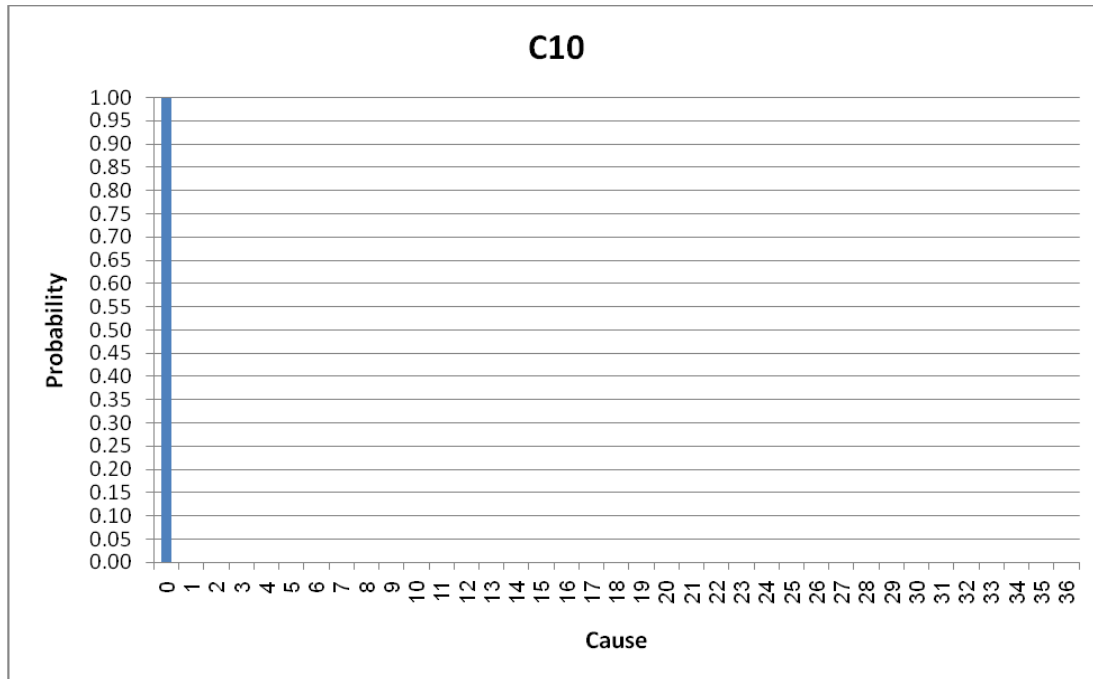


(الف)

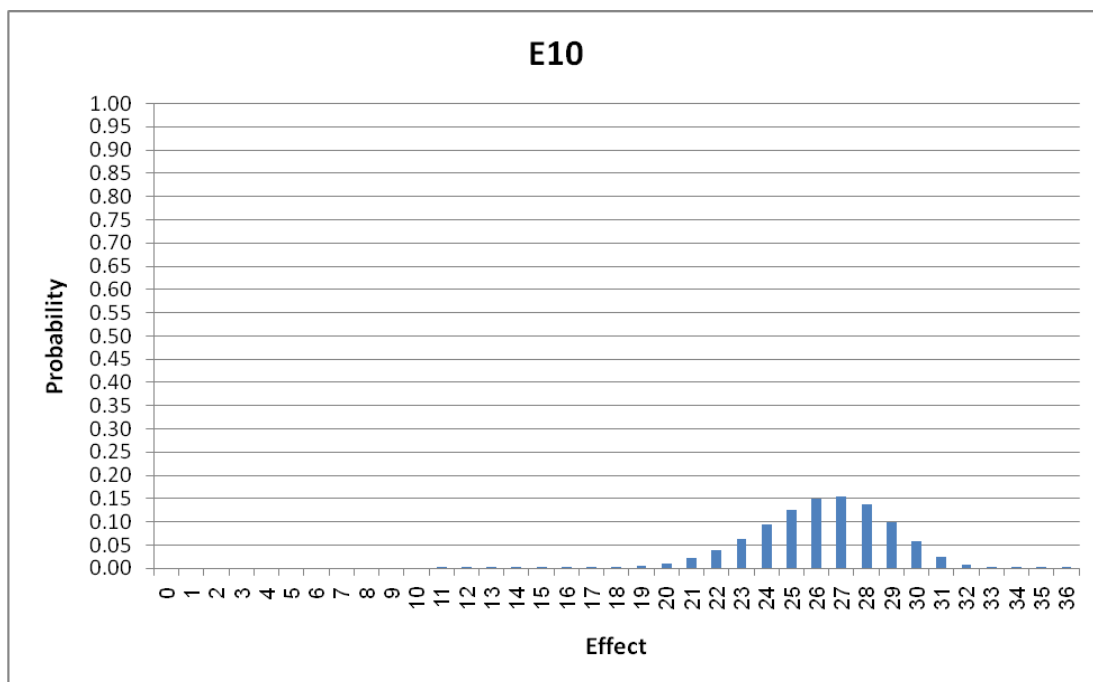


(ب)

شکل ۵-۹- توزیع‌های احتمال علت و اثر برای پارامتر "زاویه شیب" (P_9):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)



(الف)

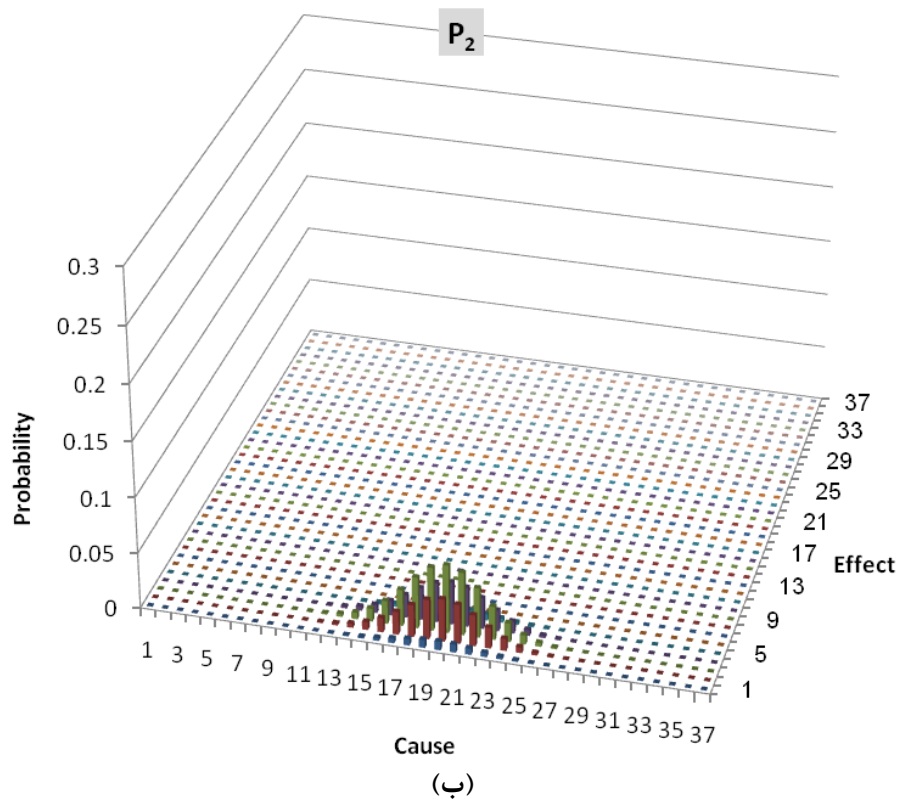
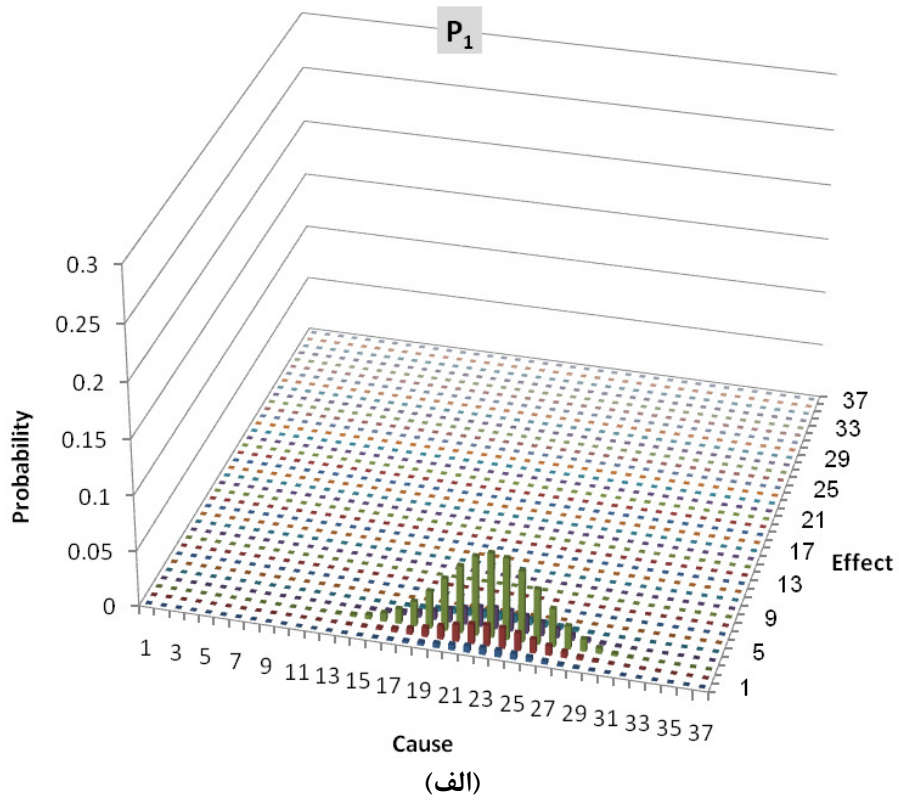


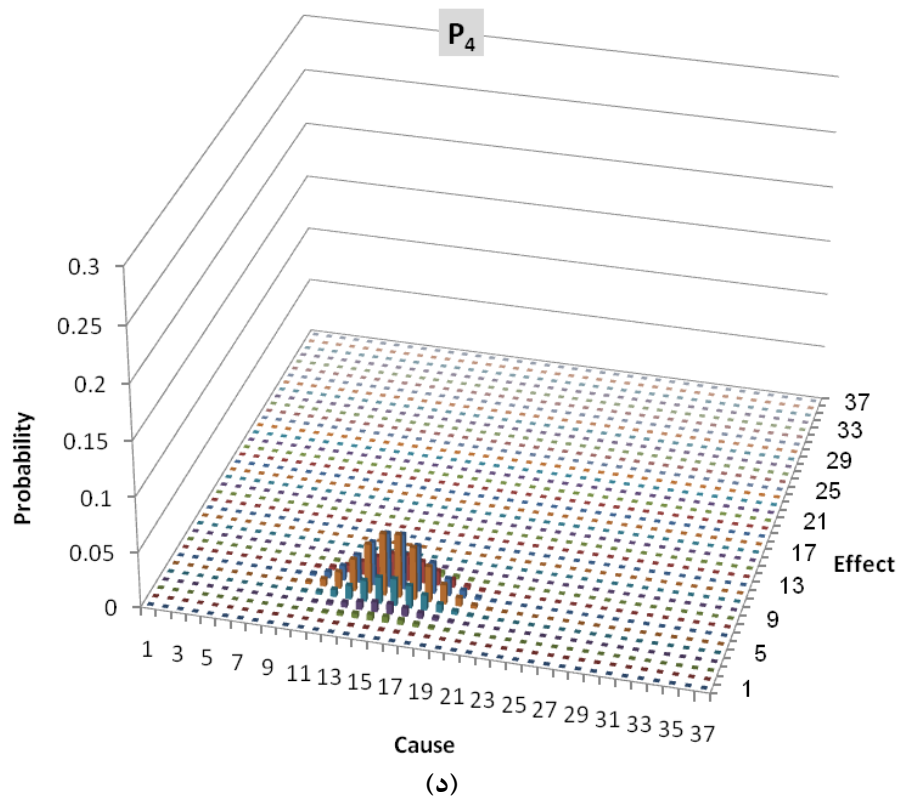
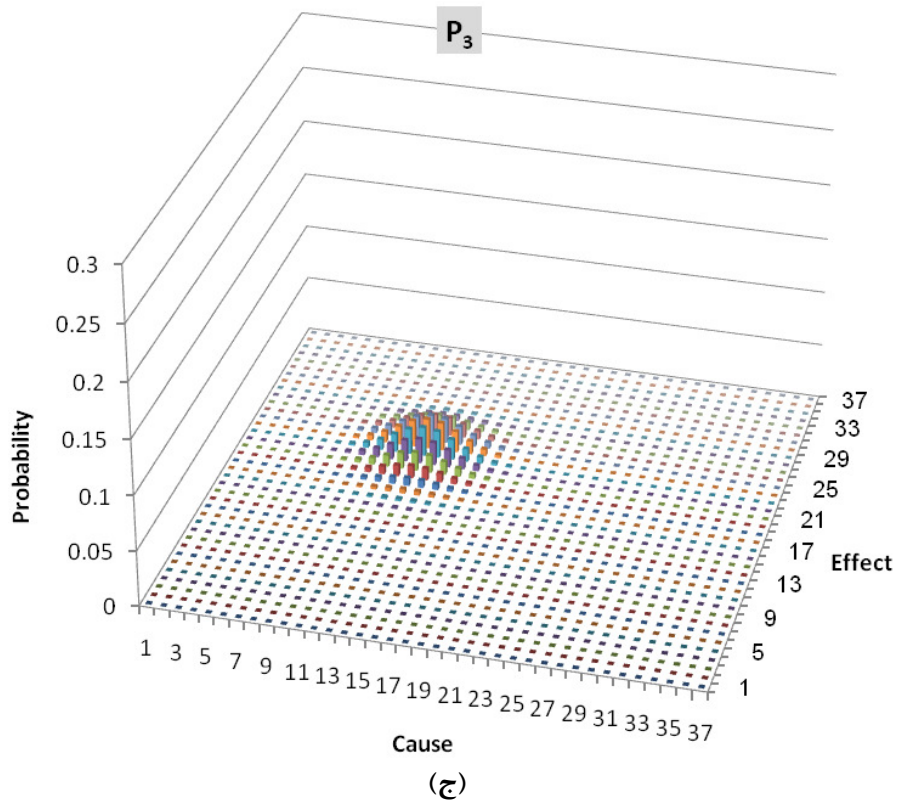
(ب)

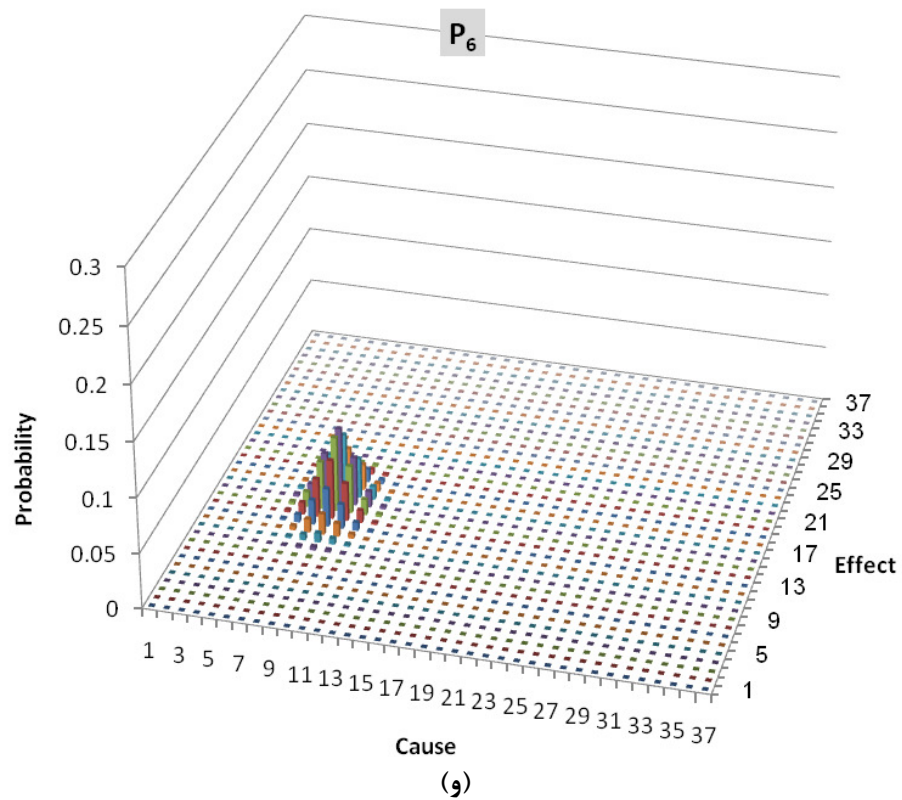
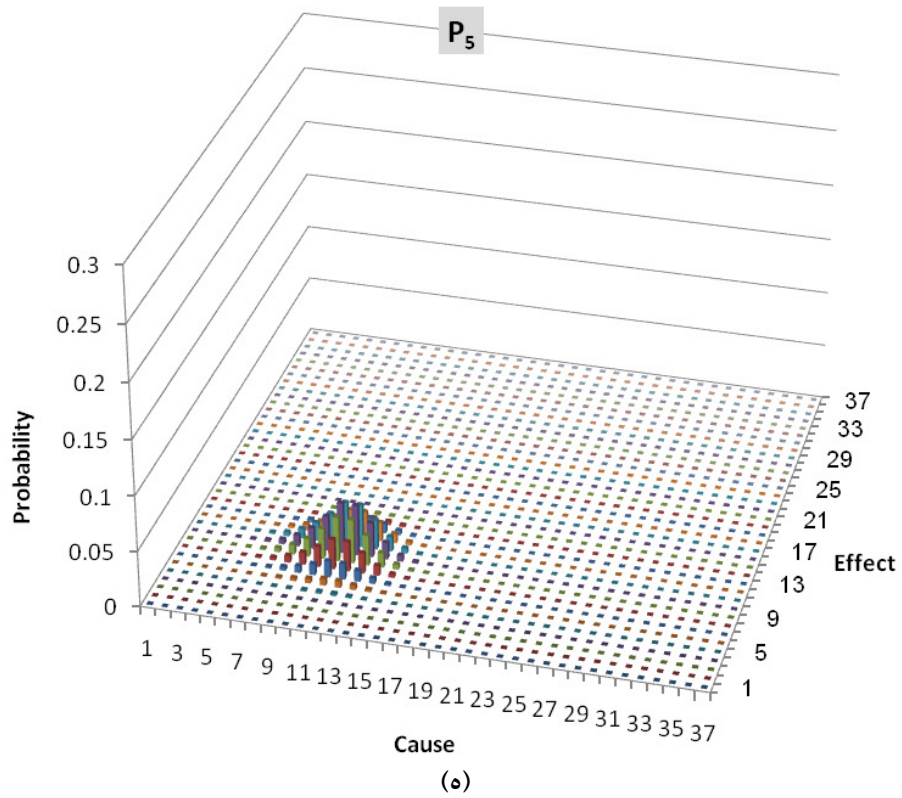
شکل ۵-۱۰- توزیع های احتمال علت و اثر برای پارامتر "ناپایداری بالقوه" (P_{10}):
الف: علت (C)، ب: اثر (E)

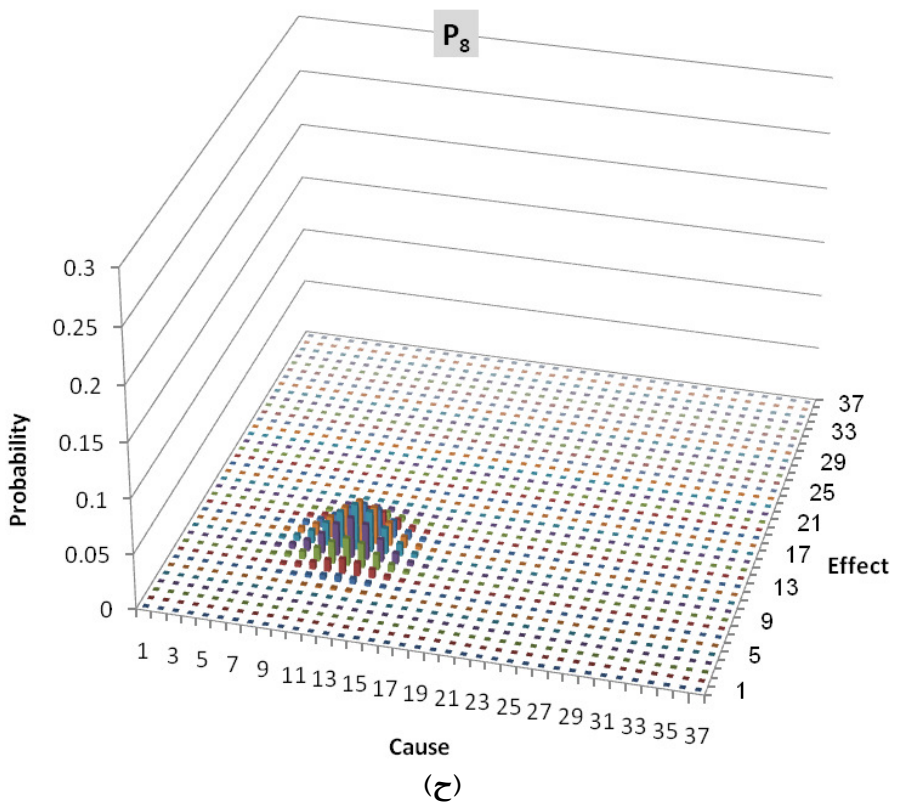
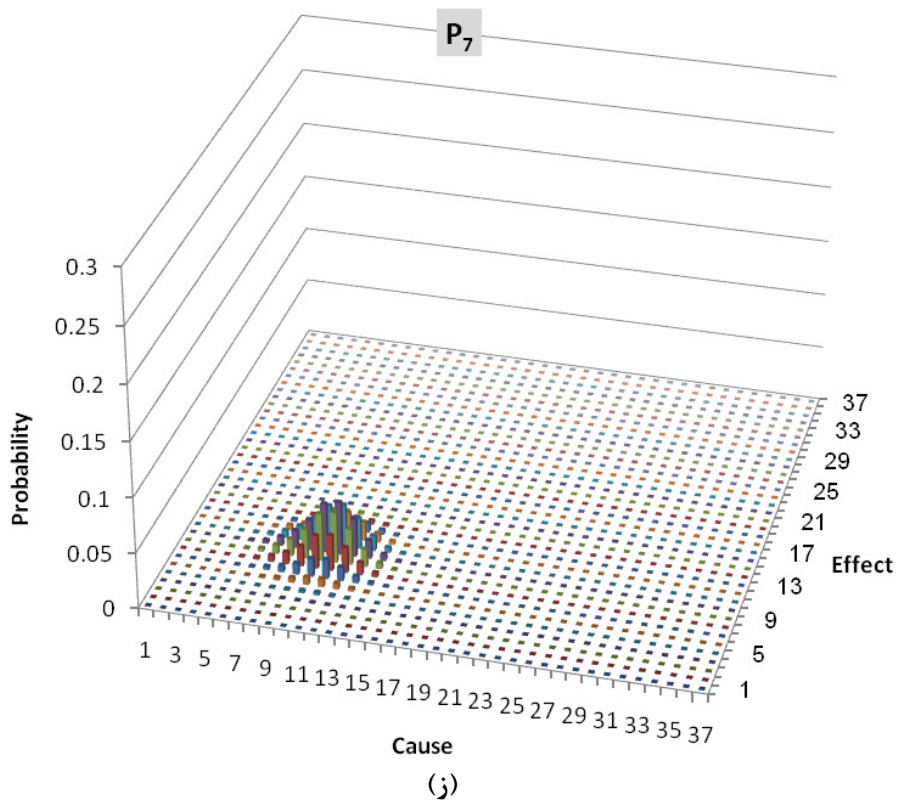
علاوه بر این، با تلفیق توزیع‌های احتمال C_i و E_i برای هر پارامتر P_i می‌توان نمودارهای احتمالاتی (C, E) را نیز تولید کرد. شکل ۵-۱۱ این نمودارها را برای تمام پارامترهای در نظر گرفته شده در سیستم شیب‌های سنگی نشان می‌دهد. نمودارهای (C, E) احتمالی ارائه شده در شکل ۵-۱۱ را می‌توان به همان نحوه مرسوم نمودارهای (C, E) قطعی (شکل ۳-۱۳) تحلیل نمود. همان طور که در فصل سوم ذکر شد، در نمودارهای قطعی، شدت اندرکنش و تسلط هر پارامتر در سیستم با توجه به موقعیت آن در فضای (C, E) قابل تحلیل است. با توسعه این ایده و به طور مشابه، می‌توان *احتمال‌های شدت اندرکنش و تسلط را با استفاده از نمودارهای (C, E) احتمالی (شکل ۵-۱۱)* محاسبه نمود. در حقیقت، در این مورد به جای به دست آوردن تلفیق‌های C و E یکتای هر پارامتر، چندین تلفیق محتمل از C و E به دست می‌آید که هر یک از آنها از یک احتمال رخداد برخوردار می‌باشند.

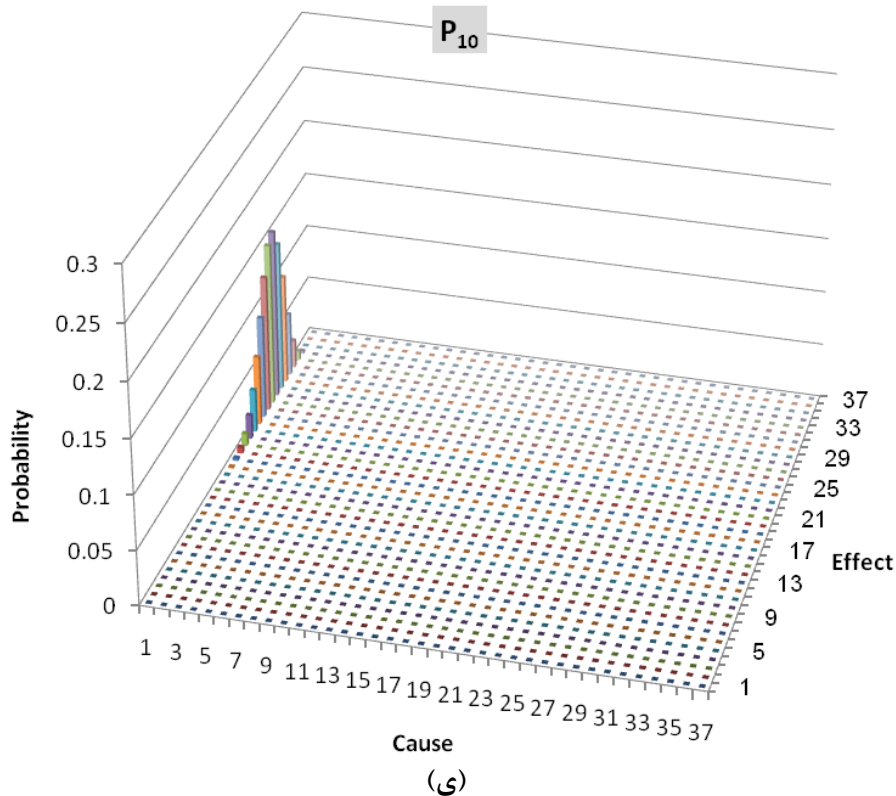
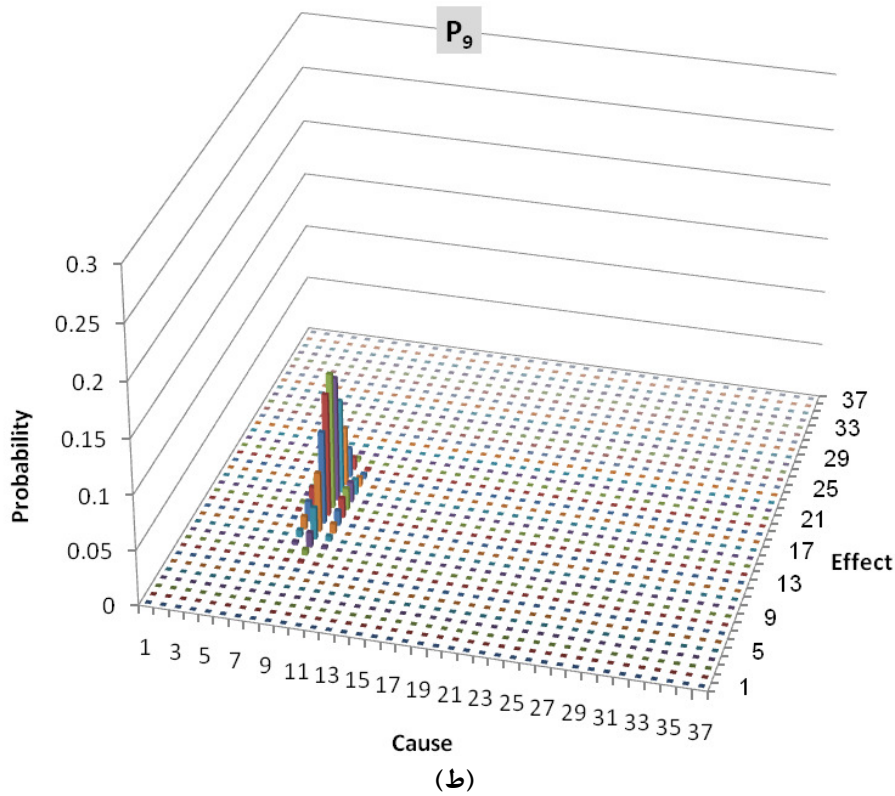
با این توصیف، در شکل ۵-۱۱ می‌توان دید که برای برخی پارامترها، مقدار احتمال در نمودار احتمالاتی (C, E) تمایل به قرارگیری در موقعیت‌های مکانی دورتر از خط قطری (با معادله $C=E$) دارند و بنابراین نشان می‌دهد که از تسلط بالایی بر سیستم برخوردار هستند (زمانی که احتمال قرارگیری در ناحیه پایین سمت راست نمودار بیشتر است، مانند نمودارهای P_1, P_2 و P_4)؛ و برای برخی دیگر، سیستم بر آنها مسلط‌تر است (زمانی که احتمال قرارگیری در ناحیه بالا سمت چپ نمودار بیشتر است، مانند نمودارهای P_3, P_6 و P_9).





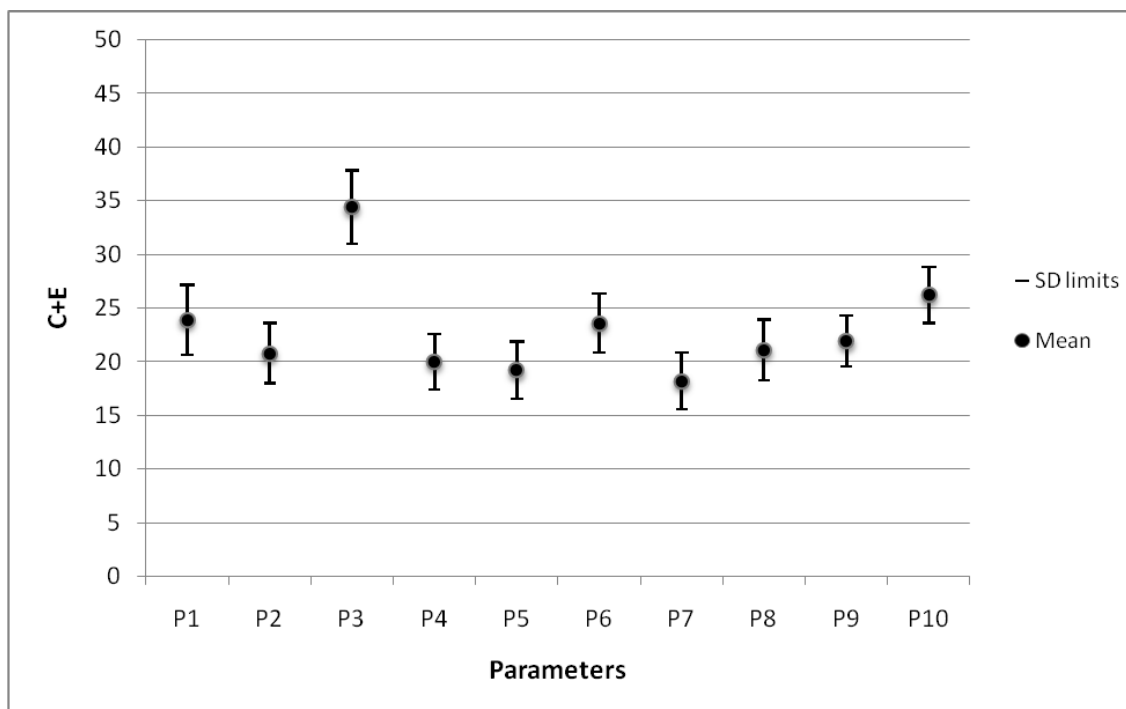




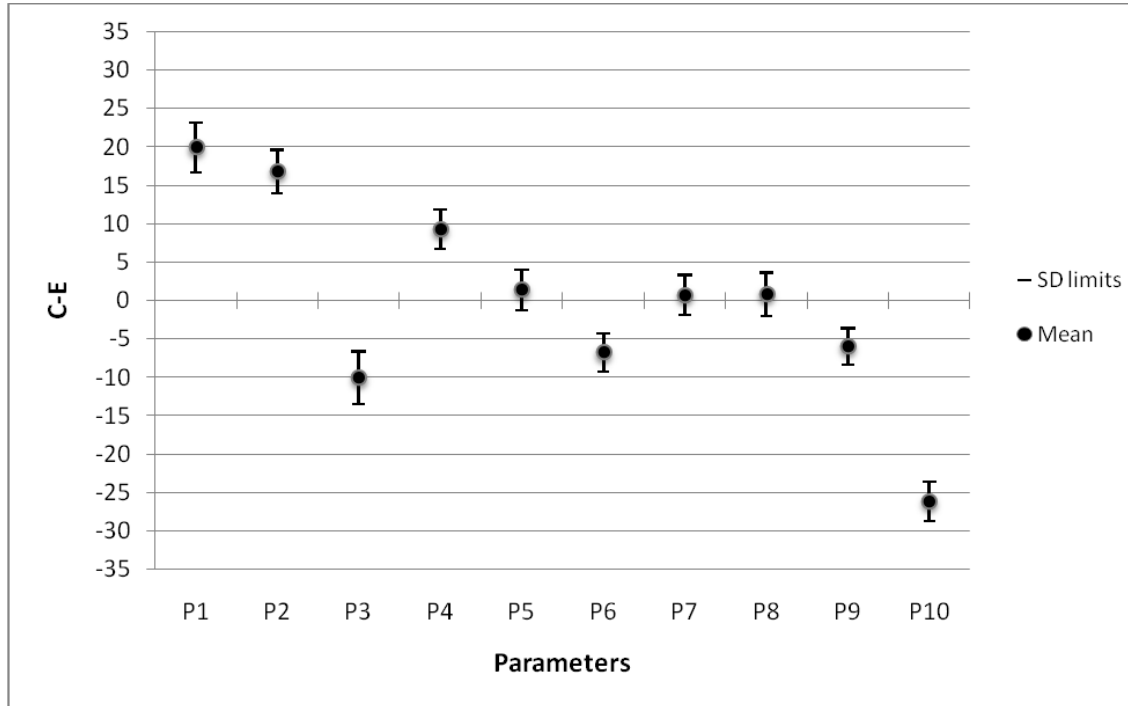


شکل ۵-۱۱- نمودارهای (C, E) احتمالی پارامترهای سیستم؛ الف: زمین شناسی و لیتولوژی (P_1)، ب: گسل ها و چین خوردگی ها (P_2)، ج: ناپایداری پیشین (P_3)، د: مقاومت سنگ بکر (P_4)، ه: هوازدگی (P_5)، و: خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی ها (P_6)، ز: شرایط هیدرولیکی (P_7)، ح: ارتفاع شیب (P_8)، ط: زاویه شیب (P_9)، ی: ناپایداری بالقوه (P_{10})

علاوه بر این، نمودارهای (C, E) احتمالاتی این اجازه را می‌دهند که اهمیت پارامترها در سیستم سنجیده شده و میزان تأثیر آنها شناسایی گردد. برای این منظور، بایستی مقادیر امید ریاضی شدت اندرکنش (مقادیر C+E) پارامترها در یک نمودار رسم گردد. این نمودار در شکل ۵-۱۲ قابل مشاهده است، جایی که حدود خطاها نیز جهت نشان دادن عدم قطعیت تخمین‌ها با استفاده از مقادیر انحراف از معیار محاسبه شده بر روی نقاط ترسیم شده است (برای محاسبه این مقادیر، تمام توزیع‌های احتمال C+E و همین‌طور مقادیر میانگین و انحراف از معیار آنها محاسبه شده است). به طور مشابه، شکل ۵-۱۳ مقادیر امید ریاضی تسلط (یا غلبه) (مقادیر C-E) پارامترها را نشان می‌دهد. حدود خطاها نیز با استفاده از مقادیر محاسبه شده انحراف از معیار توزیع‌های C-E در این شکل ارائه شده است. نتایج حاصل از شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ حاکی از آن است که تقریباً تمامی ۹ پارامتر اصلی (ورودی) تا حد زیادی انفعالی بوده و تأثیر زیادی بر روی پارامتر هدف سیستم (ناپایداری بالقوه) دارند (و بنابراین بایستی در تصمیم‌های مهندسی در نظر گرفته شوند).



شکل ۵-۱۲- مقادیر میانگین و حدود انحراف از معیار برای تعامل ۱۰ پارامتر اثرگذار بر سیستم پایداری شیب‌های سنگی



شکل ۵-۱۳- مقادیر میانگین و حدود انحراف از معیار برای تسلط ۱۰ پارامتر اثرگذار بر سیستم پایداری شیب‌های سنگی

به علاوه، بر اساس نمودارهای احتمالاتی علت- اثر ۱۰ پارامتر در نظر گرفته شده برای سیستم شیب‌های سنگی، نکات زیر قابل توجه است:

- تمامی پارامترهای در نظر گرفته شده تا حدودی انفعالی هستند، چرا که احتمال قرارگیری آنها در فاصله دورتری از قطر نمودار (C, E) بیشتر است.
- پارامتر دارای احتمال بیشتر انفعالی بودن "ناپایداری پیشین" (P_3) است، در حالی که کمترین احتمال انفعالی بودن در این مسئله برای پارامترهای "هوازدگی" (P_5) و "شرایط هیدرولیکی" (P_7) می‌باشد.
- پارامترهای "زمین‌شناسی و لیتولوژی" (P_1) و "گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها" (P_2) بیشترین احتمال تسلط بر سیستم را دارا هستند، در حالی که "ناپایداری پیشین" (P_3) و "ناپایداری بالقوه" (P_{10}) پارامترهایی هستند که با بیشترین احتمال تحت غلبه سیستم می‌باشند.

۵-۳- نتیجه گیری

در این مرحله از تحقیق رساله و به عنوان یک ایده جدید، نشان داده شد که می توان با استفاده از روش نیمه عددی خبره احتمالاتی (PESQ) عدم قطعیت ها را در کدگذاری ها در نظر گرفت. همین طور نشان داده شد که کدهای احتمالاتی در چهارچوب روش کدگذاری PESQ (اختصاص یافته توسط یک کارشناس و یا به دست آمده از توزیع های احتمال کدگذاری های کارشناسان مختلف)، رویکرد را به سمت یک RES احتمالاتی کامل هدایت کرده و باعث می شوند تا بقیه فرآیند تحلیل سیستمی نیز به حالت غیرقطعی درآید. برای مثال (و به عنوان بهبودی بر تحلیل های RES قطعی مرسوم) روش احتمالاتی پیشنهادی این اجازه را می دهد که پارامترهایی با بیشترین احتمال مسلط یا مغلوب بودن و یا با بیشترین احتمال تعاملی بودن شناسایی گردند. بنابراین تغییرپذیری و/یا عدم قطعیت را می توان به طور صریح وارد تحلیل ها کرده و تأثیر چنین عدم قطعیت هایی را به صورت عددی بیان نمود. چنین اطلاعاتی در عمل از اهمیت بالایی برخوردار است، به عنوان مثال در کارهای میدانی، یک طراح می تواند پارامترهایی را که نیاز به توجه ویژه دارند شناسایی کرده و آنها را در طراحی ها در نظر بگیرد.

برای نشان دادن نحوه کاربرد روش پیشنهادی جدید، یک سیستم کلی شیب های سنگی با ۱۰ پارامتر موثر بر پایداری آن در نظر گرفته شده و رویکرد سیستم های مهندسی سنگ در چهارچوب احتمالاتی بکار گرفته شد (علت در نظر گرفتن یک سیستم کلی پایداری شیب ها، قابلیت استفاده و مقایسه نتایج آن در بخش بعدی تحقیق می باشد). نتایج نشان داد که انتظار می رود پارامتر مربوط به وجود "ناپایداری پیشین" محتملاً بیشترین اندرکنش را در سیستم فرضی مورد نظر داشته باشد (و به عبارت دیگر مهمترین پارامتر باشد). همین طور "زمین شناسی و لیتولوژی" و "خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی ها" نیز با احتمال بالایی به عنوان پارامترهای مهم شناسایی شدند. علاوه بر این، رویکرد RES احتمالاتی این اجازه را می دهد که عدم قطعیت های (یا تغییرپذیری های) نتایج به دست آمده

محاسبه کردند. در مثال ارائه شده، پارامتر "ناپایداری پیشین" در مقایسه با سایر پارامترها از بیشترین انحراف از معیار (و بنابراین بیشترین عدم قطعیت) برخوردار بوده است. این تحلیل‌ها را می‌توان در مورد تسلط پارامترهای سیستم نیز ارائه نمود. دسترسی به چنین اطلاعاتی با بکارگیری رویکرد قطعی و/یا مقادیر میانگین امکان‌پذیر نبوده است. این مثال ارزش بالای روش احتمالاتی جدید را به خوبی نشان می‌دهد.

در نهایت ذکر این نکته ضروری است که روش PESQ در حقیقت بهبودی بر روش کدگذاری "بر پایه خبره" (Expert-based) بوده و رویکرد را از حالت ذهنی خارج نمی‌کند، بلکه حالت ذهنی را تعمیم داده و به وارد نمودن بهترین تخمین‌های احتمالی از ارتباط پارامترها به تحلیل‌ها و در نتیجه کاهش خطاها کمک می‌کند.

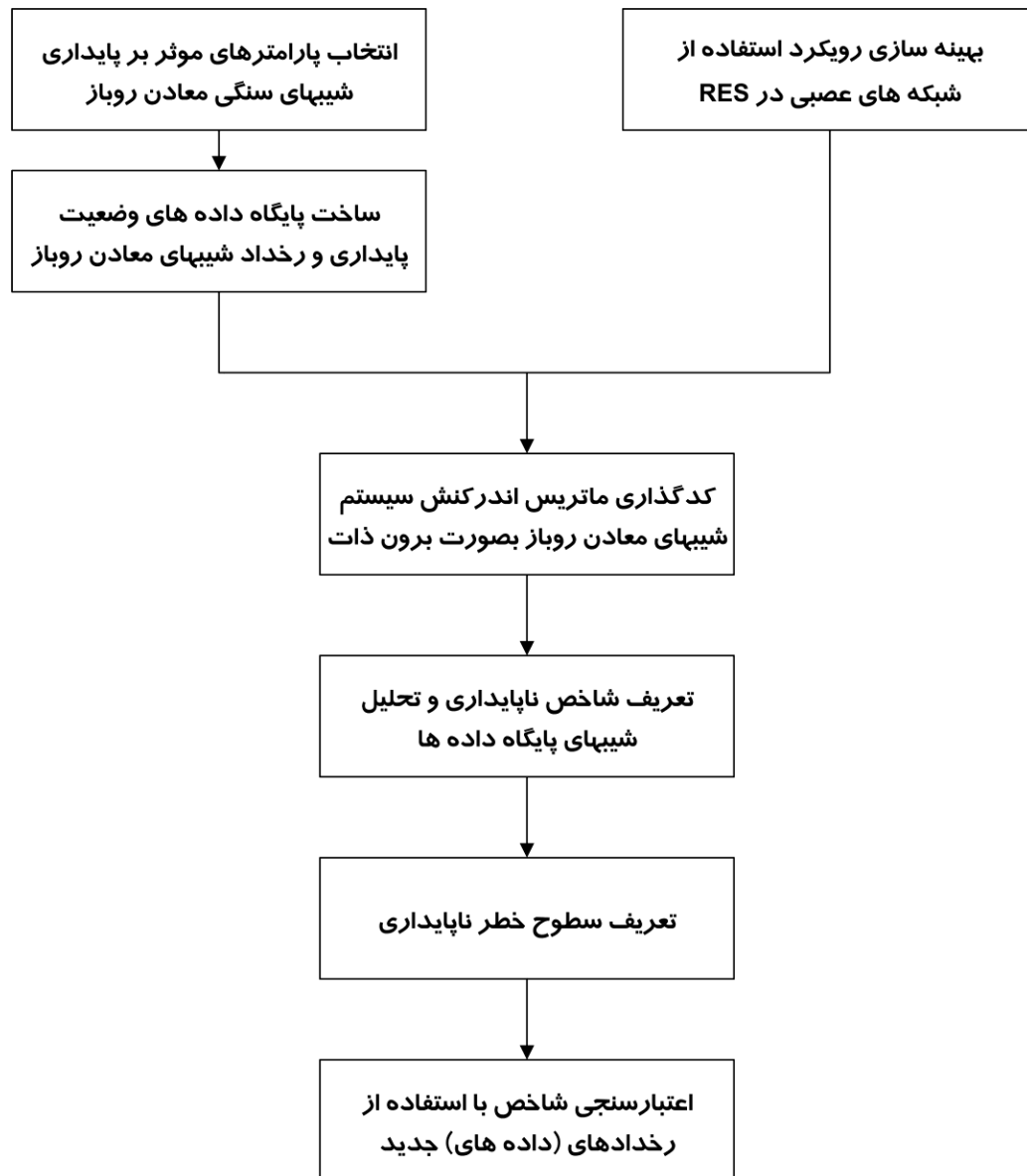
فصل ششم

توسعه شاخص ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز به کمک رویکرد RES

۶-۱- مقدمه

در فصول گذشته از رویکرد RES مرسوم برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی استفاده شده و سپس با توسعه روش کدگذاری احتمالاتی، تلاش شد تا بهبودی بر این رویکرد صورت پذیرد. با این حال، این بهبود علیرغم کمک به تخمین‌های بهتر و شناسایی عدم قطعیت‌ها، رویکرد را از حالت ذهنی خارج ننموده و تنها تعمیمی بر این حالت است.

بنابراین با در نظر گرفتن هدف اصلی رساله حاضر، نیاز است که رویکرد RES از حالت ذهنی خارج شده و در عین حال قادر به تحلیل پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز (که پیچیدگی آنها در فصل دوم رساله تشریح شده است) باشد. برای این منظور در این فصل و به عنوان یکی از سهم‌های اصلی تحقیق رساله، تلاش در جهت بهینه‌سازی و استفاده از الگوریتم یک بهبود صورت گرفته قبلی شامل بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی و کدگذاری ماتریس اندرکنش شیب‌های معادن روباز از طریق تشکیل یک پایگاه داده‌های نسبتاً جامع از وضعیت پایداری و اطلاعات کامل شیب‌های معادن روباز در نقاط مختلف جهان می‌باشد. در حقیقت، هدف اصلی ارائه یک شاخص ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز است که با کدگذاری ماتریس از طریق تشکیل پایگاه داده‌ها و استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی ممکن می‌گردد. در نهایت پس از تعریف سطوح خطر ناپایداری، شاخص پیشنهادی با استفاده از اطلاعات جدید (خارج از پایگاه داده‌های کدگذاری) مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. شکل ۶-۱ نحوه توسعه شاخص یادشده و مراحل اجرای این ایده را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱- مراحل توسعه شاخص ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز

۶-۲- کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN^۱)

در این مرحله از تحقیق، به منظور توسعه یک شبکه عصبی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها به صورت برون‌ذات و غیرذهنی، از ایده ارائه شده توسط یانگ و ژانگ در سال ۱۹۹۸ به

^۱ Artificial Neural Networks

همراه اعمال بهبودهایی در بهینه‌سازی الگوریتم شبکه استفاده می‌شود. این ایده عبارت از مدل‌سازی نگاشت غیرخطی ورودی‌های یک سیستم به خروجی‌های آن است. پارامترهای حاضر در ماتریس خروجی از چنین نگاشتی، به طور کامل به یکدیگر وابسته بوده و از خصوصیات یک سیستم تمام مرتبط (FCM) (Jiao & Hudson, 1995) نیز برخوردار هستند که در فصل سوم رساله و در بخش ۳-۵-۲ در مورد آن بحث گردید. در حقیقت می‌توان گفت که ماتریس خروجی یک ماتریس اندرکنش یکپارچه (GIM) به حساب می‌آید.

در شبکه‌های عصبی، یادگیری^۱ حاصل شده از مجموعه آموزش^۲ با نام وزن‌های^۳ (W) مربوط به پیوندهای اجزاء شبکه معرفی می‌شود. در ایده حاضر، وزن‌های شبکه تأثیر ورودی‌ها بر خروجی‌ها را مشخص می‌سازند. به عبارت دیگر، این وزن‌ها مربوط به اهمیت نسبی روابط ورودی‌ها در مقابل خروجی‌ها هستند، و از این رو برای تحلیل اندرکنش‌های پارامترها توسط شبکه‌های عصبی در چهارچوب رویکرد RES مناسب می‌باشند (Yang & Zhang, 1998) (در این بخش، از پرداختن به اصول و مبانی و جزئیات شبکه‌های عصبی پرهیز می‌شود. منابع مفید و جامعی مانند دریفوس^۴ (۲۰۰۵) و هیکن^۵ (۲۰۰۸) در این زمینه پیشنهاد می‌شوند).

شبکه عصبی استفاده شده در این تحقیق یک پرسپترون^۶ چندلایه با الگوریتم پس‌انتشار خطای استاندارد (BP^7) است که به سبب سادگی و کاربردی بودن آن، ابزاری قدرتمند در تشخیص الگو به شمار رفته و به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع از شبکه، لایه‌ها و واحدهای پردازش به طور کامل با یکدیگر در ارتباط بوده و از تابع محرک^۸ شناخته شده سیگموئید^۹ استفاده می‌شود (Rumelhart et al., 1986; Rumelhart & McClelland, 1988; Hecht-Nielsen, 1989).

¹ Learning

² Training set

³ Weights

⁴ Dreyfus

⁵ Haykin

⁶ Perceptron

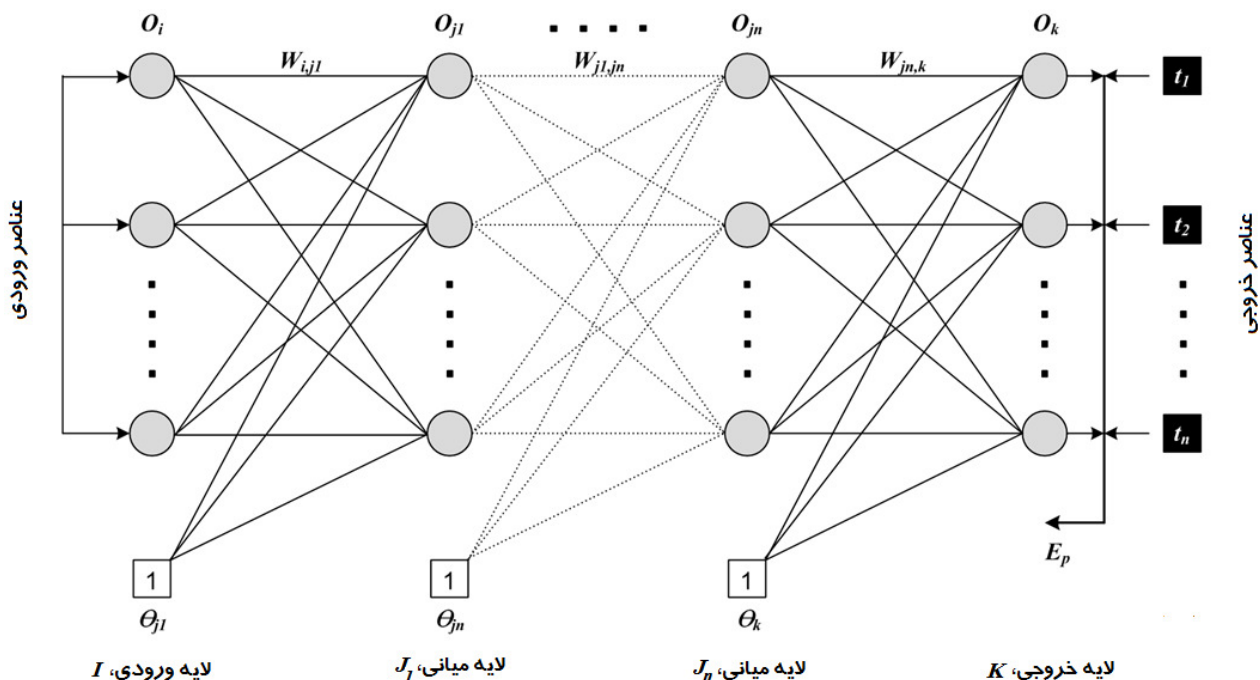
⁷ Back-Propagation

⁸ Activation function

⁹ Sigmoid

الگوریتم BP بر پایه روش تصحیح وزن‌ها و در دو مسیر کار می‌کند: یک مسیر رو به جلو و یک مسیر بازگشت. در مسیر رو به جلو، مقادیر وزن‌های اولیه شبکه به صورت تصادفی انتخاب شده و تخصیص می‌یابند و بدین ترتیب برای یک ورودی اولیه با ثابت نگه داشتن وزن‌ها یک خروجی به دست می‌آید. سپس خطای میان خروجی شبکه و مقدار هدف^۱ در مسیر بازگشت انتشار یافته و وزن‌های لایه‌های قبلی از این طریق به روز رسانی می‌شود (Zupan & Gasteiger, 1993).

در این تحقیق، از الگوریتم BP مورد نظر برای محاسبه مستقیم مشتق جزئی مرتبه اول هر نقطه اتصال ورودی بر حسب تغییرات هر گره خروجی استفاده می‌شود. برای این منظور، پس از این که فرآیند آموزش کامل گردید، به شبکه عصبی اجازه ادامه کار و تطبیق بیشتر (جهت اهداف پیش‌بینی) داده نمی‌شود. شکل ۶-۲ طرح کلی شبکه BP در نظر گرفته شده را در مرحله یادگیری نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲- طرح کلی شبکه BP مورد نظر در مرحله یادگیری

¹ Target value

وزن‌ها (W) و آستانه‌ها^۱ (θ) در محاسبه مشتقات شبکه‌های عصبی برای تمام پیوندها به صورت اولیه ثابت در نظر گرفته می‌شوند. همین‌طور تمام مقادیر ورودی و خروجی با استفاده از یک الگوی نرمالایزاسی خطی به بازه (۰,۱) آورده می‌شوند (در صورت عدم پیروی از این الگو).

در شبکه آموزش‌یافته‌ای که وزن‌ها (W) برای تمامی پیوندهای میان عصب‌ها تعدیل یافته است، روابط میان ورودی (NET) و خروجی (O) برای یک تابع محرک در لایه‌های I ، J_1 تا J_n و K می‌تواند به صورت زیر باشد (Yang & Zhang, 1998):

$$O_{j1} = f_{j1}(NET_{j1}) = \frac{1}{(1 + e^{-NET_{j1}})}; \quad NET_{j1} = \sum_i O_i W_{i,j1} + \theta_{j1}$$

(۱-۶)

$$O_{jn} = f_{jn}(NET_{jn}) = \frac{1}{(1 + e^{-NET_{jn}})}; \quad NET_{jn} = \sum_{jn-1} O_{jn-1} W_{jn-1,jn} + \theta_{jn}$$

$$O_k = f_k(NET_k) = \frac{1}{(1 + e^{-NET_k})}; \quad NET_k = \sum_{jn} O_{jn} W_{jn,k} + \theta_k$$

که در آن اندیس‌های i ، j_n و k ($i=1$ to i_{\max} ، $j_n=1$ to $j_{n,\max}$ ، $k=1$ to k_{\max}) به ترتیب نشان‌دهنده عناصر ورودی در لایه ورودی I ، عناصر میانی در لایه میانی J_n و عناصر خروجی در لایه خروجی K هستند (زیرنویس \max تعداد کل عناصر هر لایه را نشان می‌دهد و n نیز تعداد لایه‌های میانی است به شرطی که بیش از یک لایه میانی وجود داشته باشد). $W_{i,j}$ بیان‌کننده ماتریس وزنی ضرایب تعدیل یافته برای پیوندهای میان واحدهای i -ام و j -ام، f تابع محرک، و θ آستانه هر واحد است. با استفاده از قاعده زنجیره‌ای و در نظر گرفتن این نکته که فقط اجزای بردار خروجی O_k از عنصر روی لایه میانی J متغیرهای خروجی در رابطه (۱-۶) هستند، مشتقات جزئی O_k در لایه خروجی K نسبت به O_i در لایه ورودی I عبارت است از:

¹ Threshold

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_k}{\partial O_i} &= \left(\frac{\partial O_k}{\partial O_{j_n}} \right) \left(\frac{\partial O_{j_n}}{\partial O_{j_{n-1}}} \right) \dots \left(\frac{\partial O_{j_2}}{\partial O_{j_1}} \right) \left(\frac{\partial O_{j_1}}{\partial O_i} \right) \\ &= \left(\frac{\partial O_k}{\partial NET_k} \frac{\partial NET_k}{\partial O_{j_n}} \right) \dots \left(\frac{\partial O_{j_1}}{\partial NET_{j_1}} \frac{\partial NET_{j_1}}{\partial O_i} \right) \end{aligned} \quad (2-6)$$

همان طور که ذکر شد، تابع محرک بکار رفته در این مورد تابع سیگموئید می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$f(x) = 1/(1 + \exp(-x)) \quad (3-6)$$

و مشتق آن به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f'(x) = f(x)f(x)\exp(-x) \quad (4-6)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۶-۱)، اجزاء سمت راست معادله (۶-۲) بشکل زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial O_m}{\partial NET_m} = f'_m(NET_m) = D_m(NET_m) = e^{-NET_m} / (1 + e^{-NET_m})^2 = O_m(1 - O_m) \quad (5-6)$$

و با در نظر گرفتن رابطه زیر:

$$\frac{\partial NET_m}{\partial O_{m-1}} = W_{m-1,m} \quad (6-6)$$

با جاگذاری روابط (۶-۵) و (۶-۶) در رابطه (۶-۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial O_k}{\partial O_i} = \sum_{j_n} \sum_{j_{n-1}} \dots \sum_{j_1} D_k W_{j,nk} D_{j_n} W_{j_{n-1},j_n} \dots D_{j_2} W_{j_1,j_2} D_{j_1} W_{i,j_1} \quad (7-6)$$

که در آن j_1 تا j_n لایه‌های میانی بوده و D نشان‌دهنده مشتق تابع محرک مربوطه است. ذکر این نکته ضروری است که اهمیتی ندارد چه تابعی توسط شبکه تقریب زده می‌شود، زیرا در هر صورتی تمام عناصر سمت راست معادله (۶-۷) وجود خواهند داشت (Hecht-Nielson, 1990).

پس از این که فرآیند یادگیری یک شبکه عصبی با استفاده از مثال‌ها (مشاهدات) موجود در یک پایگاه داده‌های آموزش کامل شد، می‌توان تأثیر مقادیر ورودی بر خروجی را به دست آورد. برای این منظور و به این علت که دانش^۱ ایجاد شده از پایگاه داده‌های مشاهدات در بطن وزن‌های (W) شبکه وجود دارد، می‌توان برای محاسبه تأثیر ورودی‌ها بر خروجی‌ها از این وزن‌ها استفاده کرد (Yang & Zhang, 1998). با توجه به رابطه (۶-۷) مفهوم توان نسبی تأثیر (RSE_{ki}) واحد ورودی i بر واحد خروجی k تعریف می‌شود. RSE_{ki} در حقیقت متقارن با درایه (i, k) -م ماتریس اندرکنش تمام مرتبط در رویکرد RES می‌باشد.

سپس با فرض تمام مقادیر پارامترهای ورودی در فاصله $(0, 1)$ ، مقادیر RSE_{ki} مربوطه می‌تواند به شکل زیر محاسبه گردد (Yang & Zhang, 1998):

$$RSE_{ki} = C \sum_{jn} \sum_{jn-1} \dots \sum_{j1} D_k W_{jn,k} D_{jn} W_{jn-1,jn} \dots D_{j2} W_{j1,j2} D_{j1} W_{ij1} \quad (۸-۶)$$

که در آن C یک ثابت نرمالایز می‌باشد که مقدار مطلق بیشینه RSE_{ki} را به ۱ محدود می‌کند. مقادیر RSE به دست آمده از رابطه (۸-۶) نشان‌دهنده اثر نسبی و تمام مرتبط یک پارامتر ورودی بر یک پارامتر خروجی شبکه در فضای ورودی در نظر گرفته شده می‌باشند (با در نظر گرفتن تمام خط سیرهای میان دو پارامتر).

برای به دست آوردن توان نسبی تأثیر یکپارچه که با تغییر موقعیت ورودی‌ها در فضای ورودی تغییر نمی‌یابد، می‌توان مشتق تابع محرک را در یک قسمت برابر با مقدار ثابت فرض کرد (به صورت تکه‌ای خطی). همان طور که در بالا نیز ذکر شد، در مراحل بعد مقدار اختصاص یافته به طبقات مختلف پارامترها در محدوده $(0, 1)$ متغیر خواهد بود و از این رو تابع سیگنویید می‌تواند توسط یک تابع خطی در این محدوده تقریب زده شود. بنابراین می‌توان در هنگام محاسبه مقادیر RSE_{ki} تابع محرک را یک تابع خطی فرض نمود (حداقل در محدوده کاری این تحقیق).

¹ Knowledge

به عنوان مثال، اگر فرض کنیم که تابع محرک همانند تابع خطی زیر باشد:

$$F(x) = x \quad (۹-۶)$$

در این صورت مشتق آن می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$G(x) = 1 \quad (۱۰-۶)$$

بنابراین در این مورد در این مورد RSE با توان نسبی تأثیر یکپارچه ($GRSE^1$) جایگزین می‌گردد که به صورت زیر درمی‌آید:

$$GRSE_{ki} = C \sum_{jn} \sum_{jn-1} \dots \sum_{j1} W_{jn,k} W_{jn-1,jn} \dots W_{j1,j2} W_{ij1} \quad (۱۱-۶)$$

که در آن C یک ثابت نرمالایز می‌باشد که مقدار مطلق بیشینه $GRSE_{ki}$ را به ۱ محدود می‌کند. $GRSE$ در رابطه (۱۱-۶) دلالت بر اهمیت نسبی هر واحد ورودی بر یک واحد خروجی در یک شبکه به صورت یکپارچه یا کلی دارد و به همین دلیل بسیار شبیه به اجزای ماتریس اندرکنش تمام مرتبط در رویکرد RES است.

از آنجا که مقادیر $GRSE_{ki}$ دارای مفهوم فیزیکی بوده (نشان‌دهنده اثر عناصر ورودی بر خروجی‌ها) و انعطاف‌پذیر هستند (نیاز به یک تابع پیوسته به منظور مشتق‌گیری ندارند) و همین‌طور قابل تعمیم به سایر مدل‌های شبکه‌های عصبی می‌باشند، می‌توان از آنها برای سنجش اثر پارامترهای ورودی بر خروجی‌ها استفاده کرد. بنابراین در این تحقیق به منظور کدگذاری ماتریس اندرکنش از آنها استفاده خواهد شد (ذکر این نکته ضروری است که زمانی که $GRSE_{ki} > 0$ است، خروجی با افزایش مقدار ورودی افزایش می‌یابد؛ زمانی که $GRSE_{ki} < 0$ است، خروجی با افزایش مقدار ورودی کاهش می‌یابد؛ و در نهایت زمانی که $GRSE_{ki} = 0$ است، خروجی رابطه‌ای با ورودی ندارد).

برای این منظور، مقادیر $GRSE_{ki}$ را می‌توان به شکل یک ماتریس نوشت:

¹ Global Relative Strength of Effect

$$GRSE = [GRSE_{ki}] \quad (۱۲-۶)$$

که در آن k نشان‌دهنده تعداد واحدهای خروجی و i تعداد واحدهای ورودی است. به طور خاص اگر تعداد متغیرهای (یا پارامترهای) ورودی و خروجی یکسان باشد، ماتریس رابطه (۱۲-۶) در واقع ماتریس اندرکنش پارامترهای در نظر گرفته شده خواهد بود که در آن $GRSE_{ji}$ عناصر قطر اصلی (توان نسبی تأثیر یکپارچه هر پارامتر بر خودش) و $GRSE_{jk} (k \neq j)$ عناصر درایه‌های غیراصولی ماتریس هستند. همان طور که در بالا نیز ذکر شد، در این تحقیق این ماتریس خروجی به عنوان ماتریس اندرکنش تمام مرتبط در رویکرد RES شناخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در نهایت، دقت مدل ANN تا حد زیادی به معماری شبکه و ساختار پارامترها در آن وابسته است. یکی از دشوارترین کارها در مطالعات مرتبط با ANN یافتن معماری "بهینه" شبکه است که مرتبط با تعداد لایه‌ها و تعداد عصب‌ها در لایه‌های میانی می‌باشد. تعداد این عوامل معمولاً از طریق سعی و خطا مشخص می‌شود، چرا که تقریباً هیچ روش معروف و شناخته شده‌ای برای تعیین شبکه بهینه وجود ندارد. از طرفی روش سعی و خطای دستی نیز می‌تواند بسیار وقت‌گیر باشد. همچنین جعبه ابزار شبکه‌های عصبی نرم‌افزار MATLAB[®] (Beale et al., 2011) که در این تحقیق برای مدل‌سازی ANN از آن استفاده می‌شود، وزن‌های اولیه را در هر اجرا به صورت تصادفی اختصاص می‌دهد که عملکرد شبکه آموزش‌یافته را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد و حتی اگر سایر فاکتورها و معماری شبکه نیز ثابت نگهداشته شود، این عامل سبب به وجود آمدن مشکلات بیشتری در انتخاب معماری بهینه شبکه و ساختار پارامترها می‌گردد. برای فائق آمدن بر این مشکل، در این تحقیق برنامه‌ای در MATLAB[®] توسعه داده شد که به طور خودکار فرآیند سعی و خطا را انجام می‌دهد. علیرغم این که در کارهای مرتبط قبلی انتشار یافته از شبکه بهینه واقعی استفاده نشده است، با این حال تجربه این تحقیق نشان می‌دهد که این بهینه‌سازی در شبکه عصبی تا حد بسیاری منجر به بهتر شدن نتایج می‌گردد. برنامه توسعه یافته و مورد استفاده در این مطالعه به طور خودکار تعداد لایه‌های

میانی و نیز تعداد عصب‌های لایه‌های میانی را تغییر داده و در نهایت "بهترین" معماری شبکه را بر اساس درصد مطلق میانگین خطاها ($MAPE^1$) و مجذور میانگین مربع خطاهای ($RMSE^2$) کمینه برای مجموعه آموزش مورد نظر انتخاب می‌کند.

۳-۶- تعریف شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز ($MSII^3$)

پس از این که شبکه عصبی با استفاده از مجموعه مشاهدات پایگاه داده‌ها آموزش یافت، ماتریس اندرکنش RES را می‌توان کدگذاری کرد که در عمل از طریق تشکیل و محاسبه ماتریس GRSE به دست می‌آید. سپس با استفاده از این ماتریس و مقادیر پارامترهای مورد نظر و "وزن تأثیر" مرتبط با آنها می‌توان یک شاخص خطر برای رفتار شیب‌های سنگی در معادن روباز تعریف و محاسبه نمود. این شاخص با نام شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز ($MSII$) شناخته خواهد شد.

روشی توسط هادسون در سال ۱۹۹۲ برای اختصاص یک وزن تأثیر به هر پارامتر پیشنهاد شده است که در برخی کاربردهای RES نیز در گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (Mavroulidou et al., 2004 and 2007; Ceryan & Ceryan, 2008; Budetta et al., 2008; Rozos et al., 2008 and 2011). برای به دست آوردن این وزن‌ها، ابتدا مقادیر علت (C) و اثر (E) هر پارامتر در سیستم محاسبه می‌شود. با پیروی از فرآیند استاندارد محاسبات RES، برای پارامتر i -ام داریم:

$$C_i = \sum_n I_{nm} \quad (\text{with } m \equiv i); \quad (13-6)$$

$$E_i = \sum_m I_{nm} \quad (\text{with } n \equiv i).$$

که در آن I_{nm} نشان‌دهنده اجزای (درایه‌های) ماتریس اندرکنش می‌باشد. در واقع C_i جمع درایه‌های

¹ Mean Absolute Percent Error

² Root Mean Squared Error

³ Mine Slope Instability Index

سطر i -ام در ماتریس اندرکنش و E_i جمع ستون i -ام است. سپس وزن‌های تأثیر مختص هر پارامتر را می‌توان به صورت درصد مجموع علت (C_i) و اثر (E_i) هر پارامتر محاسبه کرد (با توجه به رابطه زیر):

$$a_i(\%) = \left(\frac{1}{MR_i} \times \frac{(C_i + E_i)}{\sum_j (C_j + E_j)} \right) \times 100 \quad (14-6)$$

که در آن MR_i بیانگر رده بیشینه پارامتر i می‌باشد (همان طور که در بخش قبل هم ذکر شد، در این تحقیق رده بیشینه تمام پارامترها برابر با ۱ خواهد بود؛ $MR_i \equiv 1, \forall i$). بنابراین وزن پارامتر i در MSII پیشنهادی که با a_i نشان داده می‌شود، به صورت شدت اندرکنش آن پارامتر ($C_i + E_i$) تقسیم بر مجموع شدت اندرکنش‌های تمام پارامترهای سیستم محاسبه می‌شود.

پس از این که وزن‌های تأثیر (a_i ها) برای تمام پارامترها محاسبه شدند، شاخص ناپایداری شیب معادن روباز را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$MSII = \sum_i a_i \times R_i \quad (15-6)$$

که در آن مقادیر a_i وزن‌های پارامترها هستند (که پس از این که سیستم با پایگاه داده‌های در دسترس آموزش یافت، مقادیر "ثابتی" به حساب می‌آیند) و مقادیر R_i ($0 \leq R_i \leq 1$) رده‌های اختصاص یافته به هر پارامتر ورودی مورد نظر در مسئله پایداری شیب‌های معادن روباز می‌باشند که بنابراین برای هر شیب معدن یا منطقه مختلف مقادیر متفاوتی خواهند بود (بحث در مورد پارامترها در بخش ۶-۴ ارائه خواهد شد).

مقادیر MSII تعریف شده در بالا در محدوده ۰ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند. MSII در حقیقت یک نشانگر پتانسیل ناپایداری است که در آن رده‌های پارامترها به گونه‌ای اختصاص می‌یابد که مقادیر بالاتر شاخص بیانگر شرایط بحرانی‌تر ناپایداری شیب مورد مطالعه می‌باشد.

۴-۶- ساخت یک پایگاه داده‌ها از رخدادها و وضعیت‌های پایداری شیب‌های

معادن روباز

۴-۶-۱- انتخاب و طبقه‌بندی پارامترهای اصلی موثر بر پایداری شیب‌های معادن روباز

انتخاب پارامترهای اصلی در این تحقیق بر پایه کارهای هادسون در ۱۹۹۲ می‌باشد که عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی را (فارغ از نوع شیب و کاربرد) به صورت یک "اطلس" ارائه داده است (Hudson, 1992a and 1992b). این مجموعه پارامترها به عنوان یک لیست اولیه در تحقیق حاضر مد نظر قرار گرفت، اگر چه به دلیل مقیاس متفاوت پروژه‌های معادن روباز برخی تغییرات عمده در آن اعمال گردیده و برخی پارامترها اضافه یا کم شده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که انتخاب پارامترها بر اساس توصیه‌ها و پیشنهادات موجود در سوابق قبلی و همچنین تجربه به دست آمده از تحلیل شکست‌ها در معادن روباز انجام گرفته است. علاوه بر این سعی شده است پارامترهایی انتخاب گردند که نسبتاً به راحتی و بدون نیاز به روش‌های خاص برداشت قابل حصول باشند (پارامترهایی که به طور متداول در معادن روباز اندازه‌گیری یا برداشت می‌شوند). در نتیجه ۱۸ پارامتر کلیدی (در ۹ دسته اصلی) به عنوان پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر پتانسیل ناپایداری دیواره‌های معادن روباز دارند، انتخاب شدند که در شکل ۳-۶ قابل مشاهده‌اند. تمام پارامترهای انتخاب شده در ادامه مورد بحث قرار گرفته و به اهمیت و طبقه‌بندی‌های در نظر گرفته شده برای آنها پرداخته می‌شود (برای استفاده در تعیین MSII طبق رابطه (۶-۱۵)) که به طور مبسوط در جدول ۶-۱ آورده شده‌اند.

به دلیل این که برخی پارامترها در فصل چهارم به صورت کلی تشریح شده‌اند، از توضیح تفصیلی دوباره آنها در این فصل اجتناب می‌شود. در برخی موارد توضیح مجدد با رویکرد شیب‌های معادن روباز انجام گرفته است. قابل ذکر است که مقادیر پارامترها به ۵ تا ۶ طبقه تقسیم شده و رده هر طبقه از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند (رده‌های بالاتر دلالت بر پتانسیل ناپایداری بیشتر دارند).

واضح است که طبقه‌بندی پارامترهای سیستم به دلیل تأثیر مستقیم بر نتایج از اهمیت بسیاری

برخوردار است، به طوری که یک طبقه‌بندی نادرست حتی در صورت به دست آوردن دقیق‌ترین اندرکنش‌های میان پارامترها نیز قادر به تخمین صحیح خروجی سیستم (که می‌تواند یک شاخص باشد) نخواهد بود. بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع و از آنجایی که یک طبقه‌بندی مرجع و بخصوص برای شیب‌های معادن روباز با ملاحظه مقیاس متفاوت این پروژه‌ها موجود نمی‌باشد، در این تحقیق توجه ویژه‌ای به این امر اختصاص یافته است. برای این منظور مطالعه گسترده‌ای بر روی محدوده تغییرات پارامترهای انتخاب شده در معادن روباز مختلف انجام گرفته و سپس از متخصصین دانشگاهی و نیز کارشناسان داخلی و خارجی درگیر در پروژه‌های مرتبط نیز کمک گرفته شده است. از میان واحدهای دانشگاهی می‌توان به مشاوره‌های انجام شده با تیم تحقیقات ژئومکانیک معادن روباز دانشگاه بریتیش کلمبیا^۱ در کانادا، گروه تحقیقات و مدل‌سازی پایداری شیب آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه پلی‌تکنیک مادرید^۲ در اسپانیا، و همچنین گروه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی لولئوی^۳ سوئد اشاره کرد. از موسسات و واحدهای معدنی مورد مشاوره نیز می‌توان تیم ژئوتکنیک معدن روباز چوکیکاماتا^۴ در شیلی، شرکت طلای بریک^۵ کانادا، شرکت معدنی بولیدن^۶ سوئد، و نیز شرکت‌های داخلی نظیر مهندسین مشاور کاوشگران و ایتوک ایران را نام برد.

¹ University of British Columbia (UBC)

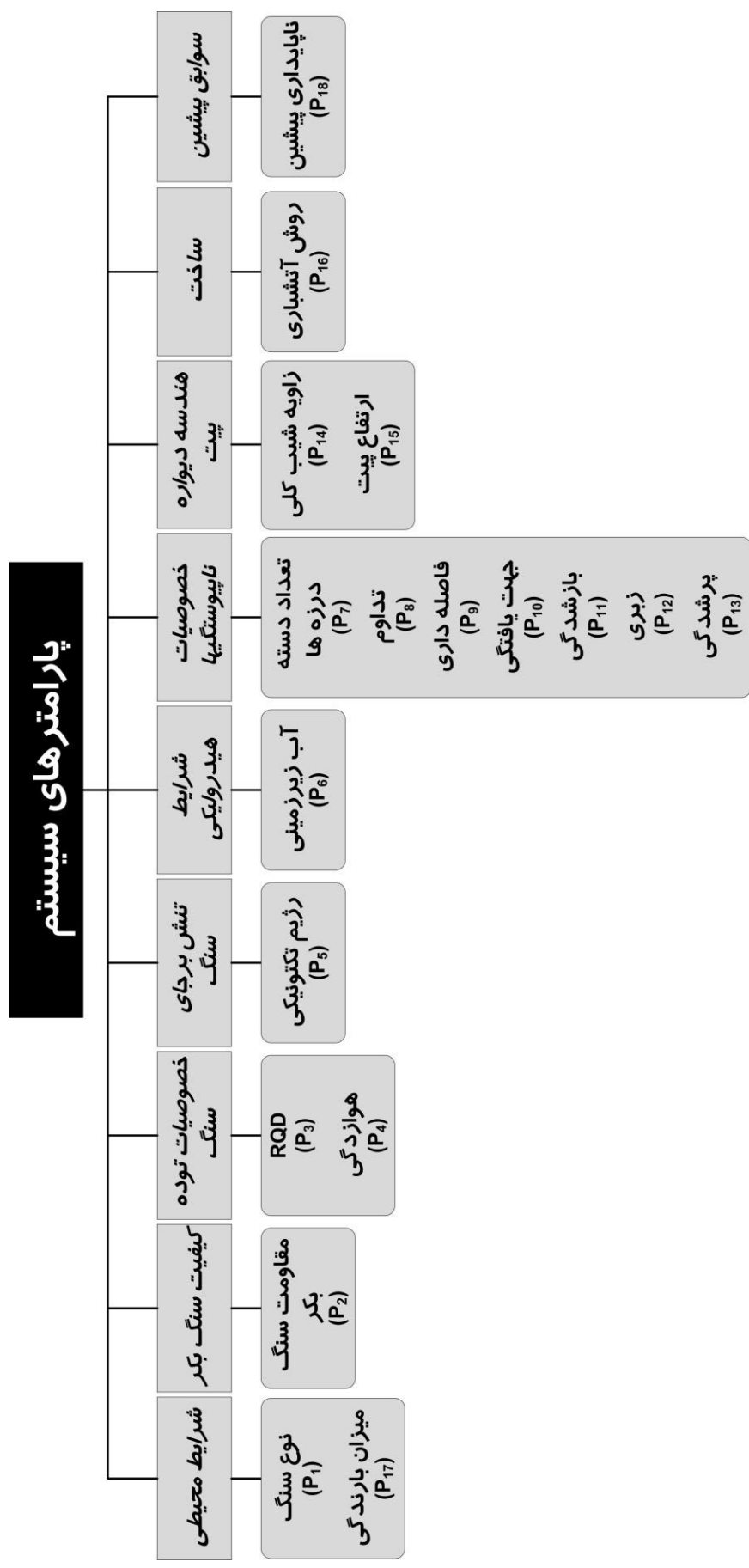
² Universidad Politecnica de Madrid (UPM)

³ Luleå University of Technology (LTU)

⁴ Chuquicamata

⁵ Barrick Gold Corporation

⁶ Boliden



شکل ۶-۳ - دسته‌های انتخاب شده و پارامترهای اصلی سیستم

۶-۴-۱-۱- شرایط محیطی کلی

✓ نوع سنگ (P₁):

تجربه نشان می‌دهد که لیتولوژی یا نوع سنگ در شکست شیب تأثیر دارد. معمول‌ترین انواع سنگ‌ها با توجه به خصوصیات لیتولوژیکی آنها در ۶ گروه طبقه‌بندی شده‌اند. برای انجام این طبقه‌بندی توصیه‌هایی از سوابق قبلی مورد توجه قرار گرفته است (Hoek et al., 1995 and 2002; Hoek, 1999; Kliche, 1999; Marinos & Hoek, 2001; Karzulovic, 2006) (جدول ۶-۱).

✓ میزان بارندگی (P₁₇):

بارندگی به صورت برف و باران در بسیاری از موارد با شکست شیب در ارتباط می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، بارندگی در یک منطقه می‌تواند سبب به وجود آمدن شرایطی گردد که در نهایت باعث تضعیف شیب‌ها و کمک به ناپایداری آنها می‌شود. این شرایط می‌تواند تلفیقی از بالا رفتن سطح آب زیرزمینی (که بسته به نفوذپذیری توده سنگ می‌تواند باعث اشباع کامل آن گردد) و نیز افزایش فشار منفذی در درزه‌ها و شکستگی‌ها باشد. امروزه این امر به خوبی شناخته شده است که احتمال رخداد شکست‌های بزرگ و کوچک پس از یک دوره بارندگی سنگین بالا می‌باشد (Koukis et al., 1997). در این تحقیق، میزان بارندگی سالیانه مناطق معدنی به ۵ طبقه از "کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر در سال" تا "بیشتر از ۶۰۰ میلی‌متر در سال" تقسیم شده است (جدول ۶-۱).

۶-۴-۱-۲- کیفیت سنگ بکر

✓ مقاومت سنگ بکر (P₂):

این پارامتر تأثیر بسیاری در مقاومت و کیفیت توده سنگ دارد، به عنوان مثال طبقه‌بندی RMR تا حد بسیار زیادی به مقاومت سنگ بکر وابسته است (Bieniawski, 1989). در این تحقیق از

مقاومت فشاری نامحصور (تک‌محوره) (UCS^1) برای نشان دادن این پارامتر استفاده شده و به ۶ طبقه از " 150 MPa " تا " 25 MPa " تقسیم شده است (جدول ۶-۱).

۶-۱-۳- خصوصیات توده سنگ

✓ شاخص توصیف کیفیت سنگ (RQD) (P_3):

RQD نشان‌دهنده درجه شکستگی توده سنگ در رخساره شیب است (Deere et al., 1967; Deere & Deere, 1988). مقدار RQD در سوابق قبلی همواره به ۵ طبقه تقسیم‌بندی شده است که در اینجا نیز از این طبقه‌بندی استفاده می‌شود (جدول ۶-۱).

✓ هوازگی (P_4):

مطالعات صحرایی نشان داده‌اند که در اغلب موارد هر دو نوع هوازگی فیزیکی و شیمیایی احتمال ناپایداری شیب‌ها را بالا می‌برند (Giani, 1992; Calcaterra & Parise, 2010). طبقه‌بندی در نظر گرفته شده در این مطالعه بر اساس پیشنهادات انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ در زمینه توصیف توده سنگ (ISRM, 2007) است که از "هوانزده (W1)" تا "گاملاً هوازده (W5)" تغییر می‌کند (جدول ۶-۱).

۶-۱-۴- تنش برجای سنگ

✓ رژیم تکتونیکی (P_5):

توده سنگ‌ها به طور طبیعی تحت تأثیر تنش‌های برجایی هستند که ناشی از وزن لایه‌های پوشاننده و تنش‌های تکتونیکی می‌باشند. از طرفی تاریخچه شرایط تکتونیکی توده سنگ نیز تأثیر

¹ Uniaxial Compressive Strength

زیادی بر تنش‌های برجا دارد (Read & Stacey, 2009). در نقشه تنش‌های جهانی^۱ (WSM, 2008) این نکته نشان داده شده است که تنش افقی حداکثر وابسته به موقعیت صفحات تکتونیکی است (Zoback, 1992). بنابراین به دلیل این که در بیشتر معادن روباز اندازه‌گیری‌های تنش‌های برجا انجام نمی‌گیرد، پارامتر رژیم تکتونیکی در این تحقیق به عنوان یک جایگزین برای اندازه‌گیری‌های مستقیم انتخاب گردید. با توجه به آنچه توسط روزوس و همکاران در سال ۲۰۰۸ پیشنهاد شده است، این پارامتر به پنج طبقه تقسیم شد که از "ضعیف" تا "شدید" تغییر کرده و از نقشه‌های تکتونیکی مناطق مورد نظر به سادگی قابل تشخیص است (توضیحات کامل‌تر طبقات مختلف در جدول ۱-۶ آورده شده است).

۶-۱-۴-۵- شرایط هیدرولیکی

✓ آب زیرزمینی (P₆):

آب زیرزمینی از طریق کاهش تنش موثر در ناپیوستگی‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت برشی آنها پایداری شیب‌های سنگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پارامتر از طرفی باعث کمک به هوازگی سنگ نیز می‌شود. با پیروی از طبقه‌بندی‌های شناخته شده RMR (Bieniawski, 1989) و SMR (Romana, 1985)، این پارامتر به ۵ طبقه تقسیم‌بندی شد (جدول ۱-۶).

۶-۱-۴-۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها

خصوصیات ناپیوستگی‌ها اثر آشکار و مهمی بر پایداری شیب‌ها دارد. بنابراین مهمترین این خصوصیات که برای توصیف ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود، انتخاب شده و در زیر توضیح داده شده‌اند:

✓ تعداد دسته درزه‌های اصلی (P₇):

بلوکی بودن یک توده سنگ و رفتار کلی آن به تعداد دسته درزه‌های موجود در آن بستگی دارد.

¹ World Stress Map

شکل بلوک و همسانگردی توده سنگ نیز تحت تأثیر این پارامتر می‌باشند. امروزه روش‌های خودکار دسته‌بندی دسته درزه‌ها و انتخاب تعداد بهینه آنها بسیار مورد توجه می‌باشد (Jimenez & Sitar, 2006; Jimenez, 2008; Tokhmechi et al., 2011). در این تحقیق پنج طبقه برای توصیف این پارامتر در نظر گرفته شده است که از توده سنگ‌های دارای صفر تا بیش از ۳ دسته درزه تغییر می‌کند (جدول ۶-۱).

✓ تداوم ناپیوستگی‌ها (P₈):

تداوم ناپیوستگی‌ها در پیش‌بینی رفتار توده سنگ و تحلیل شیب‌های سنگی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا طول ناپیوستگی‌ها بر اندازه بلوک‌هایی که شکل می‌گیرند تأثیر زیادی می‌گذارد (Jimenez & Sitar, 2008). دلیل دیگر اهمیت بالای این پارامتر در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، تأثیر آن بر مقاومت توده سنگ است (Einstein et al., 1983; Park et al., 2005). برای طبقه‌بندی این پارامتر در این تحقیق ضمن توجه به سوابق قبلی، مقیاس متفاوت شیب‌های معادن روباز نیز در نظر گرفته شده است که در جدول ۶-۱ قابل مشاهده است.

✓ فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (P₉):

فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بر اندازه بلوک‌ها در توده سنگ و همین‌طور بر رفتار کلی آن تأثیر دارد. برای مثال، چندین دسته ناپیوستگی با فاصله کم باعث به وجود آمدن شرایط همسانگرد با چسبندگی کم می‌گردد، در حالی که در توده سنگ‌های با فاصله بیشتر ناپیوستگی‌ها احتمال به وجود آمدن شرایط قفل‌شدگی بیشتر است (Wyllie & Mah, 2004). در این مورد نیز تصحیحاتی بر طبقه‌بندی‌های متداول موجود در سوابق قبلی برای فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به منظور اعمال اختلاف مقیاس شیب‌های معادن روباز اعمال شده و در نهایت این پارامتر به ۵ طبقه بر حسب ارتفاع پله تقسیم‌بندی شده است (جدول ۶-۱).

✓ جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (P₁₀):

جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها نسبت به جهت حفاری شیب، مد شکست و نوع حرکت انتقالی را کنترل کرده و بنابراین پارامتر تأثیرگذاری در پایداری شیب به شمار می‌آید (Jimenez et al., 2006; Jimenez & Sitar, 2007). از این رو پایداری شیب‌های سنگی تا حد زیادی به جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها و فصل مشترک آنها نسبت به جهت شیب بستگی دارد (Hoek & Bray, 1981). با پیروی از طبقه‌بندی RMR (Bieniawski, 1989) و با در نظر گرفتن طبقه‌های پیشنهادی برای این پارامتر در SMR (Romana, 1985) و MRMR (Laubscher, 1990)، یک طبقه‌بندی کیفی از "بسیار مطلوب" تا "بسیار نامطلوب" در این تحقیق برای این پارامتر در نظر گرفته شده است (جدول ۱-۶).

✓ بازشدگی ناپیوستگی‌ها (P₁₁):

بازشدگی در واقع فاصله عمودی جداکننده دو سطح سنگی در یک ناپیوستگی باز است که فضای خالی با هوا، آب یا ماده پرکننده پر شده است (Wyllie & Mah, 2004; Maerz et al., 2005). در این مطالعه از پنج طبقه پیشنهادی در RMR (Bieniawski, 1989) و SMR (Romana, 1985) استفاده شده است (جدول ۱-۶).

✓ زبری ناپیوستگی‌ها (P₁₂):

زبری ناپیوستگی‌ها اثر تعیین‌کننده‌ای بر مقاومت برشی و پایداری حفریات سنگی دارد (Hoek, 2007). ضریب زبری درزه‌ها (JRC¹) که توسط بارتون² ارائه شده است (Barton, 1973)، متداول‌ترین شاخص برای نشان دادن درجه زبری ناپیوستگی‌های سنگی می‌باشد. در تحقیق حاضر تأثیر مقیاس بر JRC (Bandis et al., 1981) به منظور قائل شدن تفاوت میان شرایط آزمایشگاهی و طبیعی (مقیاس

¹ Joint Roughness Coefficient

² Barton

بلوکی) در نظر گرفته شده و پارامتر JRC_{Macro} به پنج طبقه تقسیم‌بندی گردید که در جدول ۶-۱ آورده شده است.

✓ پرشدگی ناپیوستگی‌ها (P_{13}):

حضور پرکننده‌ها تأثیر مهمی بر مقاومت ناپیوستگی‌ها دارد، بنابراین مهم است که پرکننده‌ها شناسایی شده و پارامترهای مقاومتی مربوط به آنها در طراحی پایداری شیب‌ها در نظر گرفته شوند. در این تحقیق، پیشنهادات انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای وضعیت پرشدگی درزه‌ها (ISRM, 2007) که تاکنون در برخی از طبقه‌بندی‌ها بکار رفته است (Liu & Chen, 2007)، برای طبقه‌بندی کیفی این پارامتر از حالت "پرنشده" تا "پرکننده بسیار نرم" استفاده گردیده است (جدول ۶-۱).

۶-۱-۷- شرایط هندسی دیواره پیت

هندس کلی یک شیب معدن روباز در فصل دوم (شکل ۲-۳) نشان داده شد. برای این تحقیق، دو پارامتر هندسی زیر به عنوان پارامترهای تأثیرگذار انتخاب شده‌اند:

✓ زاویه شیب کلی (P_{14}):

آشکار است که زاویه شیب نقش مهمی را در پایداری آن بازی می‌کند. در توده سنگ‌های کنترل شده ساختاری، این پارامتر بر تعداد بلوک‌هایی که می‌توانند در یک شیب سنگی به وجود بیایند تأثیر دارد (Goodman & Shi, 1985). علاوه بر این، هر چه زاویه شیب زیادتر باشد، نیروهای موافق حرکت بلوک‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه سبب شکل‌گیری بلوک‌های مستعد شکست می‌گردد. بنابراین احتمال شکست در شیب‌های زاویه‌دارتر بیشتر خواهد بود. در این مطالعه سوابق قبلی متعددی در نظر گرفته شده (Sjoberg, 1999; Hustrulid et al., 2000; Read & Stacey, 2009) و در نتیجه آن پارامتر زاویه شیب کلی به پنج طبقه از " 30° " تا " 60° " درجه تقسیم‌بندی شده است (جدول ۶-۶).

(۱).

✓ ارتفاع پیت (P₁₅):

بلوک‌های سنگی در شیب‌های مرتفع‌تر از انرژی پتانسیلی بیشتری نسبت به شیب‌های با ارتفاع کمتر برخوردارند و بنابراین خطر ناپایداری بیشتری را ایجاد می‌کنند (Kliche, 1999). بنابراین سطوح تنش بالاتری در اطراف شیب پیت‌های عمیق‌تر وجود دارد. برای طبقه‌بندی این پارامتر از مطالعات مروری قبلی شیب‌های معادن روباز (Hustrulid et al., 2000; Read & Stacey, 2009) استفاده شده و در نهایت ارتفاع پیت به پنج طبقه از " 50 m " تا " 300 m " تقسیم شد (جدول ۱-۶).

۶-۴-۱-۱- ساخت

✓ روش آتشباری (P₁₆):

آسیب رخساره‌های سنگی در اثر آتشباری‌های سنگین از عوامل متداول ناپایداری در معادن روباز است. در این تحقیق پنج روش اصلی آتشباری در معادن روباز با توجه به مطالعات جامع قبلی در این زمینه (Hustrulid, 1999; Hagan & Bulow, 2000) برای طبقه‌بندی این پارامتر در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۱-۶).

۶-۴-۱-۹- سوابق پیشین

✓ ناپایداری‌های پیشین (P₁₈):

در مورد اهمیت این پارامتر در فصل چهارم (بخش ۴-۳-۳) بحث شده است. همان طور که گفته شد، شیب‌های غیرفعال به شیب‌هایی گفته 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. در این قسمت برای شیب‌های معادن روباز پارامتر ناپایداری پیشین به پنج طبقه از "عدم وجود" تا "بسیار (به طور واضح) فعال" تقسیم شده است (جدول ۶-۱).

فصل ششم توسعه شاخص ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز به کمک رویکرد RES

جدول ۶-۱ - طبقه‌بندی پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز

طبقه‌ها و رده‌بندی‌ها					پارامترها
رسوبی: شیل رسی، گل سنگ، رس، مارل	رسوبی: آهک شیلی، دولومیت، سنگ آهک، گچ، سیلتستون؛ دگرگونی: اسلیت، فیلیت، مرمر	رسوبی: انیدریت، سنگ گچ؛ آذرین: توف، بازالت، برش، داسیت، ریولیت	رسوبی: برش، ماسه سنگ، کنگومرا؛ دگرگونی: هورنفلس؛ آذرین: دولریت، افسیدین، آندزیت، نوریت، آگلومرا	آذرین: گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت، گابرو؛ دگرگونی: گنایس، کوارتزیت، آمفیبولیت	نوع سنگ (لینئولوژی)
۱/۰	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۰	امتیاز
< ۲۵	۵۰-۷۵	۷۵-۱۰۰	۱۰۰-۱۵۰	> ۱۵۰	مقاومت سنگ بکر - UCS (MPa)
۱/۰	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰/۰	امتیاز
< ۱۰	۱۰-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۷۵	۷۵-۱۰۰	(%) RQD
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
W5 کاملاً هوازده (تجزیه شده)	W4 بشدت هوازده	W3 به طور متوسط هوازده	W2 کمی هوازده	W1 هوازده	هوازده‌گی
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز

فصل ششم توسعه شاخص ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز به کمک رویکرد RES

ادامه جدول ۶-۱ - طبقه‌بندی پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز

شدید (وجود روی هم‌چسبگی ^۵ و روزاندگی ^۶)	بسیار قوی (وجود نواحی بسیار شکسته ^۴)	قوی (وجود گسل‌ها، چین‌ها و ناپیوستگی‌ها)	متوسط (وجود برگورگی ^۱ ، تورق ^۲ و شکافگی ^۳)	ضعیف (تقریباً فقدان هرگونه پدیده تکتونیکی معنی‌دار)	ریزیم تکتونیکی
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
دارای جریان	در حال چکیدن	خیس	مرطوب	کاملاً خشک	شرایط آب زیرزمینی
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
>۳	۳	۲	۱	۰	تعداد دسته درزه‌های اصلی
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
> ۴۰ m	۲۵-۴۰ m	۱۰-۲۵ m	۵-۱۰ m	< ۵ m	تداوم ناپیوستگی‌ها
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
< ۰/۲ h _b	۰/۲ h _b - ۱ h _b	۱ h _b - ۲ h _b	۲ h _b - ۳ h _b	> ۳ h _b	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (h _b ارتفاع پله است)
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
بسیار نامطلوب	نامطلوب	متوسط	مطلوب	بسیار مطلوب	جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها (بر اساس SMR و MRMR)
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز

فصل ششم توسعه شاخص ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز به کمک رویکرد RES

ادامه جدول ۶-۱- طبقه‌بندی پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز

> ۵ mm	۱-۵ mm	۰/۱-۱ mm	< ۰/۱ mm	بدون بازشدگی	بازشدگی ناپیوستگی‌ها
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
صافی	صاف	خفتنا ^۵ زیر	زیر	بسیار زیر	زبری ناپیوستگی‌ها
< ۱	۱-۳	۳-۵	۵-۷	> ۷	JRC _{Macro}
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
پرشدگی بسیار نرم	پرشدگی نرم	پرشدگی سخت	پرشدگی بسیار سخت	بدون پرشدگی	پرشدگی ناپیوستگی‌ها
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
> ۶۰°	۵۱°-۶۰°	۴۱°-۵۰°	۳۰°-۴۰°	< ۳۰°	زاویه شیب کلی
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
> ۳۰۰ m	۲۰۰-۳۰۰ m	۱۰۰-۲۰۰ m	۵۰-۱۰۰ m	< ۵۰ m	ارتفاع پیت
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
آتشباری معمولی/حفر مکانیکی	آتشباری تولیدی ^{۱۱} به‌بود یافته	آتشباری آرام ^۹ /بالشتکی ^{۱۰}	آتشباری پس‌شکافی ^۸	آتشباری پیش‌شکافی ^۷	روش آتشباری
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
> ۶۰۰ mm/y	۴۵۰-۶۰۰ mm/y	۳۰۰-۴۵۰ mm/y	۱۵۰-۳۰۰ mm/y	< ۱۵۰ mm/y	میزان بارندگی (برف و باران سالانه)
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز
بسیار (به‌طور واضح) فعال	نسبتاً فعال	ساکن	غیر فعال	عدم وجود	ناپایداری‌های پیشین
۱/۰	۰/۸	۰/۶	۰/۳	۰/۰	امتیاز

^۱ Foliation; ^۲ Schistosity; ^۳ cleavage; ^۴ high-fractured zones; ^۵ Imbrications; ^۶ overthrusts; ^۷ Presplitting; ^۸ Postsplit; ^۹ Smoothwall; ^{۱۰} Cushion; ^{۱۱} Modified production blast

۶-۴-۲- پایگاه داده‌های شیب‌های معادن روباز

اطلاعات تمامی ۱۸ پارامتر در نظر گرفته شده در سیستم برای ۸۲ مورد شیب معدن روباز از نقاط مختلف جهان جمع‌آوری شده و به صورت یک پایگاه داده‌های شیب‌های معادن روباز تنظیم گردید. در جمع‌آوری داده‌ها از انتشارات و گزارشات موجود در سوابق قبلی، تماس‌های مستقیم با شرکت‌های مرتبط با پروژه‌ها و نیز در برخی موارد از بازدید معادن مورد نظر استفاده شد.

فهرست معادن موجود در پایگاه داده‌ها در جدول ۶-۲ آورده شده است. از کل ۸۲ مورد موجود در پایگاه داده‌ها، تعداد ۷۲ مورد به صورت تصادفی به عنوان "مجموعه کدگذاری" (برای آموزش و تست شبکه عصبی) انتخاب شده و ۱۰ پارامتر باقیمانده برای اعتبارسنجی شاخص پیشنهادی جدید استفاده گردید. وضعیت پایداری تمامی شیب‌های موجود در پایگاه داده‌ها (مربوط به همان زمان برداشت داده‌ها) و نیز حجم و مد شکست ثبت شد تا در طراحی بعدی مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب و با استفاده از پیشنهاد ارائه شده توسط کوزیرف^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۰ و نیز رید و استیسی در سال ۲۰۰۹، شیب‌های سنگی موجود در پایگاه داده‌ها به سه گروه اصلی تقسیم شدند: "شیب پایدار"^۲، "شکست در مجموعه‌ای از پله‌ها (شکست میان‌رمپی)"^۳ و "شکست کلی"^۴. توزیع وضعیت پایداری و مقیاس شکست برای موارد ثبت شده در پایگاه داده‌ها در نمودار شکل ۶-۴ نشان داده شده است.

^۱ Kozyrev

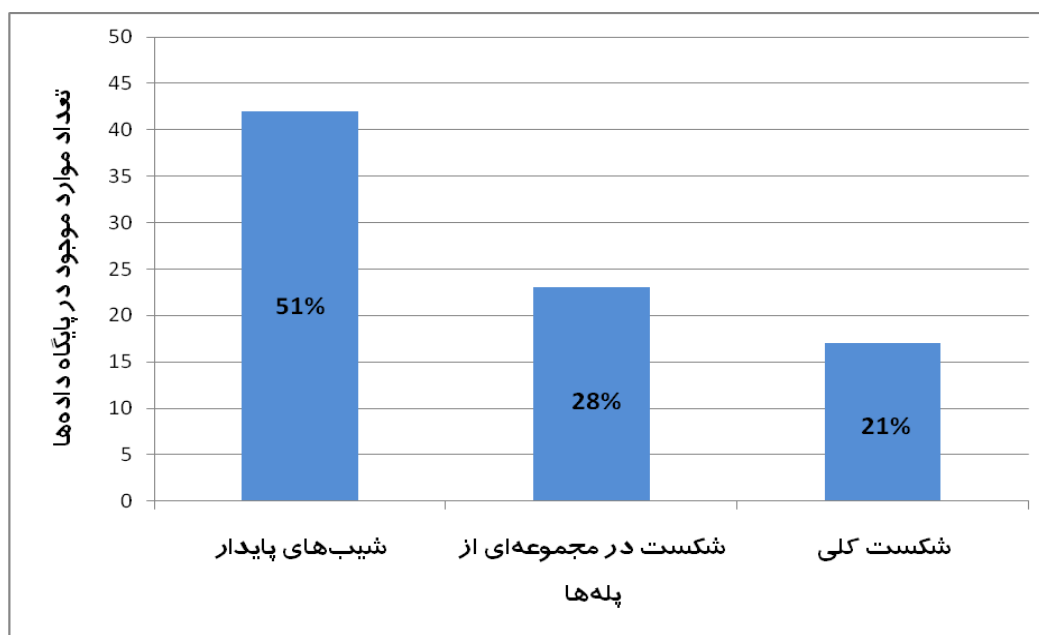
^۲ Stable slope

^۳ Failure in set of benches (inter-ramp failure)

^۴ Overall failure

جدول ۶-۲- فهرست معادن روباز موجود در پایگاه داده‌ها

معدن روباز	کشور	ماده معدنی	تعداد موارد در پایگاه داده‌ها
Cadia Hill	استرالیا	طلا و مس	۵
Aguas Claras	برزیل	سنگ آهن	۵
Panda (Ekati)	کانادا	الماس	۱
Chuquicamata	شیلی	مس	۵
Escondida	شیلی	مس	۷
Ujina (Collahuasi)	شیلی	مس	۱
انگوران	ایران	سرب و روی	۴
چادرمو	ایران	سنگ آهن	۵
چغارت	ایران	سنگ آهن	۵
گل گهر	ایران	سنگ آهن	۴
سرچشمه	ایران	مس	۴
سونگون	ایران	مس	۴
Sandsloot	آفریقای جنوبی	پلاتین	۶
Venetia	آفریقای جنوبی	الماس	۷
Aznalcollar	اسپانیا	سرب و روی	۵
La Yesa	اسپانیا	سنگ آهک	۲
Aitik	سوئد	مس	۶
Esperanza (Phelps-Dodge)	امریکا	مس	۱
Betze-Post (Goldstrike)	امریکا	طلا	۴



شکل ۶-۴- توزیع وضعیت‌های پایداری ۸۲ مورد موجود در پایگاه داده‌ها

۶-۵- نتایج

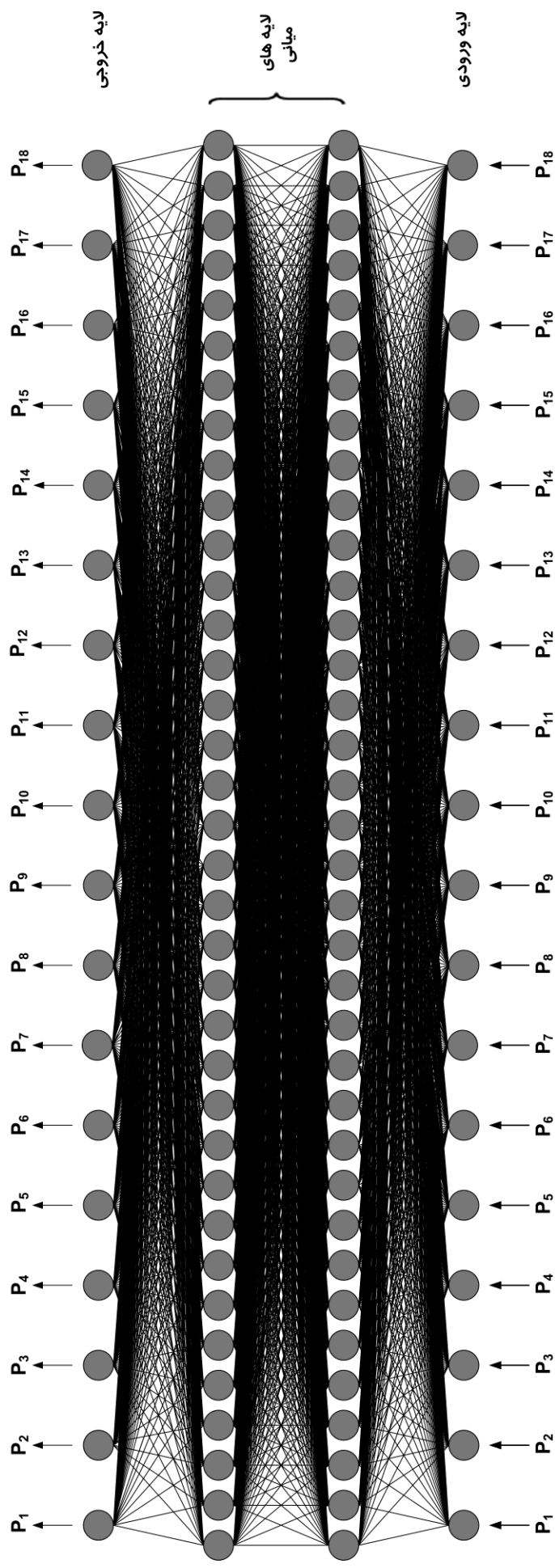
۶-۵-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش بر پایه ANN

پایگاه داده‌های ۸۲ مورد شیب معادن روباز با استفاده از پارامترهای طبقه‌بندی شده در جدول ۶-۱ ساخته شد (پایگاه داده‌های مذکور به طور کامل و به صورت گذشته در پیوست ب رساله آورده شده است). همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ۷۲ مورد به طور تصادفی از این پایگاه داده‌ها برای آموزش و تست شبکه عصبی انتخاب شده و ۱۰ مورد باقیمانده برای اعتبارسنجی روش کنار گذاشته شدند.

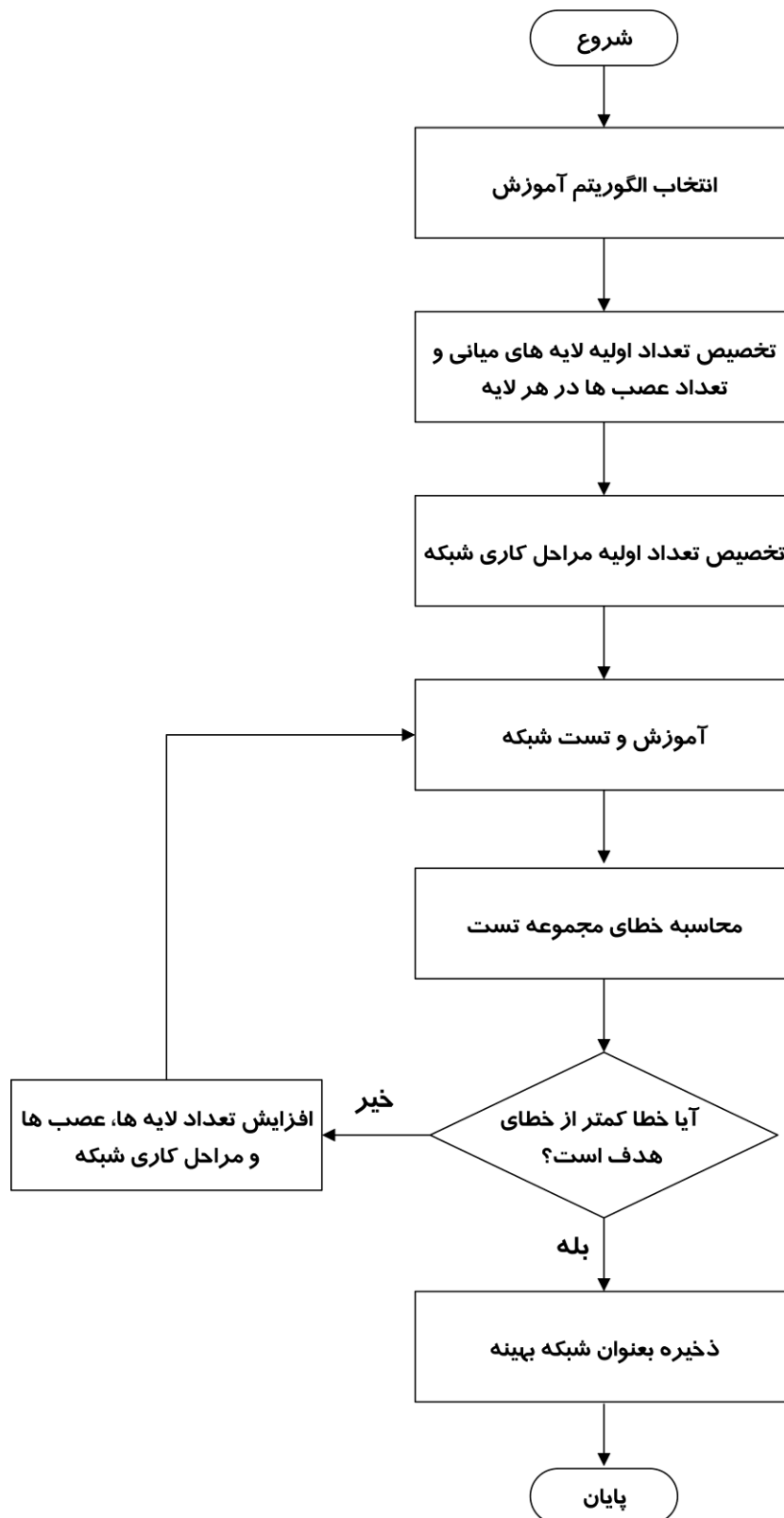
به منظور کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها، یک شبکه عصبی با الگوریتم BP طراحی شد که در آن واحدهای ورودی و خروجی یکسان بوده و ساختار شبکه به صورت یک آینه در می‌آید (شکل ۶-۵ چنین ساختاری را نشان می‌دهد). همچنین یک الگوریتم بهینه‌سازی برای تعیین تعداد بهینه لایه‌ها و نیز تعداد بهینه عصب‌ها در هر لایه با در نظر گرفتن کمترین خطای تست شبکه توسعه داده شد که سلسله مراتب آن به طور ساده در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. این فرآیند انتخاب، همچنین برای الگوریتم‌های آموزش مختلف BP نظیر `trainlm`، `trainscg` و `trainbfg` به منظور یافتن بهترین الگوریتم اجرا شدند. بهترین معماری شبکه به دست آمده از فرآیند یاد شده به شکل "۱۸-۳۶-۳۶-۱۸" محاسبه شده است که شامل یک لایه ورودی (با ۱۸ عصب)، یک لایه خروجی (با ۱۸ عصب) و دو لایه میانی (هر کدام ۳۶ عصب) می‌باشد. بنابراین آموزش شبکه با این معماری و با استفاده از الگوریتم آموزش `trainlm` انجام گردید و سپس شبکه مورد تست قرار گرفت. ارزیابی رفتار شبکه در فرآیند آموزش در `MATLAB`® نشان می‌دهد که شبکه در نهایت به حد خطای قابل قبولی دست یافته است.

به محض این که آموزش شبکه به پایان رسید، مشتقات جزئی هر واحد ورودی بر حسب هر واحد خروجی محاسبه شده و بدین ترتیب وزن‌های تمام پیوندهای شبکه نیز در دسترس بوده و اجزای ماتریس GRSE قابل محاسبه‌اند (رابطه ۶-۱۱). جدول ۶-۳ ماتریس اندرکنش کدگذاری شده در این

فرآیند را نشان می‌دهد. در این ماتریس، درایه‌های قطر اصلی بیانگر تأثیر هر پارامتر بر خودش است. واضح است که یک پارامتر نمی‌تواند بر خودش اثری داشته باشد و بنابراین به طور نظری مشتق جزئی آن نسبت به خود آن پارامتر همواره برابر با ۱ خواهد بود. همان طور که در ماتریس کدشده (GRSE) نیز دیده می‌شود، درایه‌های قطر اصلی حاصل از شبکه آموزش یافته بسیار نزدیک به ۱ بوده (از ۰/۹۹۰۷ تا ۱/۰۰۵۴) و این حاکی از قابلیت اعتماد بالایی نسبت به ماتریس مذکور می‌باشد. درایه‌های غیراصلی، اندرکنش‌های میان جفت متغیرهای قطر اصلی را نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن واحدهای ورودی و خروجی و علامت مقادیر در ماتریس می‌توان دریافت که چگونه این واحدها (پارامترها) بر همدیگر و بر پروژه مهندسی سنگ تأثیر می‌گذارند. همان طور که در بخش ۶-۲ نیز ذکر شد، زمانی که $GRSE_{ki} > 0$ است، خروجی با افزایش ورودی افزایش می‌یابد (درایه‌های مثبت ماتریس نشان‌دهنده اثر افزایشی هستند) و زمانی که $GRSE_{ki} < 0$ است، خروجی با افزایش ورودی کاهش می‌یابد (اثر کاهشی درایه‌های منفی ماتریس اندرکنش). در نهایت اگر $GRSE_{ki} = 0$ باشد، خروجی هیچ رابطه‌ای با ورودی نخواهد داشت. این نتایج ارتباط محکمی را با مفهوم حلقه‌های بازخورد مثبت و منفی در مدل تمام مرتبط ارائه شده توسط جیائو و هادسون (۱۹۹۵) نشان می‌دهند.



شکل ۵-۶- ساختار آینه‌ای در نظر گرفته شده برای آموزش شبکه

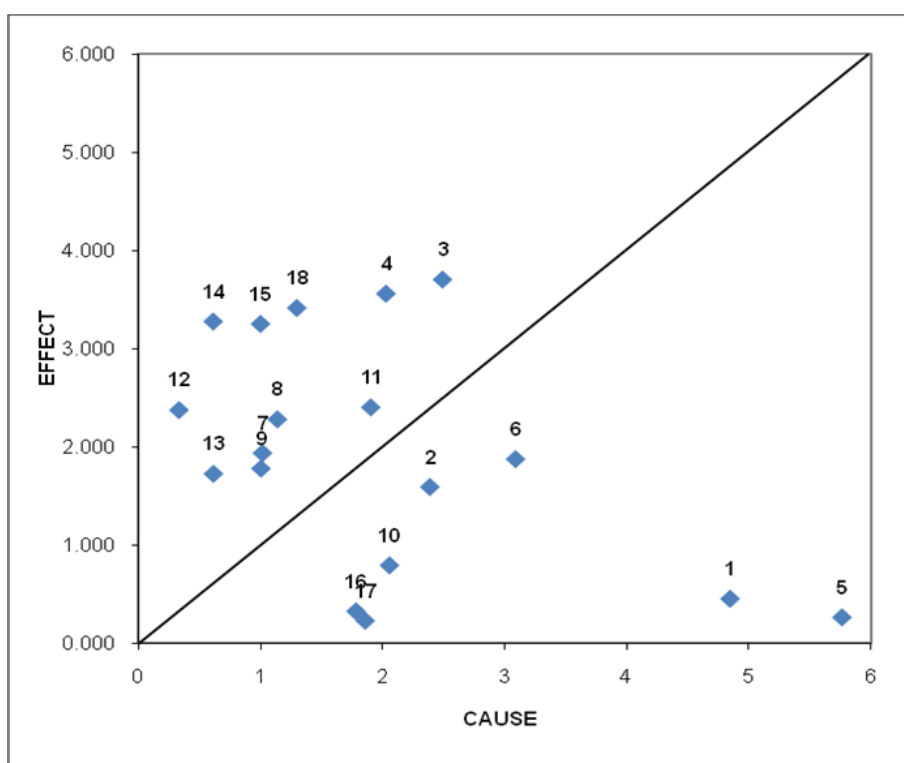


شکل ۶-۶- سلسله مراتب ساده الگوریتم بهینه‌سازی شبکه عصبی ساخته شده

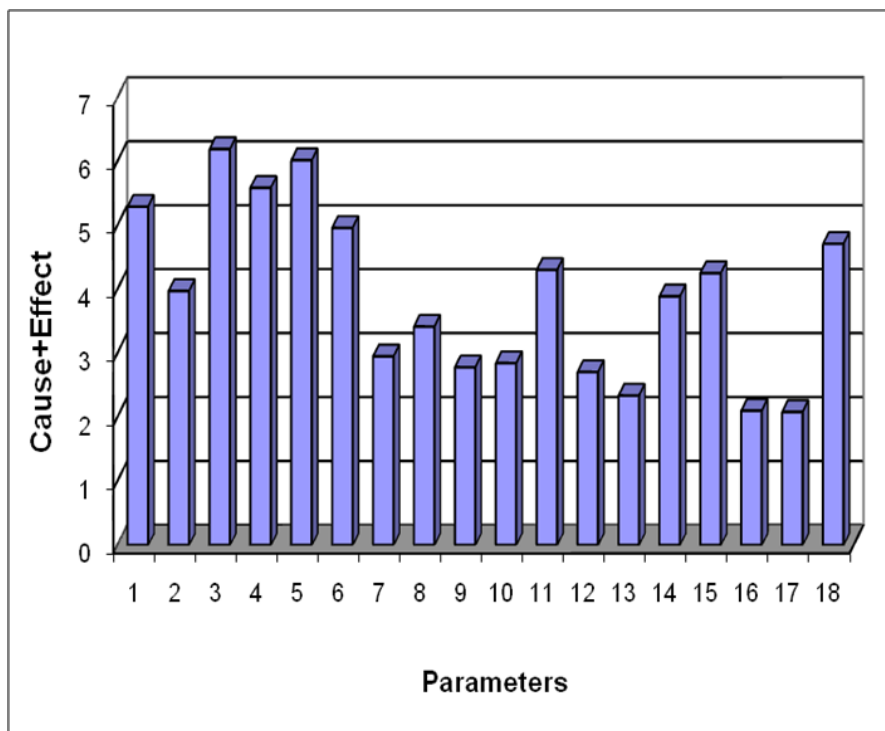
جدول ۶-۳ - ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسئله پایداری شیب‌های معادن روباز

		Cause (C)																
1.000	0.635	0.425	0.577	-0.193	0.172	0.419	0.342	0.229	0.003	-0.006	0.228	0.008	-0.581	-0.621	-0.010	0.016	0.377	4.842
0.000	1.000	0.373	0.452	-0.009	0.009	0.222	0.113	0.120	0.002	0.006	0.194	-0.001	-0.386	-0.275	0.000	0.011	0.211	2.384
-0.007	0.053	1.000	0.247	0.005	-0.005	0.165	0.342	0.018	0.002	0.042	0.324	0.000	-0.400	-0.414	0.004	-0.007	0.453	2.488
0.003	0.318	0.286	1.000	-0.002	0.001	-0.005	-0.006	0.007	-0.003	0.260	0.471	0.000	-0.141	-0.123	-0.011	0.003	0.385	2.025
0.381	0.102	0.617	0.155	1.000	0.388	0.536	0.499	0.510	0.718	0.533	0.286	-0.099	-0.393	-0.396	0.003	-0.024	0.118	5.758
0.004	0.347	0.249	0.489	0.006	1.000	-0.008	0.164	0.009	-0.006	0.486	0.198	0.065	-0.426	-0.360	0.015	-0.038	0.216	3.086
0.001	-0.009	0.365	0.249	0.000	-0.006	1.000	0.004	-0.001	-0.009	-0.009	-0.006	0.059	-0.094	-0.093	-0.007	0.000	0.102	1.014
0.005	0.004	0.193	0.177	0.000	0.006	0.009	1.000	-0.027	0.001	0.155	0.103	0.111	-0.011	-0.128	-0.009	0.053	0.144	1.136
-0.007	-0.008	0.270	0.146	0.000	-0.002	-0.009	-0.128	1.000	0.009	0.162	-0.090	-0.006	0.005	-0.086	-0.005	-0.007	0.062	1.002
0.002	-0.003	-0.008	-0.017	-0.008	0.288	0.008	0.207	0.217	1.000	0.215	0.000	-0.006	-0.291	-0.220	-0.009	0.000	0.555	2.054
0.005	-0.003	-0.006	0.397	0.000	-0.007	-0.002	-0.100	0.095	-0.007	1.000	-0.099	-0.970	-0.120	-0.023	0.000	0.026	0.041	1.901
0.004	0.000	0.002	-0.008	-0.001	0.009	0.002	-0.002	0.007	0.006	-0.007	1.000	-0.008	-0.054	-0.084	-0.003	0.005	0.129	0.331
0.000	0.000	0.008	0.138	0.009	-0.004	-0.005	0.008	-0.009	0.003	-0.102	-0.003	1.000	-0.077	-0.090	0.001	-0.008	0.148	0.613
-0.009	-0.007	-0.004	-0.009	0.007	-0.006	-0.009	0.006	-0.001	-0.009	0.005	-0.009	0.000	1.000	-0.238	-0.127	-0.011	0.154	0.611
0.004	0.003	-0.008	0.005	0.007	0.297	-0.008	0.197	-0.009	0.004	-0.009	-0.006	0.000	-0.227	1.000	-0.104	0.003	0.107	0.998
-0.007	0.006	0.515	0.064	0.004	-0.009	0.399	0.154	0.319	0.000	0.222	-0.001	0.000	0.000	0.004	1.000	-0.006	0.070	1.780
-0.008	0.081	0.131	0.242	-0.005	0.555	0.006	0.000	0.004	0.005	-0.004	0.128	0.383	-0.069	-0.091	0.002	1.000	0.141	1.855
0.000	-0.008	0.243	0.187	-0.002	0.107	0.121	-0.005	0.193	-0.001	0.177	0.226	-0.006	0.000	0.005	-0.009	0.005	1.000	1.295
0.447	1.587	3.703	3.559	0.258	1.871	1.933	2.277	1.775	0.788	2.400	2.372	1.722	3.275	3.251	0.319	0.223	3.413	
		Effect (E)																

همان طور که در فصل‌های قبل بیان شد، می‌توان با استفاده از این ماتریس (جدول ۶-۳) تأثیر هر پارامتر بر سیستم (علت، C) و تأثیر سیستم بر هر پارامتر (اثر، E) را محاسبه کرد و این مقادیر را به ترتیب در یک سطر و یک ستون دیگر ماتریس اندرکنش نشان داد. نمودارهای علت-اثر و شدت اندرکنش پارامترها به ترتیب در شکل‌های ۶-۷ و ۶-۸ نشان داده شده‌اند. وزن‌های تأثیر (a_i) هر پارامتر بر شکست شیب نیز از طریق رابطه (۶-۱۴) محاسبه می‌شود که نتایج به دست آمده برای آنها در جدول ۶-۴ آورده شده است.



شکل ۶-۷- نمودار علت-اثر سیستم در نظر گرفته شده برای مسئله پایداری شیب‌های معادن روباز



شکل ۶-۸- شدت اندرکنش پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز

جدول ۶-۴- وزن‌های تأثیر پارامترهای سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز

وزن تأثیر (a_i)	پارامتر
۷/۵۱۹	نوع سنگ (P_1)
۵/۶۴۵	مقاومت سنگ بکر (P_2)
۸/۸۰۱	RQD (P_3)
۷/۹۳۸	هوازگی (P_4)
۸/۵۵۲	رژیم تکتونیکی (P_5)
۷/۰۴۷	آب زیرزمینی (P_6)
۴/۱۸۹	تعداد دسته درزه‌ها (P_7)
۴/۸۵۲	تداوم ناپیوستگی‌ها (P_8)
۳/۹۴۸	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (P_9)
۴/۰۴۰	جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها (P_{10})
۶/۱۱۴	بازشدگی ناپیوستگی‌ها (P_{11})
۳/۸۴۲	زبری ناپیوستگی‌ها (P_{12})
۳/۳۱۹	پرشدگی ناپیوستگی‌ها (P_{13})
۵/۵۲۴	زاویه شیب کلی (P_{14})
۶/۰۴۰	ارتفاع پیت (P_{15})
۲/۹۸۴	روش آتشیاری (P_{16})
۲/۹۵۴	میزان بارندگی (P_{17})
۶/۶۹۲	ناپایداری‌های پیشین (P_{18})

در ماتریس GRSE بر پایه ANN (ماتریس اندرکنش خروجی) دیده می‌شود که بسیاری از درایه‌های غیراصولی (اندرکنش‌ها) برابر صفر نیستند که این بدان معنی است که سیستم کامل ارائه شده به وسیله این اندرکنش‌ها سیستم پیچیده‌ای است. در برخی موارد، این نوع اطلاعات برای طراح (یا مهندس) آشکار بوده و وی از این نتایج از پیش آگاهی دارد، ولی در برخی موارد دیگر چنین نبوده و این اندرکنش‌ها و نتایج اهمیت پارامترها از قبل پوشیده‌اند. همین طور در نمودار علت-اثر ۱۸ پارامتر سیستم (شکل ۶-۸) مشاهده می‌شود که تمامی پارامترها تا حدی انفعالی هستند، چرا که توده ایجاد شده توسط نقاط پارامترها در نمودار به صورت عمود بر مرکز مکان هندسی $C=E$ (قطر نمودار) قرار گرفته است (Hudson, 1992a; Jiao & Hudson, 1995). این بدان معنی است که در حقیقت تمام پارامترهای انتخاب شده در سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز از اهمیت بالایی برخوردارند.

۶-۵-۲- تعریف سطوح خطر ناپایداری بر اساس MSII

پس از این که مقادیر a_i (وزن‌های تأثیر پارامترها در سیستم) به دست آمدند (جدول ۶-۴)، مقادیر شاخص ناپایداری (MSII) مربوطه برای تمام شیب‌های موجود در پایگاه داده‌ها با استفاده از روش ذکر شده در بخش ۶-۳ قابل محاسبه می‌باشند. جدول ۶-۵ نتایج محاسبات مربوط به این شاخص را برای ۷۲ مورد پایگاه داده‌های آموزش نشان می‌دهد. به دلیل معلوم بودن وضعیت‌های پایداری تمام شیب‌های سنگی در پایگاه داده‌ها، می‌توان مقدار MSII را در هر مورد با رخداد واقعی مقایسه نمود. این کار در شکل ۶-۹ انجام شده است، که همان طوری که در آن دیده می‌شود MSII می‌تواند به عنوان یک شاخص مناسب برای نشان دادن وضعیت پایداری شیب‌های معادن روباز به حساب آید. طبق این نتایج، سه بخش مجزا در شکل ۶-۹ دیده می‌شوند که عبارتند از: "ناحیه امن" که نشان‌دهنده شیب‌های پایدار در پایگاه داده‌ها بوده است که به صورت تقریبی مقادیر $MSII < 50$ برای آن انتخاب شده است؛ ناحیه "سطح خطر I" (H.L. 1) برای مقادیر $50 < MSII \leq 60$ که مربوط

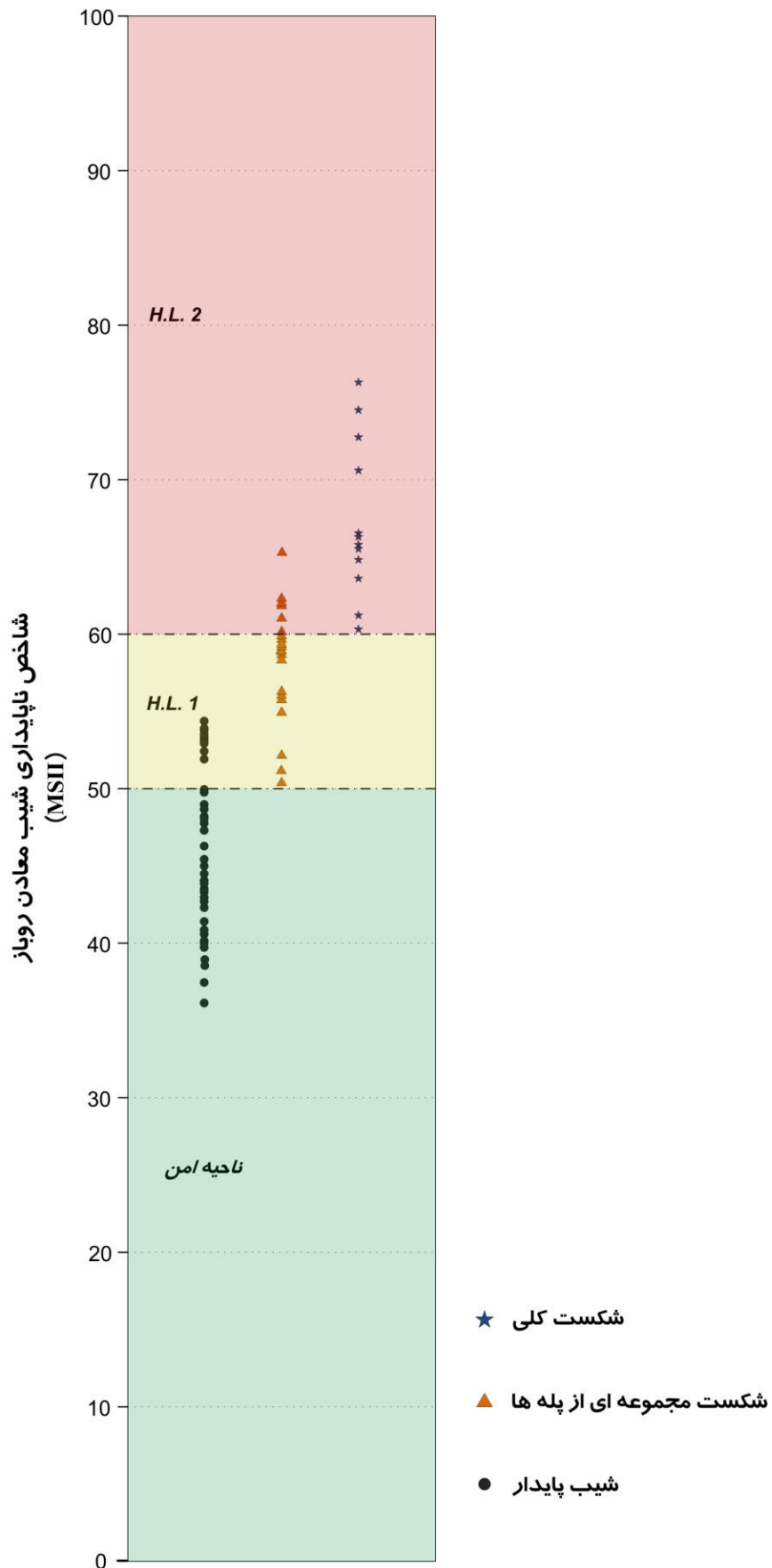
به شکست‌های با مقیاس محدود (شکست در مجموعه‌ای از پله‌ها) بوده؛ و ناحیه "سطح خطر II" (H.L. 2، برای مقادیر $MSII > 60$) که برای شکست‌های بزرگ مقیاس (یا شکست کلی) در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که حدود میان ناحیه‌های مذکور به صورت محافظه‌کارانه انتخاب شده است، به عنوان مثال برخی شیب‌های "پایدار" در ناحیه سطح خطر I و برخی موارد "شکست در مجموعه‌ای از پله‌ها" در ناحیه سطح خطر II به چشم می‌خورند.

جدول ۶-۵- مقادیر محاسبه شده شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII) برای تمام موارد استفاده شده پایگاه داده‌ها در کدگذاری ماتریس

شماره شیب	$MSII = \sum_i a_i \times R_i$	رفتار شیب (در واقعیت)
۱	۶۵/۵	شکست کلی
۲	۵۲/۰	شیب پایدار
۳	۴۹/۰	شیب پایدار
۴	۴۴/۳	شیب پایدار
۵	۵۳/۱	شیب پایدار
۶	۵۲/۶	شیب پایدار
۷	۴۲/۶	شیب پایدار
۸	۵۱/۹	شیب پایدار
۹	۴۹/۷	شیب پایدار
۱۰	۴۴/۴	شیب پایدار
۱۱	۵۸/۵	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها
۱۲	۶۵/۴	شکست کلی
۱۳	۵۸/۷	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها
۱۴	۵۳/۰	شیب پایدار
۱۵	۳۹/۸	شیب پایدار
۱۶	۴۶/۶	شیب پایدار
۱۷	۴۹/۸	شیب پایدار
۱۸	۴۵/۱	شیب پایدار
۱۹	۴۰/۲	شیب پایدار
۲۰	۵۵/۱	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها
۲۱	۵۷/۲	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها
۲۲	۴۸/۲	شیب پایدار
۲۳	۵۲/۹	شیب پایدار
۲۴	۵۱/۶	شیب پایدار

شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۶۰/۲	۲۵
شیب پایدار	۵۱/۱	۲۶
شکست کلی	۶۰/۳	۲۷
شیب پایدار	۵۳/۲	۲۸
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۶۵/۶	۲۹
شکست کلی	۶۶/۷	۳۰
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۹/۴	۳۱
شیب پایدار	۴۷/۲	۳۲
شیب پایدار	۴۷/۵	۳۳
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۶۱/۹	۳۴
شکست کلی	۶۶/۶	۳۵
شیب پایدار	۵۳/۴	۳۶
شکست کلی	۷۶/۰	۳۷
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۶۲/۴	۳۸
شیب پایدار	۴۲/۸	۳۹
شیب پایدار	۴۸/۴	۴۰
شکست کلی	۶۱/۲	۴۱
شیب پایدار	۴۰/۴	۴۲
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۰/۵	۴۳
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۶/۱	۴۴
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۶۱/۹	۴۵
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۹/۴	۴۶
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۵/۹	۴۷
شیب پایدار	۴۲/۴	۴۸
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۶/۰	۴۹
شیب پایدار	۴۳/۴	۵۰
شیب پایدار	۴۴/۸	۵۱
شیب پایدار	۴۷/۰	۵۲
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۶۰/۹	۵۳
شیب پایدار	۴۳/۵	۵۴
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۲/۰	۵۵
شیب پایدار	۳۷/۵	۵۶
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۹/۸	۵۷
شیب پایدار	۴۱/۶	۵۸
شیب پایدار	۳۶/۰	۵۹
شیب پایدار	۳۸/۹	۶۰
شکست کلی	۶۴/۷	۶۱

شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۱/۷	۶۲
شیب پایدار	۳۹/۹	۶۳
شیب پایدار	۴۵/۰	۶۴
شیب پایدار	۴۰/۵	۶۵
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۸/۳	۶۶
شکست کلی	۶۳/۰	۶۷
شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	۵۹/۸	۶۸
شیب پایدار	۴۵/۷	۶۹
شکست کلی	۷۴/۶	۷۰
شکست کلی	۷۲/۶	۷۱
شکست کلی	۷۱/۷	۷۲



شکل ۶-۹- سطوح خطر تخمین زده شده با مقادیر محاسبه شده MSII برای ۷۲ مورد پایگاه داده‌ها

۶-۵-۳- اعتبارسنجی روش

به منظور اعتبارسنجی و ارزیابی قابلیت کاربرد شاخص پیش‌بینی ناپایداری پیشنهادی جدید، ۱۰ مورد از سوابق دیواره‌های معادن روباز ثبت شده در پایگاه داده‌ها که در فرآیند آموزش شبکه از آنها استفاده نشده بود، انتخاب شدند. مقادیر MSII این شیب‌ها محاسبه شده و سپس پیش‌بینی وضعیت پایداری آنها با استفاده از سطوح خطر تعریف شده (شکل ۶-۹) انجام گردید. نتایج به دست آمده سپس با مشاهدات واقعی وضعیت پایداری در معادن مقایسه شد. ۱۰ مورد استفاده شده از پایگاه داده‌ها برای اعتبارسنجی شامل پنج معدن روباز مختلف از نقاط متفاوت جهان بوده است و بنابراین این مجموعه از پراکندگی شرایط محیطی و منطقه‌ای کافی برخوردار بوده است. از طرفی هر سه وضعیت پایداری در نظر گرفته شده در نمودار ارزیابی خطر (شیب‌های پایداری، شکست در مجموعه‌ای از پله‌ها، و شکست کلی) در این رخدادهای انتخاب شده وجود داشته است. جزئیات ۱۰ دیواره معدن روباز یادشده در جدول ۶-۶ آورده شده است.

جدول ۶-۶- جزئیات رخدادهای انتخاب شده برای ارزیابی قابلیت کاربرد (اعتبارسنجی) شاخص

شماره شیب (رخداد)	معدن روباز دیواره	کشور	ماده معدنی	رخداد
				سال
۱	Betze-Post (Goldstrike) دیواره جنوبی	امریکا	طلا	شکست کلی گوه‌ای
				۱۹۹۷
۲	Betze-Post (Goldstrike) دیواره جنوبی	امریکا	طلا	شکست کلی
				۲۰۰۱
۳	Betze-Post (Goldstrike) دیواره جنوب شرقی	امریکا	طلا	شکست کلی گوه‌ای پیچیده
				۱۹۹۷
۴	Betze-Post (Goldstrike) دیواره جنوب غربی	امریکا	طلا	شکست کلی دوصفحه‌ای
				۲۰۰۵
۵	Betze-Post (Goldstrike) دیواره شمالی	امریکا	طلا	پایدار
				۲۰۰۱

شکست کلی واژگونی-دایره‌ای ۲۰۰۹	سنگ آهک	اسپانیا	La Yesa دیواره شمال غربی	۶
پایدار ۲۰۰۹	سنگ آهک	اسپانیا	La Yesa دیواره جنوب شرقی	۷
شکست در مجموعه‌ای از پله‌ها ۱۹۹۹	مس	شیلی	Ujina (Collahuasi) دیواره غربی	۸
پایدار ۲۰۰۵	الماس	کانادا	Panda (Ekati) دیواره شمالی	۹
شکست گوه‌ای در مجموعه‌ای از پله‌ها ۲۰۰۱	مس	امریکا	Esperanza (Phelps-Dosge) دیواره شمالی	۱۰

جدول ۶-۷ نتایج مقایسه شرایط پایداری پیش‌بینی شده بر اساس مقادیر MSII و مشاهدات واقعی در منطقه را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر این است که به جز در یک مورد (شیب روباز شماره ۲)، پیش‌بینی‌های MSII به طور کامل منطبق با مشاهدات منطقه‌ای هستند، که قابلیت کاربرد روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

جدول ۶-۷- نتایج ارزیابی قابلیت کاربرد (اعتبارسنجی) شاخص MSII

شماره شیب (رخداد)	مقدار محاسبه شده MSII	رفتار پیش‌بینی شده	رفتار مشاهده شده
۱	۶۵/۰	شکست کلی	شکست کلی
۲	۵۷/۹	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	شکست کلی
۳	۶۸/۰	شکست کلی	شکست کلی
۴	۶۶/۹	شکست کلی	شکست کلی
۵	۴۴/۵	پایدار	پایدار
۶	۶۳/۱	شکست کلی	شکست کلی
۷	۳۹/۸	پایدار	پایدار
۸	۵۱/۲	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها
۹	۳۸/۱	پایدار	پایدار
۱۰	۵۵/۰	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها	شکست مجموعه‌ای از پله‌ها

۶-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به عنوان یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های تحقیق رساله، از طریق استفاده از یک بهبود بر رویکرد سیستمی، یک شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII) توسعه داده شد. برای این منظور ۱۸ پارامتر موثر بر سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز در دسته‌های مختلف انتخاب شده و با توجه به نقش آنها در ایجاد ناپایداری شیب طبقه‌بندی گردیدند. کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها به صورت برون‌ذات و بدون دخالت دادن قضاوت‌های ذهنی، از طریق تشکیل یک پایگاه داده‌های جامع از وضعیت پایداری و اطلاعات کامل شیب‌های معادن روباز از نقاط مختلف جهان و همچنین استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی (با ساخت یک شبکه با ساختار آینه‌ای) انجام شد. با تحلیل نمودارهای علت-اثر و شدت اندرکنش خروجی، پارامترهای "نوع سنگ"، "RQD"، "هوازگی" و "رژیم تکتونیکی" به عنوان با اهمیت‌ترین پارامترهای سیستم شناخته شدند. همچنین پارامترهای "نوع سنگ" و "رژیم تکتونیکی" مسلط‌ترین و "زاویه شیب کلی"، "ارتفاع پیت" و "ناپایداری‌های پیشین" به عنوان مغلوب‌ترین پارامترها در سیستم مورد نظر انتخاب شدند. برخی از این نتایج با نتایج به دست آمده از تحلیل احتمالاتی سیستم کلی پایداری شیب‌های سنگی ارائه شده در فصل گذشته (علیرغم عدم انطباق کامل پارامترهای در نظر گرفته شده) تطابق دارند. برای مثال، در سیستم یادشده پارامترهای "زمین‌شناسی و لیتولوژی" و "گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها" بیشترین احتمال تسلط بر سیستم را دارا بودند که مشابه پارامترهای "نوع سنگ" و "رژیم تکتونیکی" در سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز می‌باشند. همین‌طور در سیستم کلی فصل پنجم، پارامترهای "ناپایداری پیشین"، "خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها" و "زاویه شیب" از جمله محتمل‌ترین پارامترهای مغلوب سیستم به شمار می‌رفتند که پارامترهای مشابه در سیستم برون‌ذات اخیر نیز از این ویژگی برخوردارند. تفاوت‌هایی نیز میان دو سیستم در نظر گرفته شده با دو نوع متفاوت کدگذاری به چشم می‌خورد. به عنوان مثال در سیستم کلی احتمالاتی، پارامترهای "مقاومت سنگ

بکر"، "هوازدگی" و "شرایط هیدرولیکی" بیشترین احتمال را برای کمترین تعامل درون سیستم دارا هستند، در صورتی که در سیستم اخیر شیب‌های معادن روباز با کدگذاری غیرذهنی، این پارامترها از خصوصیت تعاملی بودن نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشند.

در نهایت پس از محاسبه شاخص برای تمام شیب‌های موجود در پایگاه داده‌های کدگذاری، سطوح خطر ناپایداری تعریف شده و شاخص پیشنهادی با استفاده از اطلاعات جدید (۱۰ مورد خارج از پایگاه داده‌های کدگذاری) مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج این اعتبارسنجی نشان داد که به جز در یک مورد، پیش‌بینی‌های MSII به طور کامل منطبق با مشاهدات منطقه‌ای (رفتار واقعی شیب‌ها) هستند. بدین ترتیب قابلیت کاربرد شاخص پیشنهادی در ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز تأیید گردید.

در انتها، برخی نکات مهم در ارتباط با کاربرد رویکرد سیستمی در تحقیق حاضر وجود دارد که در زیر به آنها اشاره می‌شود.

✓ با کدگذاری ماتریس اندرکنش بر پایه ANN، رویکرد از حالت ذهنی و تکیه بر نظرات کارشناس خارج شده و حالت برون‌ذات پیدا می‌کند. همچنین با این روش ماتریس اندرکنش از حالت استاتیکی خارج شده و به صورت یک سیستم پویا در می‌آید.

✓ در این تحقیق از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و نه قابلیت پیش‌بینی آنها استفاده شده است. در حقیقت با استفاده از این روش، اندرکنش‌های حقیقی (ذاتی)^۱ پارامترها در واقعیت و به صورت مشاهدات متعدد در شیب‌های معادن روباز (از طریق وزن‌های میان پیوندهای پارامترها در شبکه ساخته شده) به دست آمده و در توسعه شاخص ارزیابی پتانسیل ناپایداری مورد استفاده قرار گرفته است.

✓ شبکه مورد نظر از طریق حداقل کردن خطاها و با معماری بهینه ۱۸-۳۶-۳۶-۱۸ ساخته

^۱ Intrinsic interactions

شده است.

✓ ماتریس خروجی به سبب انتخاب رابطه توان نسبی تأثیر یکپارچه (GRSE)، وابسته به فضای ورودی نبوده (برخلاف رابطه توان نسبی تأثیر، RSE) و بنابراین قابل استفاده در تمام کاربردهای جدید از شیب‌های معادن روباز می‌باشد.

✓ ماتریس کدگذاری شده به طور کامل از خصوصیات ماتریس تمام مرتبط (FCM) غیرخطی ارائه شده توسط جیائو و هادسون (۱۹۹۵) برخوردار است. به عبارتی در این ماتریس تمام خط سیرهای میان پارامترها در نظر گرفته شده و تنها به ارتباط زوج پارامترها توجه نشده است.

✓ برخلاف پیچیدگی محاسباتی موجود در کدگذاری ماتریس اندرکنش بر پایه ANN، کاربرد روش کلی در یک منطقه جدید بسیار ساده بوده و تنها از وزن‌های تأثیر محاسبه شده برای پارامترها استفاده می‌شود.

✓ بدیهی است که نتایج به دست آمده در صورت افزایش تعداد رخدادهای ورودی و یا به عبارت دیگر در صورت به روز رسانی پایگاه داده‌ها از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار خواهند بود، بنابراین شاخص ارائه شده در واقع نگارش اول MSII به حساب می‌آید که قابلیت ارتقای آن در آینده وجود دارد.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری

امروزه معادن روباز بزرگ در حال طراحی و استخراج تا عمق‌های بیشتر از ۱۰۰۰ متر هستند. چنین روند افزایشی در مقیاس این پروژه‌ها باعث می‌شود که روش‌های متداول تحلیل پایداری شیب‌ها بیش از پیش در پیش‌بینی و ارزیابی رفتار ژئومکانیکی دیواره‌های معادن روباز ناتوان باشند. این امر در اصل به علت وجود پارامترهای متعدد کنترل‌کننده پایداری این شیب‌های بزرگ مقیاس می‌باشند و این در حالی است که روش‌های معمول اغلب تنها قادر به در نظر گرفتن مکانیزم‌های ساده شکست مانند شکست صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی و دایره‌ای هستند. از طرفی اندرکنش‌های میان این پارامترها سبب به وجود آمدن مکانیزم‌های پیچیده شکست دربرگیرنده هر دو نوع مکانیزم‌های با کنترل ساختاری و بدون کنترل ساختاری (و گاه با مکانیزم ناشناخته) می‌گردند. برای غلبه بر این مشکل و به منظور در نظر گرفتن تمام پارامترهای موثر و به ویژه اندرکنش‌های میان آنها، در این تحقیق یک رویکرد سیستمی معروف بنام رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد توجه قرار گرفت. رویکرد مذکور در سال‌های اخیر در مسائل پیچیده مختلف مهندسی و از آن جمله در تحلیل پایداری شیب‌های طبیعی کاربرد قابل توجهی یافته است. با این حال در اکثر این کاربردها از روش کدگذاری سنتی ماتریس اندرکنش پارامترها استفاده شده است، که این روش قادر به تشریح درست اندرکنش‌ها نبوده و کاملاً جنبه ذهنی و تخمینی دارد. تلاش‌هایی نیز در جهت بهبود رویکرد و تلفیق آن با سایر نظریه‌ها انجام شده است که در عمل کاربرد مهم و چشمگیری از آنها مشاهده نشده است.

روش تحقیق رساله حاضر به سه بخش اصلی تقسیم‌بندی شد. در مرحله اول، از رویکرد RES متداول برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی کنار جاده‌ای در یک منطقه انتخاب شده استفاده گردید. هدف از این کار اعمال رویکرد RES با کدگذاری مرسوم ESQ بر یک مسئله کلی پایداری شیب‌های سنگی و تحلیل خروجی‌های رویکرد سیستمی به منظور مشاهده نتایج این رویکرد بوده است. نتایج این رویکرد با نتایج روش تجربی SMR در همان منطقه مقایسه شد که این مقایسه حاکی از تطبیق نسبتاً خوب نتایج دو روش در رده‌بندی پایداری شیب‌های سنگی مهندسی شده بود. شایان ذکر است هر چند مقایسه نتایج RES سنتی (متداول) با نتایج به دست آمده از یک روش تجربی معروف (SMR) نشان از تطبیق نسبتاً خوب میان آن دو (و مطابقت بهتر RES نسبت به SMR از نظر مشاهدات منطقه‌ای) داشت، با این حال نیاز به بهبود رویکرد کماکان به دلیل ذهنی بودن کدگذاری‌ها، تغییرپذیری بالای آن و در نتیجه تأثیر زیاد سلیقه‌ای بودن این مرحله بر نتایج نهایی احساس می‌شد.

در مرحله بعد، به عنوان یک ایده جدید و یک بهبود کلی در رویکرد RES، یک روش کدگذاری احتمالاتی (PESQ) ماتریس اندرکنش ارائه شد که طی آن با اختصاص احتمال‌های متفاوت به مقادیر مختلف کدهای اندرکنش ماتریس، فرآیند کدگذاری از حالت قطعی خارج شده و بدین ترتیب تمام مراحل رویکرد و در نتیجه کل سیستم به صورت احتمالاتی در آمد. در این مرحله از تحقیق نشان داده شد که می‌توان با استفاده از روش نیمه‌عددی خبره احتمالاتی (PESQ) عدم قطعیت‌ها را در کدگذاری‌ها در نظر گرفت و نیز روش احتمالاتی پیشنهادی این اجازه را می‌دهد که پارامترهایی با بیشترین احتمال مسلط یا مغلوب بودن و یا با بیشترین احتمال تعاملی شناسایی گردند. برای نشان دادن نحوه کاربرد روش پیشنهادی جدید، یک سیستم کلی شیب‌های سنگی با ۱۰ پارامتر موثر بر پایداری آن در نظر گرفته شده و رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ در چهارچوب احتمالاتی بکار گرفته شد. نتایج نشان داد که انتظار می‌رود پارامتر مربوط به وجود "ناپایداری پیشین" محتملاً بیشترین اندرکنش را در سیستم فرضی مورد نظر داشته و به عبارت دیگر مهمترین پارامتر سیستم باشد. همین طور "زمین‌شناسی و لیتولوژی" و "خصوصیات مکانیکی ناپیوستگی‌ها" نیز با احتمال

بالایی به عنوان پارامترهای مهم شناسایی شدند. علاوه بر این، رویکرد RES احتمالاتی این اجازه را می‌دهد که عدم قطعیت‌ها یا تغییرپذیری‌های نتایج به دست آمده محاسبه گردند. در مثال ارائه شده، پارامتر "ناپایداری پیشین" در مقایسه با سایر پارامترها از بیشترین انحراف از معیار (و بنابراین بیشترین عدم قطعیت) برخوردار بوده است. این تحلیل‌ها را می‌توان در مورد تسلط پارامترهای سیستم نیز ارائه نمود. قابل ذکر است که دسترسی به چنین اطلاعاتی با بکارگیری رویکرد قطعی و/یا مقادیر میانگین امکان‌پذیر نبوده است. این مثال ارزش بالای روش احتمالاتی جدید را به خوبی نشان داد.

روش PESQ پیشنهادی در واقع بهبودی بر روش کدگذاری توسط کارشناس بوده و رویکرد را از حالت ذهنی خارج نمی‌کند، بلکه حالت ذهنی را تعمیم داده و به وارد نمودن بهترین تخمین‌های احتمالی از ارتباط پارامترها به تحلیل‌ها و در نتیجه کاهش خطاها کمک می‌کند (بایستی گفت که این امر نیاز به قدری تسلط بیشتر بر مسئله مورد نظر و یا استفاده از نظرات چندین کارشناس دارد).

در مرحله سوم و به عنوان یکی از اصلی‌ترین قسمت‌های تحقیق رساله، از طریق استفاده از یک بهبود قبلی بر رویکرد سیستمی شامل استفاده از شبکه‌های عصبی در کدگذاری غیرذهنی ماتریس اندرکنش، یک شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII) توسعه داده شد. برای این منظور ۱۸ پارامتر موثر بر سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز در ۹ دسته مختلف انتخاب شده و طبقه‌بندی آنها با توجه به نقش هر پارامتر در ایجاد ناپایداری شیب انجام گردید. در این طبقه‌بندی‌ها علاوه بر مرور مطالعات گذشته، مقیاس متفاوت پروژه‌های معادن روباز نیز در نظر گرفته شد. کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها به صورت برون‌ذات و از طریق تشکیل یک پایگاه داده‌های جامع از وضعیت پایداری و اطلاعات کامل شیب‌های معادن روباز از نقاط مختلف جهان و استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی (و نه قابلیت پیش‌بینی آنها) همراه با اعمال بهینه‌سازی‌هایی در معماری شبکه انجام گردید. با تحلیل نمودارهای علت-اثر و شدت اندرکنش خروجی، مهمترین پارامترهای

سیستم شناخته شدند. همچنین مسلط‌ترین و مغلوب‌ترین پارامترها در سیستم پایداری شیب معادن روباز نیز انتخاب شدند. با مقایسه این نتایج با خروجی‌های سیستم کلی پایداری شیب‌ها در RES احتمالاتی (مرحله قبل)، انطباق قابل قبولی در شناسایی پارامترهایی مغلوب و مسلط بر سیستم مشاهده گردید.

در نهایت پس از محاسبه شاخص برای تمام شیب‌های موجود در پایگاه داده‌های آموزش شبکه، سطوح خطر ناپایداری تعریف شده و شاخص پیشنهادی با استفاده از اطلاعات جدید (۱۰ مورد خارج از پایگاه داده‌های آموزش) مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج این اعتبارسنجی نشان داد که به جز در یک مورد، پیش‌بینی‌های MSII به طور کامل منطبق با مشاهدات منطقه‌ای (رفتار واقعی شیب‌ها) هستند. بدین ترتیب قابلیت کاربرد و اعتبار شاخص پیشنهادی در ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز تأیید گردید.

در حقیقت با تغییر شیوه کدگذاری و استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی که در آن از وزن‌های به وجود آمده در پیوندهای میان پارامترها برای بیان میزان اثرات متقابل استفاده می‌شود، رویکرد از حالت ذهنی (تخمینی) خارج شده و ماتریس کدگذاری شده از خصوصیات کامل یک سیستم تمام مرتبط برخوردار شد. استفاده از این مزیت برجسته در کدگذاری ماتریس اندرکنش سیستم پایداری شیب‌های معادن روباز با ساخت یک پایگاه داده‌ای نسبتاً جامع از وضعیت پایداری‌ها و اطلاعات شیب‌های معادن روباز از نقاط مختلف جهان این اجازه را داد که یک شاخص معتبر برای این منظور توسعه داده شود. این شاخص در اعتبارسنجی‌ها با استفاده از مشاهدات واقعی (با تنوع شرایط بالا) صحت بالایی را از خود نشان داد. با این تفاسیر انتظار می‌رود که این شاخص در کاربردهای دیگر نیز قادر باشد پیش‌بینی‌های درستی را از ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های معادن روباز ارائه نماید. این امر در صورت در نظر گرفتن پیچیدگی بالای مکانیزم‌های شکست در شیب‌های بزرگ مقیاس و نیز سادگی کاربرد شاخص ارائه شده، ارزش بالای رویکرد بهبودیافته را بیش از پیش

نمایان می‌سازد.

۲-۷- پیشنهادات برای تحقیقات آتی

در این رساله تلاش شد که طرح تحقیق پیشنهادی به بهترین نحو در زمان مورد نظر اجرا گردد. با این وجود همواره مسیر برای تحقیقات آتی باز بوده و در صورت صرف زمان بیشتر در آینده می‌توان در جهت بهبود بیشتر روش‌ها و همچنین توسعه ایده‌های جدیدتر حرکت نمود. در زیر برخی از مهمترین پیشنهادات بدین منظور ارائه می‌گردد.

✓ در این رساله با تمرکز بر بهبود رویکرد RES، روش کدگذاری احتمالاتی ارائه شده (PESQ) تنها در یک سیستم کلی پایداری شیب‌های سنگی استفاده شده و این روش تنها به منظور تحلیل اهمیت، تعامل، تسلط و غلبه پارامترهای سیستم بکار گرفته شد. نتایج این تحلیل‌ها نیز صرفاً برای مقایسه با نتایج سیستم توسعه داده شده برون‌ذات پایداری شیب‌های معادن روباز در مرحله بعدی تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. به طور قطع استفاده از این روش در کاربردهای واقعی و به دست آوردن نتایج نهایی احتمالاتی مانند یک شاخص احتمالاتی (هر چند ذهنی و غیر برون‌ذات) می‌تواند ارزشمند باشد.

✓ تلفیق روش کدگذاری احتمالاتی با رویکرد استفاده از قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی می‌تواند در صورت در دسترس بودن اطلاعات احتمالاتی پارامترها و تشکیل یک پایگاه داده‌های احتمالی قابل انجام باشد. در این صورت، شاخص نهایی نیز جنبه احتمالاتی به خود خواهد گرفت. ایده دیگر می‌تواند بکارگیری منطق فازی^۱ در فرآیند کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها و تلفیق آن با سایر مراحل رویکرد باشد.

✓ در این رساله برای تعیین سطوح خطر ناپایداری پس از ارائه شاخص و محاسبه مقادیر MSII

^۱ Fuzzy logic

برای تمام شیب‌های موجود در پایگاه داده‌ها، از تخمین‌های محافظه‌کارانه استفاده شد (شکل ۶-۹). ایده جدیدتر، بکارگیری طبقه‌بندی‌کننده‌های خطی^۱ برای این منظور است که به طور حتم در صورت کاربرد، نتایج دقیق‌تری حاصل خواهد شد.

✓ با وجود نتایج بسیار مطلوب اعتبارسنجی شاخص پیشنهادی که نشان از صحت بالای پیش‌بینی‌ها دارد، شاخص ارائه شده در واقع نگارش اول MSII به حساب می‌آید و بدیهی است که نتایج به دست آمده در صورت افزایش تعداد رخداد‌های ورودی و یا به عبارت دیگر در صورت به روز رسانی پایگاه داده‌ها از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار خواهند بود. بنابراین به عنوان یکی از موارد اصلی، انتظار می‌رود که قابلیت کاربرد و صحت نتایج در نگارش‌های به روز شده آینده از کیفیت بالاتری برخوردار باشند.

¹ Linear Classifiers

فهرست منابع

آزادخواه ا.، پورکرمانی م.، رادفر ش. (۱۳۸۸). لرزه زمین ساخت منطقه معدنی سنگ آهن گل گهر سیرجان. فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۵، شماره ۳، ص. ۱۹۳-۲۰۵.

اداره کل آمار و فناوری اطلاعات (۱۳۸۵). سالنامه آماری هواشناسی. انتشارات سازمان هواشناسی ایران.

افشاریان ا.، نعیمی ی.، عطائی م. (۱۳۸۷). تحلیل پایداری نهایی دیواره شمال باختری معدن چادرملو با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی. فصلنامه علوم زمین، بهار ۸۷، سال هفدهم، شماره ۶۷، ص. ۱۷۲-۱۸۱.

امینی ا.، یاراحمدی بافقی ع. (۱۳۸۶). مدل‌سازی سه بعدی هندسی- ژئوتکنیکی توده سنگ‌های درزه‌دار به روش آماری (مطالعه موردی: بلوک تکتونیک II معدن چغارت). مجموعه مقالات سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

ایتوک ایران، شرکت مهندسی (۱۳۸۷). گزارش مکانیک سنگ معدن انگوران - فاز نهایی.

بوستان زر ح.، شهریار ک.، ترابی س.، محمدی ح. (۱۳۸۹ الف). برآورد تجربی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های معدن شماره ۱ گل گهر. مجموعه مقالات اولین همایش ملی سازه، زلزله، ژئوتکنیک، بابلسر، ایران.

بوستان زر ح.، شهریار ک.، ترابی س.، ستاری ق.، محمدی ح. (۱۳۸۹ ب). تحلیل پایداری دیواره نهایی معدن گل گهر با استفاده از طبقه‌بندی امتیاز توده شیب (SMR). مجموعه مقالات بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، تهران، ایران.

پارسایی م. (۱۳۸۶). تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی توده سنگ با مدل‌سازی عددی - مطالعه موردی در معدن مس سونگون، ایران. رساله دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

تهران، ایران.

پارسایی م.، شهریار ک.، شریف زاده م.، معارف وند پ. (۱۳۸۷). مقایسه و تحلیل نتایج حاصل از درزه‌نگاری در معادن مس پورفیری سرچشمه و سونگون، ایران. *نشریه /میرکبیر*، سال نوزدهم، شماره ۶۵-ج، ص. ۱۷-۲۶.

جعفری ا.، غلام نژاد ج. (۱۳۸۵). تعیین شیب پایدار دیواره‌های معدن سنگ آهن چادرملو با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی. *فصلنامه /میرکبیر*، سال نوزدهم، شماره ج-۶۵، ص. ۸۵-۹۴.

داربر م.، معارف وند پ.، جلالی فر ح. (۱۳۸۹). طراحی نرم افزار تعیین مستقیم نگهداری مورد نیاز به منظور جلوگیری از شکست صفحه ای در مناطق ناپایدار، مطالعه موردی معدن سرب و روی انگوران زنجان. *چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران*، تهران.

روشن قلب م.، شهریار ک.، معارف وند پ. (۱۳۸۶). بررسی رفتار دیواره شمال غربی پیت معدن انگوران و تأثیر اجرای عملیات رفتار سنجی در پیشگیری از وقوع حوادث و تلفات جانی و خسارات مالی. *مجموعه مقالات هفتمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط زیست در معادن و صنایع معدنی*، مجتمع مس سرچشمه، کرمان، ایران.

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

شهریار ک.، غلام نژاد ج.، صمیمی نمین ف. (۱۳۸۶). تحلیل پایداری دیواره نهایی معدن شماره یک سنگ آهن گل گهر سیرجان. *مجموعه مقالات سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

عباس زاده م. (۱۳۸۵). *تحلیل پایداری شیب معادن روباز با استفاده از روش‌های احتمالاتی - مطالعه موردی معدن سونگون*. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

عباس زاده م.، شهریار ک.، شریف زاده م.، حیدری م. (۱۳۸۶). طبقه بندی و تعیین عدم قطعیت‌های خصوصیات ذاتی توده سنگ معدن مس سونگون. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد دوم، شماره ۲، ص. ۳۷۷-۳۹۴.

قائمی م.، صادق زاده م.، فاتحی م. (۱۳۸۹). بررسی تأثیر فاصله‌داری ناپیوستگی بر رفتار دینامیکی و استاتیکی محیط سنگی (مطالعه موردی بلوک شماره یک معدن چغارت). مجموعه مقالات اولین همایش ملی سازه، زلزله، ژئوتکنیک، بابلسر، ایران.

قاضی زاده ح. (۱۳۸۷). مطالعه رفتار شکست در پشت شیب شمالی پیت معدن انگوران و پیشنهادات برای حل مشکل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران ایران.

کاکایی ر.، زارع نقدهی م. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی پایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌ییلاق با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES). گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کانی کاوان شرق، شرکت مهندسی (۱۳۸۸ الف). گزارش تحلیل پایداری شیب و ابزاربندی دیواره جنوبی (محدوده‌های ژئوتکنیکی ۲ و ۳) معدن سنگ آهن چادرملو.

کانی کاوان شرق، شرکت مهندسی (۱۳۸۸ ب). گزارش مطالعات دیواره‌های نهایی معدن سنگ آهن چادرملو (فاز ۱ و ۲).

کاوشگران، مهندسین مشاور (۱۳۸۷ الف). گزارش مطالعه ژئوتکنیکی و تحلیل پایداری دیواره‌های نهایی معدن چغارت.

کاوشگران، مهندسین مشاور (۱۳۸۷ ب). گزارش تحلیل گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی معدن چغارت و مدل تنش‌های برجا جهت تحلیل پایداری دیواره‌ها.

- کاوشگران، مهندسین مشاور (۱۳۸۷ج). گزارش فاز نهایی پایداری دیواره‌های معدن مس سونگون.
- کاوشگران، مهندسین مشاور (۱۳۸۸). بهینه‌سازی و اصلاح هندسی دیواره‌های جنوبی و جنوب شرقی معدن چغارت با نگرش ویژه به مسئله پایداری دیواره‌ها. مجموعه مقالات سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، یزد، ایران.
- کرمپورراد ح.، یاراحمدی بافقی ع. (۱۳۸۷). بررسی وابستگی فضایی پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها (مطالعه موردی: بلوک تکتونیکی I معدن چغارت). مجموعه مقالات دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران. دانشگاه تهران، ایران.
- کوشا معدن، شرکت مهندسین مشاور (۱۳۸۹). گزارش مطالعات پایداری شیب معدن گل گهر سیرجان.
- مقصودی م.، قرشی م.، شیوایی ع. (۱۳۸۹). بررسی تکتونیکی معدن سنگ آهن چغارت و اهمیت آن در مطالعات اکتشافی و استخراجی معدن. نخستین گردهمایی و همایش ملی بررسی دستاوردهای پژوهشگران علوم زمین ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.
- معدن سرچشمه، بخش زمین‌شناسی (۱۳۸۳). گزارش زمین‌شناسی معدن سرچشمه. مجتمع مس سرچشمه، امور معدن.
- معدن سرچشمه، واحد تحقیقات معدنی (۱۳۸۸). گزارش تحلیل پایداری دیواره‌های معدن مس سرچشمه. مجتمع مس سرچشمه، امور معدن.
- موسوی م.، یاراحمدی بافقی ع.، بخشی ح. (۱۳۸۸). تحلیل پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی. نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۳، شماره ۳، ص. ۳۱۱-۳۲۳.
- مؤسسه جغرافیایی ایران (۱۳۸۰). اطلس راه‌های ایران. مؤسسه جغرافیایی، کارتوگرافی و گیتاشناسی.

نیکروان م.، کارگران م. (۱۳۸۷). انفجار کنترل شده دیواره نهایی معدن چادرملو. مجموعه مقالات دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران. دانشگاه تهران، ایران.

Alejano L.R., Stockhausen H.W., Alonso E., Bastante F.G., Ramirez Oyanguren P. (2008). ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45(8):1252-1272.

Alejano L.R., Gómez-Márquez I., Martínez-Alegría R. (2010). Analysis of a complex toppling-circular slope failure. *Engineering Geology* 114:93-104.

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):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):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.

Astudillo N., Roperch P., Townley B., Arriagada C. (2005). A paleomagnetic study within the Chuquicamata porphyry copper deposits, Central Andes, Chile. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Andean Geodynamics*, Barcelona, Spain, pp. 68-71.

Avila R., Moberg L. (1999). A systematic approach to the migration of ¹³⁷Cs in forest ecosystems using interaction matrices. *Environmental Radioactivity* 45:271-282.

Bandis S., Lumsden A.C., Barton N.R. (1981). Experimental studies of scale effects on

the shear behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 18:1-21.

Barnett W.P., Guest A., Terbrugge P., Walker D. (2001). Probabilistic pit slope design in the Limpopo metamorphic rocks at Venetia Mine. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 101(8):381-392.

Barnett W.P. (2003). Geological control on slope failure mechanisms in the open pit at the Venetia Mine. *South African Journal of Geology* 106:149-164.

Barton N.R. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology* 7:287-322.

Barton Jr. J.M., Barnett W.P., Barton E.S., Barnett M., Doorgapershad A., Twigg C., Klemm R., Martin J., Mellonig L., Zenglein R. (2003). The geology of the area surrounding the Venetia kimberlite pipes, Limpopo Belt, South Africa: A complex interplay of nappe tectonics and granitoid magmatism. *South African Journal of Geology* 106:109-128.

Bayer A.K., Winkel R.M. (2004). Come to where the copper is- Modern ore mining in Chile (Field Trip Report). *World of Mining: Surface & Underground* 56(5):380-383.

Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. (2011). *Neural Network Toolbox™ 7 User's Guide*. Natick, MA: The MathWorks.

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):987-999.

Bendz D., Flyhammer P., Hartlen J., Elert M. (2005). Leaching from residues used in road constructions- a system analysis. In: *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.

Bettles K. (2002). Exploration and Geology, 1962 to 2002, at the Goldstrike Property,

Carlin Trend, Nevada. In: *Integrated Methods for Discovery: Global Exploration in the Twenty-First Century*, Society of Economic Geologists Special Publication Number 9, April 2002, pp. 275-298.

BHP Billiton (2005). EKATI Diamond Mine- Reclamation and Closure. In: *Mine Reclamation and Closure Workshop*, February 1-3, 2005, Yellowknife, NWT, Canada. (<http://www.monitoringagency.net>)

BHP Billiton (2010). *Panda diversion channel stabilization, Ekati Diamond Mine*. Design Report, BHP Billiton Canada Inc., Yellowknife, NWT, Canada. (<http://www.mvlwb.ca>)

Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York, 251 p.

Bisso C.B., Duran M., Gonzales A.A. (1998). Geology of the Ujina and Rosario copper porphyry deposits Collahuasi district, Chile. In: *Porter T.M. (ed.), Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits: A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide, pp. 217-232.

Brown E.T. (2004). Geomechanics: The critical engineering discipline for mass mining. In: *Karzulovic A., Alfaro M. (eds.), Massmin 2004*, Santiago, Chile: Chilean Engineering Institute, pp. 21-36.

Budetta P., Santo A., Vivencio F. (2008). Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology* 94:340-352.

Bye A.R. (2000). The application of geotechnical information to drill and blast operations at Sandsloot open pit. In: *Proceedings of the Bulk Mining Explosives Annual Conference*, Pretoria, South Africa.

Bye A.R., Bell F.G. (2001a). Geological applications in open pit mining. *Geotechnical and Geotechnical Engineering* 19:97-117.

Bye A.R., Bell F.G. (2001b). Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit, South Africa. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*

38:449-466.

Bye A.R. (2005). Sandsloot open-pit applies 3-D geotechnical modelling. *Engineering & Mining Journal*, July/August 2005:44-50.

Bye A.R. (2006). The strategic and tactical value of a 3D geotechnical model for mining optimization, Anglo Platinum, Sandsloot open pit. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 106:97-104.

Calcaterra D., Parise M. (2010). *Weathering as a predisposing factor to slope movements*. The Geological Society, London, 248 p.

Call R.D., Nicholas D.E. (1978). Prediction of step-path failure geometry for slope stability analysis. In: *Kim Y.S. (ed.) Proceedings of the 19th US Symposium on rock mechanics*, Stateline, NV, Reno, NV: University of Nevada-Reno.

Call R.D. (1982). Monitoring pit slope behavior. In: *Proceedings of the 3rd 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, 2nd 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 21st Century*, Kingston, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 45-56.

Camus J.P., Jarpa S.G. (1996). Long Range Planning at Chuquicamata Mine. In: *Proceedings of the 26th International APCOM Symposium*, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, pp 237-241.

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 Apennines, Italy. *Journal of Geodynamics* 26(2-4):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):375-385.

Chen Z.Y. (1995a). Recent developments in slope stability analysis. In: *Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics*, Vol. 3, Tokyo, Japan, pp. 1041-1048.

Chen Z.Y. (1995b). *Transactions of the stability analysis and software for steep slopes in China*. Vol. 3.1.: Rock classification, statistics of database of failed and natural slopes. China Institute of Water Resources and Hydroelectric Power Research.

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:B139-B147.

Condor J., Asghari K. (2009). An Alternative Theoretical Methodology for Monitoring the Risks of CO₂ Leakage from Wellbores. *Energy Procedia* 1:2599-2605.

da Franca P.R. (1997). *Analysis of slope stability using limit equilibrium and numerical methods with case examples from Aguas Claras Mine, Brasil*. MSc Thesis, Queen's University, Ontario, Canada, 203 p.

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* 97:451-466.

Deere D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J. (1967). Design of surface and near surface construction in rock. In: *Failure and Breakage of Rock*, Fairhurst C. (ed.), *Proceedings of the 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, New York: Society of

Mining Engineers, American Institute of Mining & Metallurgy, Petroleum Engineers, pp. 237-302.

Deere D.U., Deere D.W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In: *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, Kirkaldie L. (ed.), ASTM Special Publication 984, Philadelphia: American Society for Test & Materials, pp. 91-101.

Den J. (1982). Control problem of grey system. *System and Control Letters* 1(5):228-294.

Dreisner D., Coyner A. (2008). *Major Mines of Nevada 2007- Mineral Industries in Nevada's Economy*. Special Publication P-19, Nevada Bureau of Mines and Geology, Nevada, Reno, 28 p.

Dreyfus G. (2005). *Neural Networks: Methodology and Applications*. Springer-Verlag, Berlin.

Duran A., Douglas K. (1999). Do slopes designed with empirical rock mass strength criteria stand up? In: *Vouille G., Berest P. (eds.), Proceedings of the 9th International Congress on Rock Mechanics, Paris*, Rotterdam: Balkema, pp. 87-90.

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.

Einstein H.H., Veneziano D., Baecher G.B., O'Reilly K.J., (1983). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 20:227-236.

El-Ramly H., Morgenstern N.R., Cruden D.M. (2002). Probabilistic slope stability analysis for practice. *Canadian Geotechnical Journal* 39:665-683.

Ferentinou M., Sakellariou M. (2007). Computational intelligence tools for the prediction of slope performance. *Computers and Geotechnics* 34:362-384.

Ferentinou M., Hasiotis T., Sakellariou M.G. (2010). Clustering of Geotechnical

Properties of Marine Sediments Through Self-Organizing Maps: An Example from the Zakynthos Canyon-Valley System, Greece. *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 28(I):43-54.

Ferentinou M., Hasiotis T., Sakellariou M. (2011). Application of computational intelligence tools for the analysis of marine geotechnical properties in the head of Zakynthos canyon, Greece. *Computers & Geosciences*, DOI 10.1016/j.cageo.2011.06.022.

Flores G., Karzulovic A. (2000). The role of the geotechnical group in an open-pit: Chuquicamata mine, Chile. Slope In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 141-152.

Franz J., Cai Y., Hebblewhite B. (2007). Numerical modelling of composite large scale rock slope failure mechanisms dominated by major geological structures. In: *Ribeiro L., Sousa E., Olalla C., Grossmann N. (eds.) Proceedings of the 11th ISRM Congress*, Lisbon, Portugal, Taylor & Francis Group: London, UK, pp. 633-636.

Franz J., Cai Y. (2008). Investigation of slope failure mechanisms caused by discontinuous large scale geological structures at the Cadia Hill Open Pit. In: *Chen Z.Y. (ed.) Landslides and Engineered Slopes. From the Past to the Future: Proceedings of the 10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, Xian, China, Taylor & Francis Group: London, UK, 6 p.

Franz J. (2009). *An investigation of combined failure mechanisms in large scale open pit slopes*. PhD Thesis, School of Mining Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 470 p.

Fuentes S., Adam E. (2008). Chuquicamata underground mine- project status update. In: *Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining*, Luleå, Sweden, pp. 461-470.

Gallagher M.S., Kear R.M. (2001). Split shell open pit design concept applied at De Beers Venetia Mine South Africa using the Whittle and Gemcom software. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 101(8):401-408.

Giani G.P. (1992). *Rock slope stability analysis*. Taylor & Francis. Rotterdam, Balkema.

Goodman R.E., Bray J. (1976). Toppling of rock slopes. In: *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, Vol. 2, ASCE: Boulder, CO, pp. 201-234.

Goodman R.E., Shi G. (1985). *Block Theory and its application to rock engineering*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.

Grandchamp C.A.P., Sperling E.V., Almeida D.C.D. (2001). Aguas Claras Mine- A successful dewatering story. In: *Proceedings of IMWA Symposium*, Belo Horizonte, Brasil. pp. 1-8.

Hack R., Price D., Rengers N. (2003). A new approach to rock slope stability-a probability classification (SSPC). *Bulletin of Engineering Geology and Environment* 62:167-184.

Hagan T.N., Bulow B. (2000). Blast designs to protect pit walls. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 125-130.

Haines A. (1993). Rock slope classification for the optimal design of monitoring networks. In: *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining*, Kalgoorlie, Rotterdam: Balkema, pp. 201-209.

Hall J., Storey D. (2003). *Cadia Valley Operations pit dewatering and depressurisation review*. Internal report to Newcrest Mining Limited, Aquaterra Consultants, 8 p.

Haykin S. (2008). *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd Edition, Prentice Hall, 906 p.

Hecht-Nielson R. (1990). *Neurocomputing*. Addison-Welsey, Reading, Massachusetts, 433 p.

Hecht-Nielson R. (1989). Theory of the backpropagation neural network. In:

Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks I. IEEE Press, New York, pp. 593-611.

Hewson S., Cai Y., Li T. (2003). Geotechnical investigations at Cadia Hill. In: *Hebblewhite B.K. (ed.) Ground control in mining technology and practice: Proceedings of the First Australian Ground Control in Mining Conference*, Sydney, Australia: The University of New South Wales, pp. 193-197.

Hill J.D., Warfield J.N. (1972). Unified program planning. In: *Sage A.P. (ed.) System Engineering: Methodology and Applications*, IEEE Press, New York, NY.

Hoek E., Bray J.W. (1981). *Rock slope engineering*. 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 p.

Hoek E., Read J., Karzulovic A., Chen Z.Y. (2000a). Rock slopes in civil and mining engineering. In: *GeoEng2000, Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, Melbourne, Australia, Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing, 16p.

Hoek E., Rippere K.H., Stacey P.F. (2000b). Large scale slope design- a review of the state of the art. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 3-10.

Hudson J.A. (1992a). *Rock Engineering Systems, Theory and Practice*. Ellis Horwood Ltd, Chichester, 185 p.

Hudson J.A. (1992b). Atlas of rock engineering mechanisms: Part 2- Slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 29(2):157-159.

Hudson J.A., Harrison J.P. (1992). A new approach to studying complete rock engineering problems. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 25:93-105.

Hudson J.A., Sheng J., Arnold P.N. (1992). Rock engineering risk assessment through critical mechanism and parameters evaluation. In: *Proceedings of the 6th 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.

Huisman J. (2011). Ekati Diamond Mine. In: *Slope Stability 2011, Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Vancouver, Canada.

Hustrulid W.A. (1999). *Blasting principles for open-pit mining. Vol. 2.- Theoretical foundations*. Balkema, Rotterdam.

Hustrulid W.A., McCarter M.K., Van Zyl D.J.A. (2000). *Slope Stability in Surface Mining*. Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), Littleton, Colorado.

ISRM (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: 1974-2006. In: *Ulusay R., Hudson J.A. (eds.) Suggested methods prepared by the commission testing methods*, ISRM Turkish National Group, Turkey; 628 p.

Jhanwar J.C. (2012). A Classification System for the Slope Stability Assessment of Opencast Coal Mines in Central India. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, In Press; DOI 10.1007/s00603-012-0223-4.

Jiao Y. (1995). *Formalizing the systems approach to rock engineering*. PhD Thesis, Imperial College, University of London, 326 p.

Jiao Y., Hudson J.A. (1995). The fully-coupled model for rock engineering systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 32(5):491-512.

Jimenez R., Sitar N. (2006). A spectral method for clustering of rock discontinuity sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(7):1052-1061.

Jimenez-Rodriguez R., Sitar N., Chacon J. (2006). System Reliability Approach to Rock Slope Stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(6):847-859.

Jimenez-Rodriguez R., Sitar N. (2007). Rock Wedge Stability Analysis Using System Reliability Methods. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 40(4):419-427.

Jimenez R. (2008). Fuzzy spectral clustering for identification of rock discontinuity sets. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 41(6):929-939.

Jimenez-Rodriguez R., Sitar N. (2008). Influence of Stochastic Discontinuity Network Parameters on the Formation of Removable Blocks in Rock Slopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 41(4):563-585

Jooste M.A., Cawood F.T. (2006). Survey slope stability monitoring: lessons from Venetia diamond mine. In: *Proceedings of the International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering Situations*, Cape Town, pp. 361-374.

Kamkar-Rouhani A., Hojat A. (2004). Determination of groundwater and geological factors using geoelectrical methods to design a suitable drainage system in Gol-e-Gohar iron ore mine, Iran. In: *Jarvis A.P., Dudgeon B.A., Younger P.L. (eds.) Mine Water 2004, Proceedings of the International Mine Water Association Symposium (IMWA 2004)*, University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, pp. 219-224.

Karzulovic A. (2005). *Cadia Pit Geotechnical Review*. Internal Report to Newcrest Mining Limited, A. Karzulovic & Asoc. Ltda.

Karzulovic A. (2006). *Fundamentals of Geomechanics*. Lecture Notes, Universidad de los andes. [In Spanish]

Klein C., Ladeira E.A. (2000). Geochemistry and Petrology of Some Proterozoic Banded Iron-Formations of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology* 95:405-428.

Kliche C. (1999). *Rock slope stability*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc (SME), The United States, 253 p.

Koukis G., Rozos D., Hatzinakos I. (1997). Relationship between rainfall and landslides in the formations of Achaia County, Greece. In: *Proceedings of International Symposium of IAEG in Engineering Geology and the Environment*, AA Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 793-798

Kozyrev A.A., Reshetnyak S.P., Maltsev V.A., Rybin V.V. (2000). Analysis of stability

loss in open-pit slopes and assessment principles for hard, tectonically stressed rock masses. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 251-256.

Kulatilake P.H.S.W., Um J., Morin B. (2002). A case study on open pit mine rock slope stability. In: *Proceedings of the International Coastal Geotechnical Engineering Conference*, Atyrau, Kazakhstan, pp. 53-62.

Kulatilake P.H.S.W., Um J., Morin B. (2003). Investigation of slope stability for a section of Phelps-Dodge Sierrita Open Pit Mine. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration* 314:177-182.

Kulatilake P.H.S.W., Um J., Morin B. (2004). A case study on open pit mine rock slope stability. In: *Proceedings of Ohio River Valley Soils Seminar*, Louisville, Kentucky, 10 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* 36:41-55.

Laubscher D.H. (1990). A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of South African Inst. Mining and Metallurgy* 90(10):257-273.

Li T., Hewson S., Pothitos F. (2003). Design and optimisation of Cadia Hill Open Pit, Cadia Valley Operations, Newcrest Mining Limited. In: *Workman-Davis C., Chanda E. Proceedings of the 5th Large Open Pit Conference*, Kalgoorlie, WA, AusIMM, pp. 123-126.

Li T. (2005). Geotechnical Engineering at Newcrest Mining. *Australian Center for Geomechanics Newsletter*, Vol. 25.

Lilly P.A. (2002). Open Pit Mine Slope Engineering: a 2002 perspective. In: *150 years of mining, Proceedings of the AusIMM Annual Conference*, Auckland, New Zealand.

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.
- Lima H.M., Wathern P., Franca P.R. (2000). Aguas Claras Mine Closure Liability Assessment. In: *Mine Closure in Iberoamericans, Module VII Mine Closure: Case Studies*, CYTED/IMAAC/UNIDO, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 270-279.
- Lindsay D.D. (1998). *Structural control and anisotropy of mineralization in the Chuquicamata porphyry deposit, Chile*. Doctoral Dissertation, Dalhousie University, 381 p.
- Liu Y-C., Chen C-S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering Geology* 89:129-143.
- Lorig L., Calderon Rojo A. (2002). Modeling Time-Dependent Slope Deformation at Chuquicamata Mine. In: *ISRM International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions (EUROCK 2002)*, Madeira, Portugal, pp. 137-143.
- Lu P., Latham J-P. (1994). A continuous quantitative coding approach to the interaction matrix in rock engineering systems based on grey systems approaches. In: *Proceedings of the 7th International Congress of IAEG*. Balkema, Rotterdam, pp. 4761-4770.
- Lutton R.J. (1970). Rock slope chart from empirical slope data. *Transactions of the Society of Mining Engineers A.I.M.E*, 247:160-162.
- Maerz N.H., Youssef A., Fennessey T.W. (2005). New risk-consequence rockfall hazard rating system for Missouri highways using digital image analysis. *Environmental and Engineering Geosciences* 11:229-249.
- Marklund P-I., Sjöberg J., Ouchterlony F., Nilsson N. (2007). Improved blasting and bench face slope design at the Aitik Mine. In: *Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Perth, ACG, Perth, pp. 279–292.
- Masterman G.J., Cooke D.R., Berry R.F., Walshe J.L., Lee A.W., Clark A.H. (2005). Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi District, northern Chile. *Economic Geology* 100:835-862.

Mathis J.I., Todd J.K. (2002a). Improving double bench face performance at the Ekati diamond mine. In: *Proceedings of the CIM-2002 Convention*, Vancouver, B.C., Canada.

Mathis J.I., Todd J.K. (2002b). Improving double bench performance at the Ekati Mine site. In: *Proceedings of the 104th CIM-AGM*, Vancouver, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.

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., Hellowell 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., Hellowell E.E. (2005). The development of a GIS-based tool for urban air quality assessment. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology*, Rhodes, Greece, 6 p.

Mavroulidou M., Hughes S.J., Hellowell E.E. (2007). Developing the interaction matrix technique as a tool assessing the impact of traffic on air quality. *Journal of Environmental Management* 84:513-522.

Mazzoccola D.F., Hudson J.A. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 29:37-56.

McCullough M.F. (1993). *Numerical modelling with UDEC of the footwall slope at Aznalcollar mine, southern Spain*. Master of Science Thesis, University of Leeds.

McPaul T. (2008). *Cadia Valley Operations*. Internal report to Newcrest Mining Limited, Aquaterra Consultants, 22 p.

Moore R.L., Masterman G.J. (2002). *The geology and corporate discovery history of the Collahuasi district porphyry copper deposits, Chile*. Giant Ore Deposits Workshop, University of Tasmania, Hobart, Australia, Centre for Ore Deposit Research 4, pp. 23-50.

- Morton K.L., Muller S. (2003). Hydrogeology of the Venetia Diamond Mine, South Africa. *South African Journal of Geology* 106:193-204.
- Mostyn G.R., Li K.S. (1993). Probabilistic slope analysis- state of play. In: *Proceedings of the Conference on Methodology in Geotechnical Engineering, Canberra*, pp. 89-109.
- Nelson E.P., Connors K.A., Suárez S.C. (2007). GIS-based slope stability analysis, Chuquicamata open pit copper mine, Chile. *Natural Resources Research* 16(2):171-190.
- Nicholson D.T. (2002). Identification of deterioration hazard potential for quarried rock slopes. *Quarry Management* 29(1):43-52.
- Nicholson D.T. (2004). Hazard assessment for progressive, weathering-related breakdown of excavated rock slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37:327-346.
- Noon D. Slope Stability Radar for Monitoring Mine Walls, In: *Proceedings of the Mining Risk Management Conference, Sydney, NSW*, pp 1-12.
- Oraee K., Goodarzi A. (2006). Feasibility study of Gol-Gohar iron ore open cast mine operation of Iran. In: *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2006)*, Turin, Italy.
- Ossandon G., Freraut R., Gustafson L.B., Lindsay D.D., Zentilli M. (2001). Geology of the Chuquicamata mine: A progress report. *Economic Geology* 96(2):249-270.
- Padilla R.A., Titley S.R., Pimental F.B. (2001). Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile. *Economic Geology* 96:307-324.
- Padilla R.A., Titley S.R., Eastoe C.J. (2004). Hypogene evolution of the Escondida porphyry copper deposit, Chile. *Society of Economic Geologists* 11:141-165.
- Pantelidis L. (2009). Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46(2):315-325.
- Park H., Westb T.R., Woo I. (2005). Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA. *Engineering Geology* 79:230-250.

Peters S.G., Ferdock G.C., Woitsekhowskaya M.B., Leonardso R., Rahn J. (1998). *Oreshoot Zoning in the Carlin-type Betze Orebody, Goldstrike Mine, Eureka County, Nevada*. Open-File Report 98-620, US Geological Survey.

Peterson J., Tannant D.D., Todd J.K. (2001). Wall control blasting practices at Ekati Diamond mine. *CIM Bulletin* 94:67-73.

Porter T.M., (2005). The Escondida porphyry copper deposit, northern Chile: discovery, setting, geology, hypogene mineralisation and supergene ore- A review. In: *Porter T.M. (ed.) Superporphyry copper and gold deposits: a global perspective*. PGC Publishing, Adelaide, Vol. 1, pp. 133-149.

Pothitos F., Clark D.J., Li T., Hewson S. (2003). Design and optimisation of Cadia Hill Open Pit, Cadia Valley Operations, Newcrest Mining Limited. In: *Workman-Davis C., Chanda E. (eds.) Proceedings of the 5th Large Open Pit Conference*, Kalgoorlie, WA, AusIMM, pp. 247-250,

Proughten A.J. (1991). *Numerical modelling of large rock slopes with particular reference to the Aznalcollar mine, Seville, southern Spain*. Master of Science Thesis, Royal School of Mines, Imperial College of Science and Technology, London.

Rapoport A. (1968). *General system theory- essential concept and application*. Abacus Press, Cambridge.

Rasouli Maleki M., Mahyar M., Meshkabadi K. (2011). Design of Overall Slope Angle and Analysis of Rock Slope Stability of Chadormalu Mine Using Empirical and Numerical Methods. *Engineering* 3:965-971.

Read J., Stacey P. (2009). *Guidelines for open pit slope design*. CSIRO Publishing, Melbourne, 512 p.

Reusch F., Beck D., Tyler D. (2008). Quantitative forecasting of sidewall stability and dilution in Sub-level caves. In: *MassMin 2008, Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining*, Luleå, Sweden, pp. 453-460.

Richards J.P., Boyce A.J., Pringle M. (2001). Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu

mineralization: *Economic Geology* 96:271-305.

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.

Romana M.R. (1993). A geomechanical classification for slopes: Slope mass rating. In: *Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice & Projects. Volume 3: Rock Testing and Site Characterization*, Oxford: Pergamon Press, pp. 575-600.

Rose N.D., Sharon R.P. (2000). Practical rock-slope engineering designs at Barrick Goldstrike. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 213-218.

Rose N.D., Hungr O. (2007). Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44:308-320.

Ross-Brown D.R. (1973). *Slope design in opencast mines*. PhD Thesis, Imperial College, London University, 250 p.

Rozos D, Tsagaratos P, Markantonis K, Skias S (2006). An application of rock engineering system (RES) method for ranking the instability potential of natural slopes in Achaia County, Greece. In: *Proceedings of the XIth International Congress of the Society for Mathematical Meology*, University of Liege, Belgium, S08-10

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):261-270.

Rozos D., Bathrellos G.D., Skillodimou H.D. (2011). Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece. *Environmental Earth Sciences* 63:49-63.

Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. (1986). *Learning Internal Representation*

by *Error Propagation Parallel Distributed Processing: Exploration in the Microstructure of Cognition*. Vol. 1, MIT Press, Cambridge, MA.

Rumelhart DE, McClelland JL. (1988). *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*. The PDP research group, Cambridge, MA: MIT Press, 611 p.

Sainsbury D.P., Pothitos F., Finn D., Silva R. (2007). Three-Dimensional Discontinuum Analysis of Structurally Controlled Failure Mechanisms at the Cadia Hill Open Pit. In: *Potvin Y. (ed.) Slope Stability 2007, Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Perth, Western Australia), Australian Centre for Geomechanics, pp. 307-320.

Sattarvand J., Neimann-Delius C. (2007). Planning and design of Sungun open pit mine. In: *Proceedings of the 33rd International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2007)*, Santiago, Chile.

Schindler A., Jurado M., Muller B. (1998). Stress orientation and tectonic regime in the northwestern Valencia Trough from borehole data. *Tectonophysics* 300:63-77.

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* 37:839-853.

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):375-387.

Sharon R.P. (2000). Slope stability and operational control at Barrick Goldstrike. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 219-226.

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* 46:1072-1087.

Singh A., Connolly M. (2003). VRFSSR-an empirical method for determining volcanic

rock excavation safety on construction sites. *Journal of Institution of Engineers (India), Civil Engineering Division* 84:176-191.

Singh A. (2004). FRHI- a system to evaluate and mitigate rockfall hazard in stable rock excavations. *Journal of Institution of Engineers (India), Civil Engineering Division* 85:62-75.

Sjöberg J. (1997). *Estimating rock mass strength using the Hoek-Brown failure criterion and rock mass classification- A review and application to the Aznalcollar open pit*. Internal Report BM 1997:02, Division of Rock Mechanics, Luleå University of Technology, 60 p.

Sjöberg J. (1998). *Numerical modelling of the Aznalcollar footwall slope*. Internal Report BM 1998:01, Division of Rock Mechanics, Luleå University of Technology, 75 p.

Sjöberg J. (1999). *Large scale slope stability in open pit mining- a review*. PhD Thesis, Lulea University of Technology, 790 p.

Sjöberg J., Norström U. (2000). Slope Stability at Aitik. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 203-212.

Sjöberg J., Sharp J.C., Malorey D.J. (2000). Slope Stability at Aznalcollar. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 183-202.

Sjöberg J., Marklund P-I. (2008). Rock mechanics work at the Aitik open pit. In: *MassMin 2008, Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining*, Luleå, Sweden, pp. 897-906.

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 Dissertation, University of London.

SRK Consulting (2006). *Chadormalou Phase II Pit Slope Design Studies*. Technical Report.

Stacey T.R. (2006a). Foreword. In: *Stability of rock slopes in open pit and civil engineering situations*, Cape Town, South Africa, Johannesburg: SAIMM.

Stacey P. (2006b). Factors in the design of open pit slopes- a reviewer's perspective. In: *Stability of rock slopes in open pit and civil engineering situations*, Cape Town, South Africa, Johannesburg: SAIMM, pp. 51-78.

Stacey T.R. (2006c). Considerations of failure mechanisms associated with rock slope instability and consequences for stability analysis. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 106:485-493.

Stead D., Eberhardt E. (1997). Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining. *Engineering Geology* 46(1):41-61.

Stead D., Eberhardt E., Coggan J.S. (2006). Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques, *Engineering Geology* 83:217-235.

Stead D., Yan M., Sturzenegger M. (2007). Step-path characterization in rock slopes: An integrated digital imaging- numerical modelling approach. In: *Olalla C., Grossmann N., Ribeiro e Sousa L. (eds.) Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon, Portugal.

Steffen O.K.H., Contreras L.F., Terbrugge P.J., Venter J. (2008). A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design. In: *Proceedings of the 42nd US Rock Mechanics Symposium and 2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*, San Francisco, USA.

Sullivan T.D. (2005). *Mine Slope Stability*. Course notes, Short Course, School of Mining Engineering, Sydney: The University of New South Wales.

Sullivan T.D. (2006). Pit slope design and risk- a review of the current state of the art. In *Stability of rock slopes in open pit and civil engineering situations*, Cape Town,

South Africa, Johannesburg: SAIMM, pp. 51-78.

Swan G., Sepulveda R.S. (2000). Slope stability at Collahuasi. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 163-170.

Taheri A., Tani K. (2010). Assessment of the Stability of Rock Slopes by the Slope Stability Rating Classification System. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43:321-333.

Tannant D.D., Peterson J. (2001). Evolution of Blasting Practices at the Ekati Diamond Mine. In: *Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET2001*, Chamber of Mining Engineers of Turkey, Ankara, pp. 297-304.

Tapia A., Contreras L.F., Steffen O. (2007). Risk Evaluation of Slope Failure at the Chuquicamata Mine. In: *Potvin Y. (ed.) Slope Stability 2007, Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia.

Terzaghi R., Peck R., Mesri G. (1997). *Soil Mechanics in engineering practice*. 3rd Edition, Wiley Interscience, New York, NY, 549 p.

Todd J.K. (2001). Evolutions of Production and Wall Control Blasting at the Ekati Diamond Mine. *NAPEGG Newsletter* Vol. 18, No. 1.

Tokhmechi B., Memarian H., Moshiri B., Rasouli V., Ahmadi Noubari H. (2011). Investigating the validity of conventional joint set clustering methods. *Engineering Geology* 118(3-4):75-81.

Um J., Morin B., Kulatilake P.H.S.W. (2001). Investigation of slope stability for a section of Phelps Dodge Sierrita Mine. In: *Proceedings of the 38th US Rock Mechanics Symposium*, Washington DC, pp. 967-974.

Valdivia C., Lorig L. (2000). Slope stability at Escondida mine. In: *Hustrulid W.A., McCarter M.J., Van Zyl D.J.A. (eds.) Slope Stability in Surface Mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, pp. 153-162.

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* 42:225-236.

Varnes D.J. (1978). Slope movement types and processes. In: *Schuster R.L., Krizek R.J. (eds.) Landslides Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Report 176. National Academy of Sciences, Washington

Velasco P. (2001). *The Minerals Industry of Chile- 2001*. US Geological Survey. (<http://minerals.usgs.gov/minerals>)

Wadell C., Maier M. (1998). *GPS Ore Control at Phelps Dodge Morenci*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. (SME), Preprint 98-166:2.

West R.J., Larson N.B., Visca P.J., Nicholas D.E., Call R.D. (1985). *Aitik slope stability study*. Call & Nicholas, Inc., Report to Boliden Mineral AB, Aitik Mine.

Widijanto E. (2010). *Operational reliability of an open pit mine- case study in Chuquicamata mine, Codelco Norte, Chile*. MSc Thesis, University of Chile, Santiago, Chile, 147 p.

WSM-World Stress Map (2008). *Release 2008 of the world stress map*. (Available online at www.world-stress-map.org)

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

Yang Y., Zhang Q. (1998). The application of artificial neural networks to rock engineering system (RES). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35(6):727-745.

Yang Y., Rosenbaum M.S. (2001). Artificial neural networks linked to GIS for determining sedimentology in harbours. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 29:213-220.

Young D.S. (1993). Probabilistic slope analysis for structural failure. *International*

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 30(7):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):833-838.

Zoback M.L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research* 97(B8):11761-11782.

Zupan J., Gasteiger J. (1993). *Neural Networks for Chemists- An Introduction*, VCH, Weinheim.

پیوست الف

**داده‌های آزمایشگاهی و برداشت شده از
شیب‌های سنگی مورد مطالعه**

جدول الف-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه‌های سنگی مربوط به ۱۵ شیب
مورد مطالعه (کاکایی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸)

شماره شیب سنگی	شماره نمونه	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	UCS (MPa)
S1	A-1-1	۲۶/۵	۳۷/۵
	A-1-2	۲۶/۵	۴۲/۷
S2	A-2-1	۲۶/۸	۲۸/۲
	A-2-2	۲۶/۸	۳۳/۵
S3	A-3-1	۲۷/۴	۲۵/۹
	A-3-2	۲۷/۴	۲۳/۲
S4	A-4-1	۲۶/۱	۳۴/۱
	A-4-2	۲۶/۱	۳۱/۶
S5	A-5-1	۲۶/۷	۴۸/۵
	A-5-2	۲۶/۷	۳۸/۳
S6	A-6-1	۲۶/۹	۳۸/۹
	A-6-2	۲۶/۹	۳۵/۱
S7	A-7-1	۲۶/۷	۵۶/۲
	A-7-2	۲۶/۷	۴۷/۵
S8	A-8-1	۲۷/۱	۵۲/۹
	A-8-2	۲۷/۱	۴۴/۷
S9	A-9-1	۲۷/۶	۴۱/۳
	A-9-2	۲۷/۶	۳۸/۲
S10	A-10-1	۲۶/۴	۲۹/۵
	A-10-2	۲۶/۴	۳۱/۱
S11	A-11-1	۲۷/۴	۱۸/۸
	A-11-2	۲۷/۴	۱۵/۵
S12	A-12-1	۲۶/۹	۲۷/۵
	A-12-2	۲۶/۹	۲۹/۵
S13	A-13-1	۲۷/۳	۲۲/۷
	A-13-2	۲۷/۳	۱۹/۱
S14	A-14-1	۲۷/۳	۲۴/۴
	A-14-2	۲۷/۳	۱۵/۶
S15	A-15-1	۲۶/۱	۲۳/۸
	A-15-2	۲۶/۱	۳۵/۲

جدول الف-۲- نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی درزه‌های سنگی مربوط به ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه؛ پارامترهای موهر- کولمب (کاکایی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸)

مقاومت برشی حداکثر (MPa) (تحت بار قائم ۱ MPa)	ϕ (°)	c (kPa)	شماره نمونه	شماره شیب سنگی
۱/۲۲	۳۲	۶۰۰	A-1	S1
۱/۳	۲۹	۷۵۰	A-2	S2
۱/۲۲	۳۱	۶۲۰	A-3	S3
۱/۵۹	۳۳	۹۵۰	A-4	S4
۱/۱۴	۲۵	۶۷۰	A-5	S5
۰/۹۸	۲۷	۴۷۰	A-6	S6
۰/۹۳	۲۹	۳۸۰	A-7	S7
۱/۱۹	۳۰	۶۲۰	A-8	S8
۱/۰۲	۲۷	۵۱۰	A-9	S9
۱/۱۶	۲۶	۶۷۰	A-10	S10
۰/۹۴	۲۳	۵۲۰	A-11	S11
۰/۹۲	۲۷	۴۱۰	A-12	S12
۱/۱۴	۳۰	۵۶۰	A-13	S13
۰/۸۶	۲۴	۴۲۰	A-14	S14
۰/۹۶	۲۶	۴۷۰	A-15	S15

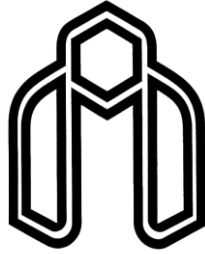
جدول الف-۳- اطلاعات مربوط به خطوط برداشت درزه‌های سنگی بر روی ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه
(کاکایی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸)

شماره شیب سنگی	هواز دگی	تعداد دسته درزه‌ها	جهت یافتگی ناپیوستگی‌ها ^۱	بازشدگی ناپیوستگی‌ها (mm)	تداوم ناپیوستگی‌ها (m)	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (m)
S1	شدید	۲	۱	۱۶	۶/۵	۰/۱۲
S2	شدید	۳	۲	۱۹	۸/۲	۰/۰۸
S3	شدید	۴	۳	۲۲	۱۲/۱	۰/۱۴
S4	شدید	۳	۲	۱۹	۱۳/۵	۰/۲۸
S5	تغییر در رنگ	۳	۱	۸	۴/۳	۰/۲۳
S6	تغییر در رنگ	۲	۳	۷	۲/۷	۰/۲۰
S7	تغییر در رنگ	۵	۱	۱۱	۴/۵	۰/۰۵
S8	تغییر در رنگ	۲	۳	۱۸	۱۲/۱	۰/۱۲
S9	شدید	۴	۲	۱۲	۵/۶	۰/۰۵
S10	شدید	۴	۱	۷	۱۶/۷	۰/۰۳
S11	شدید	۳	۲	۶	۱۱/۴	۰/۱۸
S12	تغییر در رنگ	۳	۲	۹	۷/۹	۰/۱۵
S13	تغییر در رنگ	۲	۲	۱۱	۱۱/۲	۰/۳۰
S14	تغییر در رنگ	۴	۳	۱۰	۸/۵	۰/۲۷
S15	شدید	۴	۳	۸	۷	۰/۱۳

^۱ تعداد ناپیوستگی‌های جهت‌یافته در جهت گسل اصلی

جدول الف-۴- پارامترهای حاکم محیطی در ۱۵ شیب سنگی مورد مطالعه (کاکایی و زارع نقدهی، ۱۳۸۸)

دوب و انجماد (cycle/y)	بارندگی (mm/y)	زاویه شیب (°)	ارتفاع شیب (m)	شرایط هیدرولیکی	ناپایداری پیشین	گسل‌ها و چین‌خورگی‌ها	سنگ‌شناسی	شماره شیب سنگی
۹۰	۴۰۰	۸۲	۵/۵	خشک	ساکن	جزئی	ماسه‌سنگ	S1
۹۰	۴۰۰	۷۸	۴/۳	خشک	فعال	جزئی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S2
۹۰	۴۰۰	۸۵	۴/۲	خشک	فعال	جزئی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S3
۹۰	۴۰۰	۸۴	۳/۵	خشک	ساکن	اصلی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S4
۹۰	۴۰۰	۷۹	۶/۱	خشک	غیرفعال	-	ماسه‌سنگ	S5
۹۰	۴۰۰	۷۳	۱۴/۲	خشک	ساکن	-	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S6
۹۰	۴۰۰	۷۹	۱۹/۵	خشک	فعال	جزئی	ماسه‌سنگ	S7
۹۰	۴۰۰	۷۶	۴/۸	خشک	فعال	جزئی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S8
۹۰	۴۰۰	۸۵	۵/۱	خشک	فعال	اصلی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S9
۹۰	۴۰۰	۸۱	۱۲/۵	خشک	فعال	اصلی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S10
۹۰	۴۰۰	۷۸	۱۷/۴	خشک	فعال	اصلی	سنگ آهک	S11
۹۰	۴۰۰	۸۱	۷/۳	خشک	ساکن	جزئی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S12
۹۰	۴۰۰	۷۳	۵/۴	خشک	غیرفعال	-	سنگ آهک	S13
۹۰	۴۰۰	۶۷	۱۱/۵	خشک	غیرفعال	جزئی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S14
۹۰	۴۰۰	۷۷	۱۳/۲	خشک	ساکن	جزئی	ماسه‌سنگ - سنگ آهک	S15



SHAHROOD UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MINING, PETROLEUM & GEOPHYSICS

Ph.D. Thesis

**Improvement of Rock Engineering Systems (RES)
Approach to Evaluation of Mine Slopes Instability
Potential**

Masoud Zare Naghadehi

Supervisor:

Prof. R. Kakaei

Advisors:

Dr. S.E. Jalali

Dr. R. Jiménez

Prof. J.A. Hudson

March 2012

Abstract

Today, the stability problem of rock slopes in open-pit mines has become more important with the increasing growth in their working scales. The complexity in failure mechanisms of these large scale slopes causes the conventional methods to be unable to analyse and predict these events thoroughly. The major reason for this issue could be addressed to the large number of parameters controlling the stability and also the interactions among the parameters. To overcome this problem, a well-known systems approach named rock engineering systems (RES) has been considered in this research. A conventional expert-based coding method has been used in definition of the interactions in most of previous applications of this approach, which that is not able to explain the interactions correctly because of its subjectivity. Some efforts have been made to improve the approach through combining it with other theories, but they have not been practically used so far in any important application. Therefore, in this research, it has been tried to improve the systems approach in some ways, so that it could be used in the open-pit slope stability problems. In order to do so, in first step the conventional RES approach has been applied to a general rock slope stability problem in a region in northeast of Iran to observe and examine the results of the systems approach. as a preliminary validation on the utilization of systems approach in the study region, the stability of investigated rock slopes were analysed using an empirical method (SMR) and the results were compared. The comparisons showed a rather good coincidence between the given classes of two methods. In the next step and as a new idea, a general improvement has been made using incorporating the probabilities to the coding process of the interaction matrix in the RES framework. This probabilistic coding methodology (PESQ) proposes entering the probabilities of each coding value rather than assigning a unique value to each interaction. In this manner, whole the approach has become probabilistic and has no longer been deterministic. In the third step and as one of the major contributions of the thesis, a new Mine Slope Instability Index (MSII) has been developed by applying an optimization in the algorithm of a previous improvement in RES approach including utilization of the Artificial Neural Networks (ANN) which codes the interaction matrix in an objective manner. To do so, eighteen parameters that can be easily obtained and rated in the field, and that are important for open-pit slope stability, have been employed. Their corresponding ratings have also been proposed, so that the MSII can be computed as a simple weighted sum of ratings for all parameters considered; to minimize subjectivity the weights are computed, in the context of the Rock Engineering Systems paradigm, using an optimized Back-Propagation Artificial Neural Network that has been trained with an extensive database of worldwide open-pit slope stability case histories. Results have shown that the ANN provides a highly reliable RES interaction matrix, and also that the selected parameters are important for open-pit slope stability. Slope (in)stability hazard levels have been defined based on MSII values and the predictions of the newly proposed MSII have been validated by comparing the predictions with the actual (i.e., observed) behaviour corresponding to ten independent case histories that were not used for the ANN training. An excellent agreement between predictions and observations has been found, with only one (out of ten) cases providing an incorrect prediction. Therefore, it is anticipated that this index would be useful in the predictions of instability potential of open-pit mine slopes in the future applications.