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

پیوست شماره ۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

رساله دکتری آقای مسعود زارع نقدهی

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

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

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

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

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 پروفسور کاکایی که وظیفهٔ راهنمایی و نظارت بر مراحل تحقیق را به بهترین نحو به انجام رسانده و از هیچ کمکی دریغ نفرمودند، 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 پروفسور هادسون استاد بازنشسته کالج سلطنتی انگلستان و دکتر خیمِنِس 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 والنتین 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 فروهلاند؛ پس گام در راه نهادیم، چرا که راه ما را فرا می‌خواند.

پیوست شماره ۳

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج دراین رساله نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد 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.

اسفند ۱۳۹۰

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 کنترل کننده 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 مهندسی‌شده 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

عنوان **صفحه**

چکیده ..... الف

فهرست مطالب ..... ج

فهرست شکل‌ها ..... ی

فهرست جداول ..... ف

فصل اول: **کلیات**

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- پیشینه و انگیزه طرح موضوع ۵

۱-۳- اهداف رساله ۷

۱-۴- رویکرد اتخاذ شده و سازماندهی رساله ۸

فصل دوم: **اصول مهندسی شیب‌های سنگی در معادن روباز**

۲-۱- مقدمه ۱۳

۲-۲- اجزای طراحی شیب‌های معادن روباز ۱۳

۲-۳- مکانیزم‌های شکست شیب‌های سنگی ۱۷

۲-۳-۱- شکست دایره‌ای ۱۸

۲-۳-۲- شکست صفحه‌ای/گوه‌ای ۱۹

۲-۳-۳- شکست واژگونی ۲۱

۲-۳-۴- شکست راه-پله‌ای ۲۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۲-۳-۵- شکست در شیب‌های سنگی بزرگ مقیاس ۲۳

۲-۴- رویکردهای مرسوم در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی ۲۶

۲-۴-۱- روش‌های تجربی ۲۸

۲-۴-۲- روش استریوگرافیک ۳۱

۲-۴-۳- روش‌های تحلیل تعادل حدی ۳۳

۲-۴-۴- روش‌های احتمالاتی ۳۵

۲-۴-۵- روش‌های عددی ۳۸

۲-۴-۶- روش‌های رفتارسنجی ۴۰

۲-۵- جمع‌بندی ۴۲

فصل سوم: **سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)**

۳-۱- مقدمه ۴۵

۳-۲- مفهوم سیستم و تفکر سیستمی ۴۶

۳-۳- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) ۴۸

۳-۳-۱- ماتریس‌های اندرکنش ۴۸

۳-۳-۲- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش ۵۲

۳-۳-۳- نمودار علت-اثر ۵۵

۳-۴- سابقه استفاده از رویکرد RES در کاربردهای مختلف ۶۰

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۳-۵- تلاش‌های انجام شده در جهت بهبود رویکرد RES ۶۵

۳-۵-۱- استفاده از نظریه سیستم‌های خاکستری ۶۶

۳-۵-۲- استفاده از نظریه گراف ۶۹

۳-۵-۳- استفاده از شبکه‌های عصبی ۷۱

۳-۶- تمرکز بر سوابق استفاده از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌ها ۷۳

۳-۶-۱- مازوکولا و هادسون (۱۹۹۶) ۷۳

۳-۶-۲- کاستالدینی و همکاران (۱۹۹۸) ۷۶

۳-۶-۳- ژانگ و همکاران (۲۰۰۴) ۷۷

۳-۶-۴- روزوس و همکاران (۲۰۰۸) ۷۸

۳-۶-۵- جِریان و جِریان (۲۰۰۸) ۷۸

۳-۶-۶- بودتا و همکاران (۲۰۰۸) ۷۹

۳-۶-۶- روزوس و همکاران (۲۰۱۱) ۷۹

۳-۷- نتیجه‌گیری ۸۱

فصل چهارم: **بکارگیری رویکرد RES برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی**

۴-۱- مقدمه ۸۳

۴-۲- منطقه انتخاب شده و شیب‌های سنگی مورد مطالعه ۸۳

۴-۳- عوامل موثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه ۹۱

۴-۳-۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی ۹۱

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۴-۳-۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها ۹۱

۴-۳-۳- ناپایداری‌های پیشین ۹۲

۴-۳-۴- مقاومت سنگ بکر ۹۲

۴-۳-۵- هوازدگی ۹۳

۴-۳-۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها ۹۳

۴-۳-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها ۹۳

۴-۳-۸- شرایط هیدرولیکی ۹۴

۴-۳-۹- ابعاد و زاویه شیب‌ها ۹۴

۴-۳-۱۰- میزان بارندگی ۹۴

۴-۳-۱۱- چرخه‌های ذوب و انجماد ۹۵

۴-۴- اندرکنش‌های میان پارامترهای انتخاب شده ۹۵

۴-۵- تشکیل فهرست‌های رده‌بندی و بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز ۹۹

۴-۵-۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی ۱۰۰

۴-۵-۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها ۱۰۱

۴-۵-۳- ناپایداری پیشین ۱۰۲

۴-۵-۴- مقاومت سنگ بکر ۱۰۲

۴-۵-۵- تعداد دسته‌درزه‌ها و جهت‌یافتگی ۱۰۲

۴-۵-۶- بازشدگی، تداوم و فاصله‌داری درزه‌ها ۱۰۳

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۴-۵-۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها ۱۰۴

۴-۵-۸- شرایط هیدرولیکی ۱۰۴

۴-۵-۹- ابعاد و زاویه شیب‌ها ۱۰۴

۴-۵-۱۰- میزان بارندگی و چرخه‌های ذوب و انجماد ۱۰۵

۴-۶- رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه از نظر میزان ناپایداری ۱۰۵

۴-۷- اعتبارسنجی نتایج با استفاده از یک روش تجربی ۱۰۹

۴-۸- نتیجه‌گیری ۱۱۲

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

۵-۱- مقدمه ۱۱۵

۵-۲- کدگذاری نیمه‌عددی خبره احتمالاتی (PESQ) ۱۱۵

۵-۲-۱- معرفی ۱۱۵

۵-۲-۲- کاربرد ۱۱۷

۵-۳- نتیجه‌گیری ۱۴۰

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

۶-۱- مقدمه ۱۴۳

۶-۲- کدگذاری ماتریس اندرکنش پارامترها با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) ۱۴۴

۶-۳- تعریف شاخص ناپایداری شیب‌های معادن روباز (MSII) ۱۵۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۶-۴- ساخت یک پایگاه داده‌ها از رخدادها و وضعیت‌های پایداری شیب‌های معادن روباز ۱۵۴

۶-۴-۱- انتخاب و طبقه‌بندی پارامترهای اصلی موثر بر پایداری شیب‌های معادن روباز ۱۵۴

۶-۴-۱-۱- شرایط محیطی کلی ۱۵۷

۶-۴-۱-۲- کیفیت سنگ بکر ۱۵۷

۶-۴-۱-۳- خصوصیات توده سنگ ۱۵۸

۶-۴-۱-۴- تنش برجای سنگ ۱۵۸

۶-۴-۱-۵- شرایط هیدرولیکی ۱۵۹

۶-۴-۱-۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها ۱۵۹

۶-۴-۱-۷- شرایط هندسی دیواره پیت ۱۶۲

۶-۴-۱-۸- ساخت ۱۶۳

۶-۴-۱-۹- سوابق پیشین ۱۶۳

۶-۴-۲- پایگاه داده‌های شیب‌های معادن روباز ۱۶۸

۶-۵- نتایج ۱۷۰

۶-۵-۱- کدگذاری ماتریس اندرکنش بر پایه ANN ۱۷۰

۶-۵-۲- تعریف سطوح خطر ناپایداری بر اساس MSII ۱۷۷

۶-۵-۳- اعتبارسنجی روش ۱۸۲

۶-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۱۸۴

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ششم: **نتیجه‌گیری و پیشنهادات**

۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۸۸

۷-۲- پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۹۲

فهرست منابع ۱۹۵

پیوست الف: داده‌های آزمایشگاهی و برداشت شده از شیب‌های سنگی مورد مطالعه ۲۲۳

پیوست ب: پایگاه داده‌های کدشده شیب‌های سنگی معادن روباز ۲۲۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- افزایش تدریجی نرخ تولید روزانه برخی معادن روباز بزرگ (modified after Brown, 2004) 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., 2000a) ۶

شکل ۱-۵- ساختار رساله ۱۰

شکل ۲-۱- 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 & 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, 2004) 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

عنوان **صفحه**

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

عنوان **صفحه**

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 ۳×۳ 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- P_j (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 ۲×۲ 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 ۴×۴ (after Hudson, 1992a) ۵۹

شکل ۳-۱۳- مفهوم شدت اندرکنش و تسلط پارامتر (after Hudson, 1992a) ۶۰

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

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