

تحلیل و رده‌بندی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌بیلاق با استفاده از رویکرد سیستمی

رضا خالوکاکایی^۱ مسعود زارع نقدهی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۸۸/۶/۴

دریافت مقاله: ۸۷/۷/۲

چکیده:

موضوع تحلیل پایداری شیب‌ها با روش‌های تحلیلی و عددی به علت پیچیدگی رفتار توده سنگ و تعداد عوامل مؤثر بر آن، همواره کاری دشوار به حساب آمده است. روش‌های تجربی نیز علیرغم استفاده فراگیر، به دلیل در نظر گرفتن فاکتورهای مشخص و مخصوص به خود، از دقت و کارایی لازم برای تمامی موقعیت‌ها برخوردار نیستند. رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به عنوان یک روش سیستمی در تحلیل‌ها و رده‌بندی‌های پروژه‌های مهندسی سنگ مطرح می‌باشد. در این رویکرد، تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر بر یکدیگر در مقیاسی برابر سنجیده شده و بدین ترتیب اثر هر پارامتر در میزان تولید ناپایداری مورد توجه قرار می‌گیرد. هدف از این مقاله استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ در رده‌بندی شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌بیلاق واقع در محور ارتباطی شاهرود-آزادشهر می‌باشد. بدین منظور، پس از انجام بازدیدها از منطقه مورد مطالعه و بررسی شرایط محیطی، تعیین ایستگاه‌ها و سنجش وضعیت شیب‌های سنگی، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ایجاد ناپایداری در توده سنگ‌ها شناسایی شدند. سپس با پیروی از مراحل کلیدی اجرای روش مذکور نظیر تشکیل ماتریس اندرکنش، کدگذاری ماتریس، تشکیل منوهای رده‌بندی، تعریف اندیس ناپایداری به صورت فرمول ریاضی برای منطقه و پس از به دست آوردن داده‌های مربوط به خواص مکانیکی سنگ‌ها، درزه‌های سنگی و شرایط حاکم بر منطقه، اندیس‌های خاص هر شیب سنگی مورد محاسبه قرار گرفت. بدین ترتیب رده‌بندی جامعی از ایستگاه‌ها و در نتیجه شیب‌های منطقه ارائه گردید. در نهایت، با به‌کارگیری یک روش تجربی و تحلیل پایداری شیب‌های مورد نظر، یک اعتبارسنجی اولیه برای کاربرد رویکرد سیستمی در منطقه مورد مطالعه انجام شد که مقایسه‌ها تطبیق نسبتاً خوبی را میان نتایج دو روش نشان داد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد سیستمی در تحلیل پایداری شیب‌ها در مقیاس وسیع و در مسائل دارای پارامترهای مؤثر متعدد می‌تواند بسیار مفید واقع گردد.

کلید واژه‌ها: تحلیل پایداری، شیب‌های سنگی، جاده گردنه خوش‌بیلاق، رویکرد سیستمی، سیستم‌های مهندسی سنگ (RES).

۱- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود masoud.zare@hotmail.com

* مسئول مکاتبات

مقدمه

با نام سیستم‌های مهندسی سنگ (Rock Engineering RES Systems) ارائه نمود (Hudson, 1992).

این رویکرد با در نظر گرفتن مسئله به صورت یک سیستم واقعی و با استفاده از ویژگی‌ها و تفکر سیستمی، امروزه به عنوان راه حلی جدید برای مسائل پیچیده مهندسی سنگ به شمار می‌رود. پروژه‌های تحلیل و طراحی پایداری شیب‌های سنگی به دلیل وجود فاکتورهای تأثیرگذار بسیار زیاد، از جمله این مسائل پیچیده به شمار می‌روند. همان طور که ذکر شد، به دلیل اهمیت بالای موضوع در مهندسی شیب‌های سنگی، تاکنون رویکردهای متعددی به منظور تحلیل پایداری ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفته است که در این میان تنها رویکرد سیستمی توانایی این را داشته است که تمامی اجزای مؤثر بر پایداری و همین طور مهم‌تر از آن، تأثیر این اجزا بر همدیگر را در تحلیل‌ها مورد توجه قرار دهد. رویکرد مذکور تا کنون در بسیاری از علوم مهندسی نظیر محیط‌زیست و شناخت گستره آلودگی‌ها، مهندسی عمران و مهندسی معدن و حفاری به‌کار رفته است. در این میان کاربردهای ویژه‌ای از این رویکرد توسط محققان مختلف در مسائل پایداری شیب‌ها ارائه شده است (Smith, 1994; Mazzoccola & Hudson, 1996; Castaldini et al., 1998; Ali & Hasan, 2002; Zhang et al., 2004; Ceryan & Ceryan, 2008; Rozos et al., 2008; Budetta et al., 2008).

در این تحقیق سعی بر آن است که پایداری شیب‌های سنگی مشرف به جاده گردنه خوش‌یلاق واقع در مسیر ارتباطی شاهرود- آزادشهر به کمک رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) تحلیل شده و یک رده‌بندی از این شیب‌ها ارائه گردد. برای این منظور از مفهوم سیستم و تفکر سیستمی به عنوان زیربنای اصلی و به طور کلی از مراحل متعارف و مرسوم رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ استفاده می‌شود. در ادامه، مبانی رویکرد و مراحل طی شده در این مطالعه به طور کامل تشریح می‌گردند.

رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

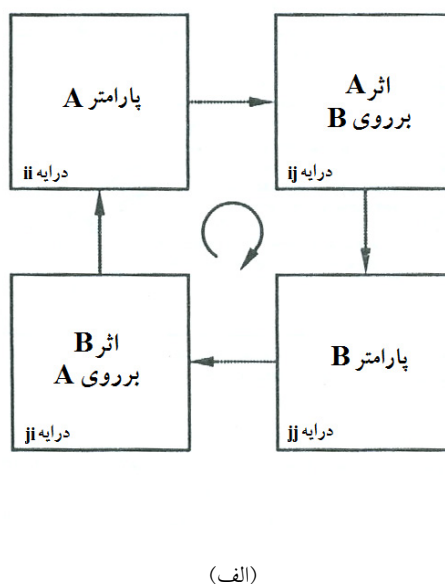
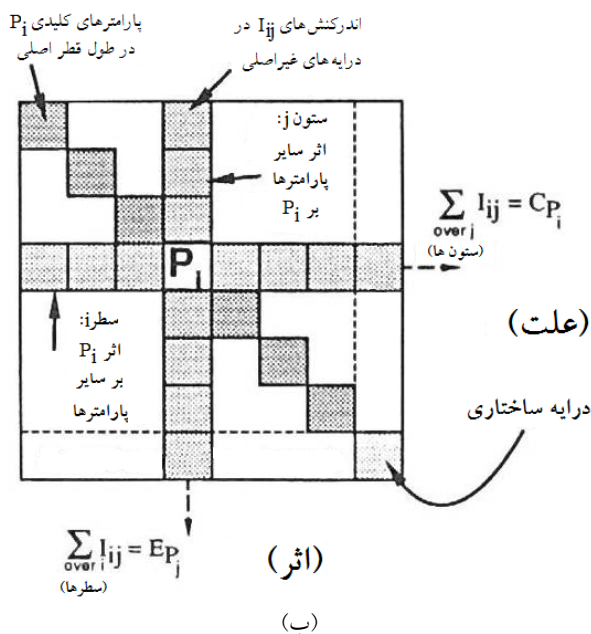
با پیچیده‌تر شدن مسائل مهندسی سنگ در کاربردهای

طیف گسترده‌ای از فعالیت‌های مهندسی نیاز به حفر برش‌هایی در سنگ به نام شیب‌های سنگی دارند. پروژه‌هایی نظیر بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی، سدها و نیروگاه‌های برق‌آبی و پروژه‌های حفاری صنعتی و شهری از این دست هستند. همچنین معادن روباز بخش قابل‌توجهی از تولید مواد معدنی را در جهان تشکیل می‌دهند که به صورت ذاتی شکل‌گیری چنین معادنی با ایجاد شیب‌های سنگی امکان‌پذیر است. علاوه بر چنین حفاری‌های مصنوعی، در مناطق کوهستانی پایداری شیب‌های سنگی طبیعی، بسیار مورد توجه می‌باشد. به عنوان مثال، بزرگراه‌ها و مسیرهای ریلی واقع در دره‌ها معمولاً در پایین دست چنین شیب‌هایی قرار گرفته‌اند. تحلیل پایداری شیب‌های سنگی عموماً به منظور ارزیابی طراحی ایمن و اجرایی برای شیب‌های مصنوعی نظیر شیب‌های معادن روباز و جاده‌ها و نیز آنالیز شرایط تعادلی شیب‌های طبیعی به کار می‌رود. انتخاب رویکرد قابل استفاده در هر مورد به نوع و شرایط ساختگاه و نوع شکست احتمالی بستگی دارد که در عین حال عواملی هم‌چون تغییر در شرایط مقاومتی مواد و محدودیت‌های ذاتی رویکردها و روش‌های تحلیل پایداری بایستی مد نظر قرار گیرد (Eberhardt, 2003). روش‌های متعددی از قبیل روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی وجود دارد که گذشته از نقاط ضعف و قوت هر روش، هیچ یک از آنها قادر به در نظر گرفتن تمام پارامترهای مؤثر بر مسئله پایداری نبوده و همواره بخشی از فاکتورهای تأثیرگذار از نظر دور می‌افتند. با این اوصاف، رویکردی در مهندسی سنگ مورد نیاز بوده است که با اطمینان بالا، طبیعت بسیار ویژه سنگ را به عنوان یک نوع ماده مهندسی در نظر گرفته و توانایی وارد نمودن دانش کنونی را در ارزیابی‌ها داشته باشد و نیز قادر باشد که در پروژه‌های مهندسی سنگ با اهداف گوناگون به کار رود. به عبارت دیگر و به بیان کلی، سیستم کامل مهندسی سنگ با تمامی اهداف اصلی و فرعی باید در نظر گرفته شود. برای پاسخ مستقیم به این نیازها و همچنین احاطه کامل بر مسائل پیچیده مهندسی سنگ، هادسون (Hudson) در سال ۱۹۹۲ رویکرد جدیدی را

در یک ماتریس قرار داد. این کار به عنوان ابزاری پایه‌ای به وسیله رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Hudson, 1992; Hudson & Harrison, 1992). پارامترهای اصلی مرتبط با مسئله مورد نظر در امتداد قطر اصلی ماتریس لیست شده و اثرات متقابل هر جفت از پارامترها در سایر درایه‌ها شکل می‌گیرند (شکل ۱). همان گونه که در شکل ۱- الف دیده می‌شود، پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه بالا سمت راست ماتریس قرار گرفته است. درایه بالا سمت راست نشان دهنده تأثیر A روی B و درایه پایین سمت چپ نشان دهنده تأثیر B روی A می‌باشد. بدین ترتیب، در واقع اصول پایه‌ای ماتریس اندرکنش لیست کردن پارامترهای اصلی در طول قطر اصلی و در نظر گرفتن اثرات متقابل در درایه‌های غیراصلی است (Hill & Warfield, 1972; Hudson, 1992).

بدین ترتیب 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 می‌شوند. این مکانیزم‌ها می‌توانند به صورت تحلیلی

گوناگون، با نگاهی واقع‌بینانه به موضوع درمی‌یابیم که روش‌های مرسوم عددی و تحلیلی قادر به در نظر گرفتن تمامی پارامترهای تأثیرگذار در یک مسئله خاص نبوده و همواره از بسیاری ساده‌سازی‌ها در آنها استفاده شده و در نتیجه با محدودیت‌های بی‌شماری در مواجهه با مسائل مختلف روبرو هستند. هنگام طراحی یک ساختار در یک توده سنگ، لازم است که علاوه بر در نظر گرفتن تک تک فاکتورهایی نظیر سنگ بکر، شکستگی‌ها، تنش در سنگ، نفوذپذیری، حفاریات و نگهداری‌ها، نحوه تأثیر متقابل این عوامل بر روی هم نیز در نظر گرفته شود. به عنوان ابزاری برای برقراری ارتباط میان اصول مکانیک سنگی و کاربردهای مهندسی سنگ، بایستی قادر باشیم چنین اثرات متقابلی را مورد ارزیابی قرار دهیم. بنابراین برای مدل‌سازی مکانیک سنگی و طراحی مهندسی سنگ در یک پروژه به‌خصوص، 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 اثرات متقابل میان آنها در نظر گرفته شده است. به عنوان یک روش سیستمی جهت مواجهه با تمام تأثیرات متقابل، می‌توان آنها را



شکل ۱- مفهوم ماتریس اندرکنش در RES؛ الف) ماتریس برای سیستمی با دو پارامتر A و B، ب) کدگذاری ماتریس اندرکنش و شکل‌گیری محورهای علت و اثر (Hudson, 1992)

مطالعه موردی

منطقه مورد مطالعه

جاده آسفالت شاهرود - آزادشهر، به عنوان محور ارتباطی استان‌های سمنان و گلستان در منطقه‌ای بین طول‌های جغرافیایی $۵۵^{\circ}۰۰'$ و $۵۵^{\circ}۳۰'$ و عرض‌های جغرافیایی $۳۶^{\circ}۳۰'$ و $۳۷^{\circ}۰۰'$ به گردنه‌ای کوهستانی و نسبتاً طولانی به نام گردنه خوش بیلاق می‌رسد. آب و هوای منطقه خنک و کوهستانی بوده و از نظر میزان بارندگی سالیانه در میان نواحی مشابه در شمال‌شرق کشور از متوسط بسیار بالایی برخوردار است. شیروانی‌های سنگی متعدد این منطقه به دلایل مختلف دارای پتانسیل ریزش بالایی هستند که همه ساله باعث ایجاد حوادث و اختلال در سیستم حمل و نقل جاده‌ای می‌شوند. بنابراین اطلاع از شرایط، پتانسیل ریزش و نیز میزان پایداری شیروانی‌های آن بسیار ضروری به نظر می‌رسد. موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

سازند حاکم در این منطقه، خوش بیلاق می‌باشد. این سازند از طبقات نازک تا متوسط لایه آهکی با میان‌لایه‌های مارنی و آهک، دولومیت ضخیم لایه، 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.

محل دقیق مورد مطالعه این تحقیق، شیب‌های سنگی مشرف به جاده در نواحی شمالی گردنه خوش بیلاق است. در این محل، سه نوع سنگ عمده شامل ماسه‌سنگ، آهک و مارن دیده شود 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. ماسه سنگ‌های مذکور از انواع نسبتاً همگن است، در حالی که دانه‌بندی‌ها در مورد سنگ آهک‌های مارنی و ترکیب‌های مشاهده شده منظم نمی‌باشد.

در طول حدود ۱۲ کیلومتر از جاده مذکور، ۱۵ شیب سنگی به نحوی انتخاب شده‌اند که بتوانند اکثر طول جاده را پوشش

یا گرافیکی به خوبی نمایش داده شوند. با این حال، بایستی چگونگی عددی‌سازی اهمیت پارامترها در نظر گرفته شود. برای این منظور نیاز به روشی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش است که از این طریق چگونگی تأثیر پارامترها بر روی یکدیگر به سبب مکانیزم‌های موجود به صورت عددی بیان گردد.

طبق نظر هادسون، (معرف رویکرد RES) پنج روش مختلف جهت کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد.

از میان این روش‌ها، روش کدگذاری نیمه عددی خبره (Expert Semi-Quantitative) ESQ معروف‌ترین مورد است که دارای پنج کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ است. 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. در حال حاضر این روش از بیشترین کاربرد برخوردار است.

با توجه به نحوه ساخته شدن ماتریس واضح است که هر سطر عبوری از یک درایه نشان دهنده تأثیر آن بر تمام پارامترهای دیگر موجود در سیستم است. به عکس، هر ستون عبوری از آن درایه نشان دهنده تأثیر پارامترهای دیگر سیستم بر روی آن می‌باشد. به محض اینکه ماتریس به صورت عددی کدگذاری شود، می‌توان جمع هر سطر و هر ستون آن را به دست آورد. مجموع مقادیر عددی هر سطر به نام «علت» (Cause) و همین‌طور مجموع مقادیر هر ستون به نام «اثر» (Effect) شناخته می‌شوند که در نهایت سبب به وجود آمدن محورهای C و E می‌گردند (شکل ۱-ب). بنابراین، C ارائه‌گر نحوه تأثیرات یک پارامتر بر سیستم و E نشان دهنده تأثیری است که سیستم بر آن پارامتر می‌گذارد. تفسیر چنین نموداری اطلاعات کاملی از وضعیت سیستم مورد مطالعه در اختیار ما خواهد گذاشت. رویکرد RES بسته به کاربرد مورد نظر و متصور از آن، دارای مراحل دیگری شامل تعریف اندیس با توجه به موضوع کار و تشکیل منوهای رده‌بندی پارامترها نیز می‌باشد که سعی خواهد شد در بخش بعد، هم‌زمان با ارائه کاربرد در مورد آنها بحث گردد.



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن

۶- خصوصیات ناپیوستگی‌ها شامل تعداد دسته‌درزه‌ها (P_6)، جهت‌یافتگی (P_7)، بازشدگی (P_8)، تداوم (P_9) و فاصله‌داری آنها (P_{10})؛ ۷- خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها (P_{11})؛ ۸- شرایط هیدرولیکی (P_{12})؛ ۹- ارتفاع و زاویه شیب‌ها (P_{13}) و (P_{14})؛ ۱۰- میزان بارندگی (P_{15})؛ ۱۱- چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن (P_{16}).

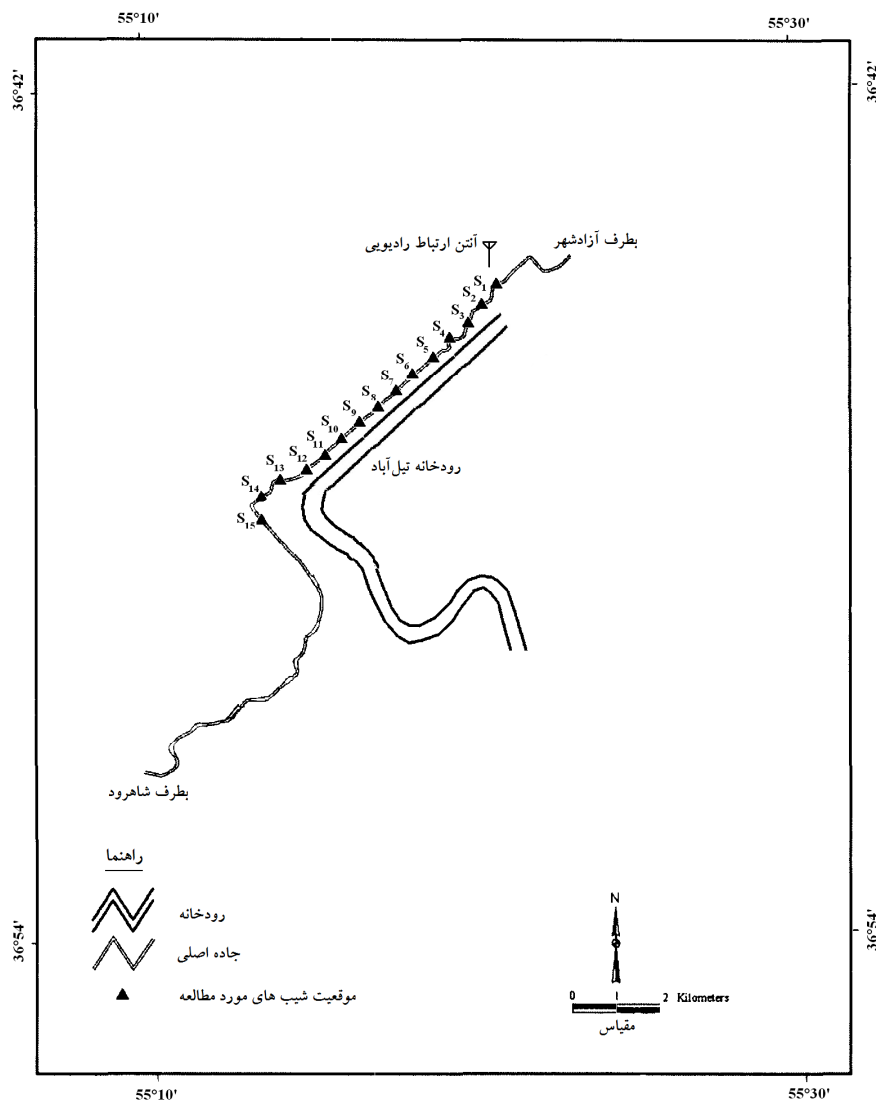
به منظور درک چگونگی اثرات متقابل پارامترها، نیاز به یک مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح نمود. بنابراین، شانزده پارامتر مهم انتخاب شده، در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش به همراه درایه پایین سمت راست که توسط "ناپایداری بالقوه" پر می‌شود، قرار می‌گیرند. درایه آخر اشاره شده در واقع موضوع مورد مطالعه است. ستون اثرات متقابل که از این درایه

دهند. شیب‌های انتخاب شده با نشانه‌های ایستگاه‌های S1 تا S15 نام‌گذاری شده‌اند. این ایستگاه‌ها بر روی کروکی جاده مشخص شده و در شکل ۳ قابل مشاهده است.

انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری شیب‌های سنگی در منطقه و اثرات متقابل آنها بر یکدیگر

بدیهی است که عوامل مؤثر بر پایداری شیب‌ها با توجه به شرایط از منطقه‌ای به منطقه دیگر تا حد قابل توجهی تفاوت خواهد داشت. مهم‌ترین عوامل در منطقه مورد مطالعه، شناسایی شده و به صورت زیر لیست شده است:

- ۱- زمین‌شناسی و لیتولوژی (P_1)؛ ۲- گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها (P_2)؛ ۳- ناپایداری‌های پیشین (P_3)؛ ۴- مقاومت سنگ بکر (P_4)؛ ۵- هوازدگی (P_5)؛



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

۱ برای اندرکنش ضعیف، ۲ برای متوسط، ۳ برای قوی و ۴ برای اثر بحرانی و شدید در نظر گرفته می‌شود. پس از کدگذاری ماتریس، علت C به صورت مجموع تمام کدهای سطر و اثر E به صورت مجموع تمام کدهای ستون برای هر پارامتر قابل محاسبه است. مقادیر علت و اثر هر پارامتر به روی محورهای x و y منتقل شده و بدین ترتیب نمودار علت- اثر را به وجود آورده‌اند (شکل ۴). قطر این نمودار 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 شده‌اند.

آخر عبور می‌کند، نشان می‌دهد که چگونه سیستم توده‌سنگ، ناپایداری بالقوه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به همین شکل سطر عبوری از این درایه نشان دهنده اثر ناپایداری بالقوه بر توده‌سنگ می‌باشد که در این کاربرد عملاً وجود ندارد، چرا که ناپایداری "بالقوه" است. ماتریس اندرکنش برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌یلاق، به روشی که در بخش قبل توضیح داده شد، کدگذاری شد که نتیجه آن در جدول ۱ آورده شده است. همان‌طور که ذکر شد، روش کدگذاری نیمه عددی خبره (ESQ) معروف‌ترین روش کدگذاری است که دارای پنج کلاس از ۰ تا ۴ می‌باشد. در این کلاس‌بندی، به ترتیب صفر برای عدم وجود اندرکنش،

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

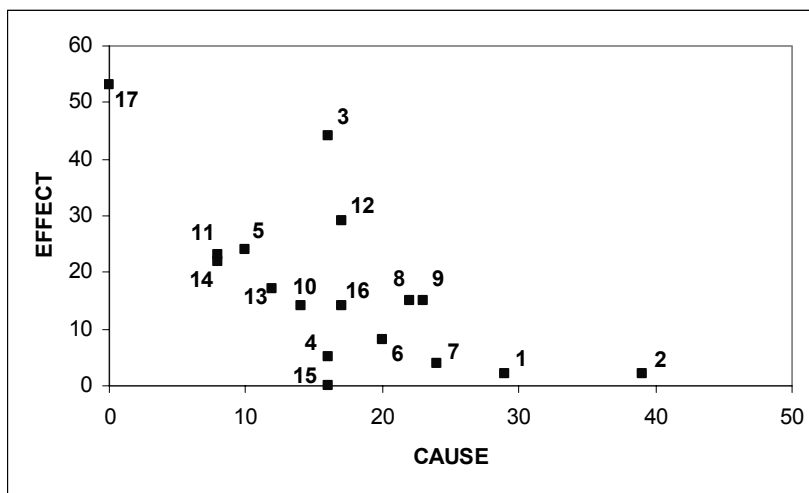
P ₁	2	3	3	3	2	0	0	2	2	2	2	2	3	0	0	3	29
2	P ₂	3	0	1	4	4	4	4	4	3	3	2	2	0	0	3	39
0	0	P ₃	0	1	0	0	2	0	1	2	1	3	3	0	1	2	16
0	0	2	P ₄	3	2	0	0	0	1	2	0	2	2	0	0	2	16
0	0	3	2	P ₅	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3	10
0	0	3	0	2	P ₆	0	0	0	0	0	3	2	2	0	4	4	20
0	0	3	0	0	0	P ₇	2	2	2	1	2	2	3	0	3	4	24
0	0	3	0	3	0	0	P ₈	2	2	3	4	0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

Cause

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.

از نمودار علت-اثر رسم شده آشکار می‌گردد که پارامتر ۱۷ یعنی ناپایداری بالقوه کاملاً تحت اثر سیستم بوده و در عوض پارامترهای ۱، ۲ و ۷ یعنی لیتولوژی، گسل‌ها، چین‌ها و جهت‌یافتگی درزه‌ها بیشترین تسلط را بر سیستم دارند. با به دست آوردن مجموع علت و اثرها برای هر پارامتر

تا تفاوت میان اثرات متقابل زیاد و کم را نشان دهند. 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 کوچک تری را دارا هستند. نمودار علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در پروژه بسیار حائز اهمیت بوده و قادر است اثرات متقابل سودمند و غیرسودمند از نظر مهندسی را مشخص سازد. محاسبه میزان اندرکنش به



شکل ۴- نمودار علت-اثر برای مسئله پایداری شیب‌های سنگی جاده خوش‌بیلاق

بدیهی است که پارامتر "ناپایداری بالقوه" در این مورد استفاده نشده و به این دلیل تعداد پارامترهای نشانگر ۱۶ عدد می‌باشد. برخی پارامترها به صورت کیفی و برخی دیگر کمی تشریح شده‌اند. به همین دلیل، امکان وارد کردن مقادیر واقعی پارامتر به طور مستقیم در محاسبه اندیس ناپایداری ممکن نبوده و بنابراین یک رده‌بندی برای کلاس‌های مختلف کیفیت‌ها و مقادیر پارامترها تعیین شده است. به ترکیب مقادیر پارامترها و کلاس‌های اختصاص‌یافته برای آنها در اصطلاح منوهای رده‌بندی اطلاق می‌شود که در عمل، مقادیر پارامترها از این منوهای رده‌بندی انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، سه کلاس برای مقادیر هر پارامتر در نظر گرفته شده است که صفر برای "سهم کم"، یک برای "سهم" و دو برای "سهم زیاد" پارامترها تعیین شده است. بنابراین رتبه‌های بالاتر به کلاس‌هایی از مقادیر پارامترها اختصاص می‌یابند که در ارتباط با ناپایداری بیشتری می‌باشند (جدول ۲).

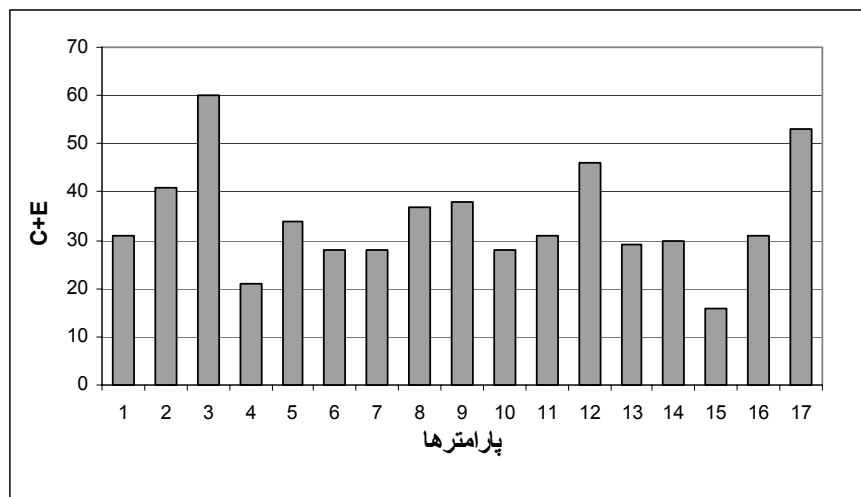
در ادامه هر یک از پارامترها جداگانه تشریح می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که به‌دست آوردن شرایط محیطی و منطقه‌ای برای برخی پارامترها مستلزم برداشت‌های صحرائی، نمونه‌برداری و کارهای آزمایشگاهی بوده است که در این موارد به علت تفصیل زیاد از آوردن جزئیات داده‌های به‌دست آمده خودداری شده و تنها به ارائه رده‌بندی‌های اختصاص یافته اکتفا شده است.

(C+E) می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم کرد که در آن پارامترها با توجه به مجموع یاد شده به ترتیب قرار می‌گیرند (شکل ۵). 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.

تشکیل منوهای رده‌بندی و به‌دست‌آوردن اطلاعات موردنیاز

با اینکه تا این مرحله از کار، شدت اندرکنش نسبی به صورت اهمیت پارامترها سنجیده شده است، لازم است که مقادیر واقعی پارامترها وارد بحث شده و داده‌های ورودی با جزئیات کامل از منطقه مورد مطالعه به دست آیند. برای این منظور، لیست ۱۶ پارامتر وابسته در منطقه جاده خوش‌بیلاق در نظر گرفته شده و اطلاعات برای ۱۵ شیب سنگی جمع‌آوری شد.



شکل ۵- هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها

جدول ۲- منوهای رده‌بندی در نظر گرفته شده برای پارامترها

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

زمین‌شناسی و لیتولوژی

زمین‌شناسی و لیتولوژی تشکیل‌دهنده منطقه و شیب‌های سنگی به گونه‌ای به صورت کیفی بیان شده است که بتوان اغلب شیب‌ها را رده‌بندی نمود. در این منو، ماسه‌سنگ خاکستری رده صفر، ترکیب ماسه‌سنگ و آهک مارنی رده یک و آهک مارنی رده دو را دارا است.

گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها

برای گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها در یک شیب سنگی در صورت عدم وجود، رده صفر، وجود پدیده‌ها به صورت گسل‌ها و چین‌های فرعی و جزئی رده یک و دیده شدن گسل‌ها و چین‌های اصلی رده دو در نظر گرفته شده است. گسل‌ها و چین‌های جزئی، مربوط به مواردی هستند که علائم و نشانه‌های حرکت نسبی بلوک‌های سنگی در اثر آنها قابل مشاهده است. وجود گسل‌ها و چین‌های اصلی به شیب‌هایی ارجاع داده می‌شود که وجود این پدیده‌ها در آنها در امتداد و

موازی با روند گسل‌های اصلی منطقه بوده و معمولاً همراه با افزایش فراوانی درزه‌ها و شکستگی‌ها و خردشدگی موضعی سنگ‌ها در آن راستا و امتداد است.

ناپایداری پیشین

وجود ناپایداری پیشین در شیب‌های سنگی در سه کلاس غیرفعال، ساکن و فعال رده‌بندی شده است (با رده‌های صفر، یک و دو). با توجه به تعریف ارائه شده توسط وارنر (۱۹۷۸)، 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 بلوک‌های آنها در حال حاضر وجود ندارد ولی حرکت یا شکست ممکن است دوباره رخ دهد، و شیب‌های فعال شیب‌هایی هستند که هم اکنون در آنها بلوک‌های سنگی در حال حرکت می‌باشند.

مقاومت سنگ بکر

پس از انجام نمونه‌برداری‌ها، مغزه‌گیری و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره مقادیر متوسط این پارامتر برای شیب‌های سنگی منطقه با توجه به لیتولوژی موجود در آنها محاسبه شده و در رده‌بندی‌ها با سه کلاس مشخص شده‌اند. رده‌های بالاتر مربوط به مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره کمتر هستند.

تعداد دسته‌درزه‌ها و جهت‌یافتگی

برداشت کاملی از درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در شیب‌های سنگی مورد مطالعه انجام گرفته و اطلاعات جمع‌آوری شده برای هر شیب بر روی شبکه‌های قطبی رسم گردید. با استفاده از پلات‌های کتوری، دسته‌درزه‌های 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 دسته‌درزه‌ها) تعیین شوند. بنابراین در رده‌بندی‌ها از تعداد دسته‌درزه‌های اصلی و جهت‌های اصلی ناپایداری استفاده شد، بدین ترتیب که رده‌های بالاتر به تعداد بیشتر دسته‌ها یا جهت‌های ناپایداری نسبت داده شد.

بازشدگی، تداوم و فاصله‌داری درزه‌ها

برای این پارامترها، پس از برداشت تمام شیب‌های سنگی مورد مطالعه، میانگین تعداد آنها منظور شده است. برای فاصله‌داری، کلاس‌های بالاتر به مقادیر کمتر پارامترها اختصاص یافته است، ولی برای بازشدگی و تداوم عکس این حالت در نظر گرفته شده است.

خصوصیات مقاومت برشی درزه‌ها

در مورد شیب‌های سنگی منطقه، مقدار مشخصه پارامترهای چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) برای درزه‌ها با انجام آزمایشات مقاومت برشی بر روی نمونه‌هایی از درزه‌های طبیعی برداشت شده از رخساره شیب‌ها تعیین گردید. برای رسیدن به یک پارامتر واحد، با استفاده از معیار مقاومت برشی برای درزه‌های سنگی انتخاب شده و مقاومت

برشی حداکثر (τ_p) درزه‌ها در تنش قائم (σ_n) یکسان به دست آمد. رابطه بین مقاومت برشی حداکثر (τ_p) و تنش عمودی (σ_n) را می‌توان به صورت معادله مور-کولمب (Mohr-Culomb) نمایش داد:

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

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

شرایط هیدرولیکی

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

ابعاد و زاویه شیب‌ها

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

میزان بارندگی و یخ‌زدگی و آب شدن

به دلیل این که تمام شیب‌های سنگی مورد مطالعه از شرایط آب و هوایی یکسانی برخوردارند (اداره کل آمار و فناوری اطلاعات، ۱۳۸۵)، رده‌بندی‌های یکسانی را از نظر میزان بارندگی و تعداد چرخه‌های یخ‌زدگی و آب شدن کسب خواهند کرد. با این حال، منوهای رده‌بندی به گونه‌ای کلاس‌بندی شده‌اند که بتوانند تغییرات نهایی در شرایط جوی محیط را در نظر گرفته و تأثیر آن را بر پتانسیل ناپایداری منعکس کنند. برای پارامتر بارندگی، میزان سالیانه و برای پارامتر یخ‌زدگی و آب شدن، تعداد چرخه‌ها در سال با توجه

به تغییرات دمایی در طول فصول مختلف در نظر گرفته شده است. با افزایش این مقادیر، رده‌بندی‌ها به کلاس‌های ناپایدارتر تخصیص می‌یابند.

رده‌بندی شیب‌های سنگی منطقه از نظر میزان ناپایداری

با توجه به هیستوگرام شدت اندرکنش (شکل ۵) می‌توان دریافت که امکان حذف هیچ یک از پارامترها وجود ندارد و هر ۱۶ پارامتر تأثیرگذار در منطقه بایستی در محاسبه میزان ناپایداری‌ها در نظر گرفته شوند. جزئیات مربوط به محاسبه پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است. مقادیر اختصاص داده شده به هر شیب (از ۱ تا ۱۶) با توجه به رده‌بندی‌های تعریف شده در جدول ۲ است. در ردیف‌های انتهایی جدول، مقادیر C+E و مقادیر نرمالایز شده آن به جمع کل قابل مشاهده‌اند. در ردیف آخر این جدول، a_i به عنوان ضریب وزنی هر پارامتر آورده شده است که حاصل مقیاس‌بندی مقدار نرمالایز شده قبلی با حداکثررتبه هر پارامتر در نمونه‌های رده‌بندی MP_{ij} است (رابطه ۲).

$$a_i = \frac{1}{MP_{ij}} \times \frac{(C+E)}{\sum_i (C+E)} \% \quad (2)$$

به این ترتیب می‌توان اندیس ناپایداری شیب‌ها SII (Slope Instability Index) را از رابطه ۳ محاسبه نمود:

جدول ۳- محاسبه اندیس‌های ناپایداری برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه

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

جدول ۴- کلاس‌بندی پیشنهادی برای شیب‌های سنگی منطقه

مورد مطالعه

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

با توجه به کلاس‌بندی ارائه شده، شیب‌های سنگی منطقه مورد مطالعه رده‌بندی شده‌اند که نتایج آن در جدول ۵ درج شده است. همان طور که از جدول مذکور مشاهده می‌گردد، از تعداد ۱۵ شیب مورد مطالعه، ۴ شیب در کلاس کاملاً ناپایدار، ۵ شیب ناپایدار، ۴ شیب تاحدی ناپایدار، یک شیب پایدار و یک شیب نیز کاملاً پایدار رده‌بندی گردیده است.

جدول ۵- رده‌بندی نهایی به دست آمده برای شیب‌های سنگی

مورد مطالعه

شماره شیب سنگی	اندیس ناپایداری (SII)	کلاس اختصاص یافته	وضعیت پایداری
S1	۴۵/۴۸۱	متوسط	تاحدی ناپایدار
S2	۵۰/۸۵۱	بد	ناپایدار
S3	۶۲/۵۷۱	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S4	۵۳/۴۹۷	بد	ناپایدار
S5	۲۵/۹۹۲	خیلی خوب	کاملاً پایدار
S6	۳۲/۰۴۲	خوب	پایدار
S7	۵۳/۶۸۶	بد	ناپایدار
S8	۵۲/۰۷۹	بد	ناپایدار
S9	۶۳/۶۱۱	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S10	۶۳/۷۰۵	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S11	۶۶/۳۵۲	خیلی بد	کاملاً ناپایدار
S12	۴۶/۹۷۵	متوسط	تاحدی ناپایدار
S13	۴۱/۶۸۲	متوسط	تاحدی ناپایدار
S14	۴۴/۶۱۲	متوسط	تاحدی ناپایدار
S15	۵۵/۴۸۲	بد	ناپایدار

اعتبارسنجی نتایج

در این بخش نتایج و کلاس‌های به دست آمده از روش RES برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه در منطقه، با نتایج روش

تجربی (Slope Mass Rating) SMR مقایسه شده و بدین ترتیب رویکرد به کار رفته در این تحقیق مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. روش SMR از جمله روش‌های تجربی است که توسط رومانا (Romana) در سال ۱۹۸۵ برای اولین بار ارائه شد و بعد از آن در سال ۲۰۰۳ اصلاحاتی بر روی آن انجام گرفت (Romana, 1985; Romana et al., 2003). 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 توده‌سنگ RMR (Rock Mass Rating) و محاسبه ضرایب تعدیل مربوط به هندسه شیب و درزه و روش حفاری شیب می‌باشد. در نهایت برای هر شیب مقدار عددی SMR به دست می‌آید که با توجه به کلاس‌بندی‌های مربوطه (جدول ۶)، میزان ناپایداری و کلاس اختصاص یافته به آن مشخص می‌گردد.

جدول ۶- کلاس‌بندی شیب‌های سنگی در روش تجربی SMR (Romana, 1985)

کلاس	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 شد. در ابتدا مقدار RMR هر شیب محاسبه شده و سپس ضرایب تعدیل مربوط به هندسه شیب و درزه و روش حفاری شیب به دست آمد تا مقادیر نهایی SMR برای هر شیب مشخص گردد. مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای مذکور در جدول ۷ قابل مشاهده‌اند.

با مقایسه میان کلاس‌های داده شده به هر شیب توسط دو روش RES و SMR مشاهده می‌شود که تطبیق نسبتاً خوبی

جدول ۷- محاسبه مقادیر SMR برای شیب‌های سنگی مورد مطالعه

وضعیت پایداری	مقدار SMR	ضرایب تعدیل				مقدار RMR	شماره شیب سنگی
		F ₄	F ₃	F ₂	F ₁		
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

بر ایجاد ناپایداری در آنها (۱۶ پارامتر) انتخاب شدند. سپس با تشکیل ماتریس تأثیر متقابل با استفاده از این پارامترها برای شیب‌های منطقه و شناسایی تأثیر هر جفت از پارامترها بر روی یکدیگر، این ماتریس کدگذاری شد. به این صورت اثر نسبی هر پارامتر بر سیستم و به عکس به صورت عددی محاسبه شد. در این میان پارامترهایی از قبیل ناپایداری پیشین، ناپایداری بالقوه، شرایط هیدرولیکی و تا حدی گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها بیشترین اندرکنش را در سیستم داشتند. با تشکیل منوهای رده‌بندی، هر پارامتر به صورت کمی یا کیفی کلاس‌بندی شده و سپس اندیس ناپایداری به صورت فرمول ریاضی برای منطقه تعیین شد. با توجه به شرایط شیب‌های سنگی در هر ایستگاه و به دست آوردن داده‌های مربوط به خواص مکانیکی سنگ‌ها، درزه‌های سنگی و شرایط حاکم بر منطقه، اندیس‌های خاص هر شیب سنگی مورد محاسبه قرار گرفت. بدین ترتیب رده‌بندی جامعی از ایستگاه‌ها و در نتیجه شیب‌های منطقه ارائه گردید. طی این رده‌بندی، شیب‌های سنگی مورد مطالعه در کلاس‌های نهایی وضعیت پایداری شامل کاملاً ناپایدار، ناپایدار، تاحدی پایدار، پایدار و کاملاً پایدار قرار گرفته و وضعیت آنها در این کلاس‌بندی تعیین گردید. در نهایت، با بکارگیری یک روش تجربی و تحلیل

میان نتایج دو روش وجود دارد، به طوری که برای ۱۰ شیب سنگی از ۱۵ شیب مورد مطالعه کلاس‌های پایداری یکسانی توسط دو روش به دست آمده است و در پنج شیب سنگی باقیمانده نیز اختلاف تنها در حد یک کلاس پایداری می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که رویکرد سیستمی در مورد منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، تخمین‌های نسبتاً نزدیکی را به یک روش تجربی معروف تحلیل پایداری شیب‌ها داشته است.

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه رویکرد RES به عنوان یک روش سیستمی در تحلیل‌ها و رده‌بندی‌های پروژه‌های پیچیده مهندسی سنگ مطرح می‌باشد. در این رویکرد، تأثیر متقابل پارامترهای مؤثر بر یکدیگر در مقیاسی برابر سنجیده شده و بدین ترتیب اثر هر پارامتر در میزان تولید ناپایداری مورد توجه قرار می‌گیرد. به همین دلیل، رده‌بندی‌های حاصل از این روش بسیار قابل اطمینان بوده و نمایی کامل از وضعیت منطقه ارائه می‌گردد. بدین ترتیب در این تحقیق، پس از انجام بازبینی‌ها از منطقه مورد مطالعه و بررسی شرایط محیطی، تعیین ایستگاه‌ها و سنجش وضعیت شیب‌های سنگی، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر

سپاسگزاری

این پژوهش با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است. لذا بدینوسیله از حمایت‌ها و کمک‌های دریافت شده از دانشگاه سپاسگزاری و قدردانی می‌گردد.

پایداری شیب‌های مورد نظر، یک اعتبارسنجی اولیه برای کاربرد رویکرد سیستمی در منطقه مورد مطالعه انجام شد. مقایسه‌ها تطبیق نسبتاً خوبی را میان نتایج دو روش نشان دادند.

منابع

- اداره کل آمار و فناوری اطلاعات (۱۳۸۵) سالنامه آماری هواشناسی. ناشر سازمان هواشناسی کشور.
- مؤسسه جغرافیایی ایران (۱۳۸۰) اطلس راه‌های ایران. مؤسسه جغرافیایی، کارتوگرافی و گیتاشناسی.
- Ali K.M., Hasan K. (2002) Rock mass Characterization to indicate slope instability in Bandarban: a rock engineering systems approach. *Environmental and Engineering Geoscience*, Vol. 8, No. 2, pp. 105-119.
- Budetta P., Santo A., Vivenzio F. (2008) Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology*, Vol. 94, pp. 340-352.
- Castaldini D., Genevois R., Panizza M., Puccinelli A., Berti M., Simoni A. (1998) An integrated approach for analyzing earthquake-induced surface effects: a case study from the Northern Apennins, Italy. *Journal of Geodynamics*, Vol. 26, No. 2-4, pp. 413-441.
- Ceryan N., Ceryan S. (2008) An application of the interaction matrices method for slope failure susceptibility zoning: Dogankent settlement area (Giresun, NE Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67, No. 3, pp. 375-385.
- 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.
- Hill J.D., Warfield, J.N. (1972) Unified program planning. In: *System Engineering: Methodology and Applications* Edited by A.P. Sage, IEEE Press, New York, NY.
- Hudson J.A. (1992) *Rock Engineering Systems, Theory and Practice*. Ellis Horwood Ltd., Chichester. 185 p.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P. (1992) A new approach to studying complete rock engineering problems. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, pp. 93-105.
- ISRM (1981) *Rock characterization, testing and monitoring- Suggested methods*, Part 1: Site characterization, Brown, E.T. (ed.), Pergamon.
- Mazzoccola D.F., Hudson J.A. (1996) A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 29, pp.37-56.
- Romana M. (1985) New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics ISRM*. Zacatecas, pp. 49-53.
- Romana M., Serón J.B., Montalar E. (2003) SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. In: *Proceedings of the ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 981-984.
- 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*, Vol. 5, No. 3, pp. 261-270.
- Smith G.J. (1994) *The engineering geological assessment of shallow mine workings with particular reference to chalk*. PhD Thesis, University of London.
- Varnes D.J. (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds.) *Landslides Analysis and Control*. Transportation Research Board Special Report 176. National Academy of Sciences, Washington
- 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*, Vol. 41, No. 3, pp. 833-838.