

مدیریت ریسک لغزش دامنه‌های خاکی و سنگی در عملیات عمرانی و معدنی (قسمت اول)

رضا نصیرزاده قورچی، کارشناس ارشد مکانیک سنگ دانشکده معدن دانشگاه تهران

حسین معماریان، استاد دانشکده معدن دانشگاه تهران

مهدی امینی، استادیار دانشکده معدن دانشگاه تهران

چکیده

ناپایداری دامنه‌های طبیعی و مهندسی مخاطرات زیادی را برای فعالیت‌های عمرانی و معدنی ایجاد می‌کند. رویکرد مدیریت ریسک به عنوان یکی از رویکردهای جدید در زمینه سنجش ایمنی و تصمیم‌گیری درباره لغزش دامنه‌ها محسوب می‌شود. با جهت‌گیری صحیح این رویکرد می‌توان اطلاعات ارزشمندی به دست آورد که از سایر روش‌های مرسوم، قابل دستیابی نیست. در واقع لغزش دامنه‌ها، همیشه به نوعی از تحلیل‌های ریسک نیاز دارند تا علاوه بر تحلیل پایداری درست آنها، هزینه‌های ناشی از شکست احتمالی را نیز کاهش دهند. اگر فرآیندهای تأثیرگذار چه عوامل انسانی و چه عوامل طبیعی به طور مؤثرتری شرایط استاتیکی دامنه‌ها را تغییر دهند، می‌توانند باعث ناپایداری دامنه‌ها شوند، به طوری که به ندرت می‌توان ناپایداری دامنه‌ها را به یک عامل نسبت داد. بنابراین بایستی معیارهایی برای ایمنی لغزش دامنه‌ها توسعه داده شود که علاوه بر در نظر گرفتن فاکتورهای مؤثر در پایداری دامنه‌ها، پیامدهای شکست را نیز در نظر بگیرند. در این مقاله، ابتدا مدیریت ریسک لغزش دامنه‌ها ارائه و به بررسی فرآیند آن پرداخته می‌شود. سپس خلاصه‌ای از مطالعات موردی که در آنها مدیریت ریسک به طور موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است، تشریح می‌شود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت ریسک می‌تواند به خوبی برای تعیین سطح ریسک دامنه‌های معادن روباز، راه‌ها، مناطق شهری و غیره مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین با این روش می‌توان چندین دامنه مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد و به اولویت‌بندی اقدامات کاهش خطر پرداخت.

واژه‌های کلیدی: ناپایداری دامنه‌ها، لغزش، مدیریت ریسک، پیامدهای شکست

۱- مقدمه

مناسب روش FoS برای طراحی دامنه‌ها، استفاده از روش احتمالاتی است. این روش بر پایه احتمال شکست^(۴) (PoF) دامنه، استوار است. در روش PoF، همه پارامترهای مورد بررسی در تحلیل پایداری، به صورت عدم قطعیت در محاسبات، اعمال و باعث می‌شود تا مقدار خطا یا عدم قطعیت ضریب ایمنی برآورد شود. علی‌رغم آنکه روش PoF نسبت به روش FoS، مزایای زیاد دارد ولی همچنان مشکل اساسی تعریف معیار مجاز طراحی، در این روش نیز باقی است. همچنین در این روش همانند روش FoS،

ارتقای روش‌های تحلیل و طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی و معدنی همواره مورد توجه محققان قرار داشته و توسعه و تکامل قابل توجه آنها دلیلی بر این مدعی است. روش قدیمی طراحی دامنه‌ها^(۱) (شیروانی‌ها) بر پایه محاسبه فاکتور ایمنی (FoS)^(۲) است. در این روش تمامی پارامترها تک مقداری بوده، عدم قطعیت‌ها^(۳) را شامل نمی‌شود و قاعده‌ای اصولی و دقیق برای انتخاب مقادیر مجاز فاکتور ایمنی وجود ندارد. در نتیجه جایگزین

1-Slope

2-Factor of safety (FoS)

3-Uncertainty

4-Probability of failure (PoF)

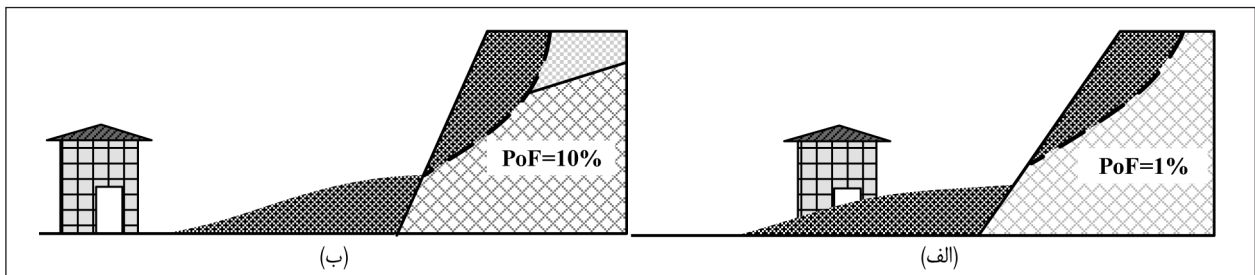
پیامد شکست در نظر گرفته نمی‌شود؛ به طوری که ممکن است با استفاده از این روش، ایمنی یک دامنه با احتمال شکست بالا (فاکتور ایمنی کم) و با فاصله زیاد از سازه، نسبت به دامنه دیگر با احتمال شکست پایین (فاکتور ایمنی بالا) که نزدیک به سازه قرار دارد، کمتر به دست آید.

برای روشن شدن مطلب مطابق شکل ۱، اگر دو دامنه با احتمال شکست متفاوت و به فواصل مختلف از سازه در نظر گرفته شوند، در این حالت روش‌های FOS و PoF، دامنه (ب) را خطرناک قلمداد کرده و پایدارسازی آن را نسبت به دامنه (الف) ارجح می‌دانند. در حالی که نگرش تحلیل ریسک،^(۱) دامنه (الف) را با خطر بالا در نظر می‌گیرد. زیرا به سازه نزدیک‌تر بوده و در صورت ناپایداری می‌تواند پیامد ناگواری داشته باشد.

است. در ادامه، به بررسی مراحل مدیریت ریسک لغزش دامنه‌ها پرداخته می‌شود.

۲- مروری بر تحقیقات گذشته

"اینشتین" در سال ۱۹۸۸، ارزیابی ریسک لغزش دامنه‌ها را مطرح کرد [۱]. مطابق با نظر این محقق، برای ارزیابی ریسک لغزش یک دامنه، می‌توان احتمال شکست آن را در پیامد ناشی از ناپایداری ضرب و ریسک لغزش را تعیین کرد. از آن پس، تاکنون، مطالعات گسترده‌ای برای مدیریت ریسک لغزش دامنه‌ها انجام شده است، که به برخی از آنها اشاره می‌شود. "پیرسن و همکاران" (۱۹۹۰)، یک سیستم امتیازدهی برای ارزیابی ریسک سقوط سنگ‌ها در جاده‌ها و بزرگراه‌ها ارائه کرده‌اند [۲]. "پین و روبردز"



شکل ۱- پیامد رویداد شکست در دو ترانسه (الف) هزینه‌زایی بالا؛ (ب) هزینه‌زایی کم

با توجه به توضیحات گفته شده، مدیریت ریسک^(۲) با در نظر گرفتن پیامد شکست علاوه بر اینکه مشکل روش‌های FOS و PoF را در ارتباط با معیارهای طراحی برطرف می‌کند، بلکه با ارائه دستورالعمل‌های مناسب به تحلیل ریسک پرداخته و هزینه‌های بعدی ناشی از شکست دامنه‌ها را نیز به حداقل می‌رساند. بنابراین مدیریت ریسک یک روش منعطف نسبت به روش‌های FOS و PoF است. همچنین مدیریت ریسک این فرصت را به متخصصان می‌دهد که بسیاری از داده‌های اولیه مهم را برای تصمیم‌گیری‌های ایمنی در نظر بگیرند و با ارزیابی‌های کمی و کیفی، به تکمیل اطلاعات خود و نهایتاً اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مناسب چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ عملکردی بپردازند. به طور کلی هدف از تحلیل ریسک، شناسایی و مدیریت عوامل خطر و پیامدهای آنها

در سال ۲۰۰۵ ارزیابی کمی ریسک^(۳) را برای شکست‌های ترکیبی دامنه بزرگراهی در هنگ کنگ انجام دادند [۳]. استفن و همکاران" (۲۰۰۶)، روشی مبتنی بر آنالیزهای کمی با استفاده از روش‌های درخت عیب‌یابی^(۴) و روش درخت رویداد^(۵) برای طراحی دامنه‌های معادن روباز ارائه کردند [۴]. روش آنالیز حالات بالقوه شکست و آثار آن^(۶)، توسط "جوی و گریفیث" در سال ۲۰۰۷، برای آنالیز ریسک مواد معدنی ارائه شد [۵]. "آلخان و همکاران" در سال ۲۰۰۸، یک روش تجربی برای امتیازدهی ریسک سقوط سنگ‌ها در معادن کواری ارائه دادند [۶]. "ژین و همکاران" (۲۰۱۱)، به تجزیه و تحلیل احتمال شکست سدهای باطله و نتایج حاصل از آن پرداختند. آنها برای محاسبه و برآورد سطح ریسک، از روش ماتریس رتبه‌بندی ریسک^(۷) و برای آنالیزها، از روش‌های کمی و

- 1-Risk
- 2-Risk management
- 3-Quantitative risk assessment
- 4-Fault tree analysis
- 5-Event tree analysis
- 6-Failure mode and effect analysis
- 7-Risk ranking matrix

کیفی بهره گرفتند [۷]. "سانتوس و همکاران" در سال ۲۰۱۲ مفاهیم، اصول، مفروضات و قواعد اصلی روش آنالیز حالات بالقوه شکست و آثار آن را برای سدهای باطله معرفی کردند و در آنالیزهای خود از روش‌های کیفی بهره برده‌اند. آنها همچنین بیان کردند هر چند این روش پیچیده و وقت‌گیر است ولی می‌تواند نتایج بسیار مفیدی در اختیار بگذارد [۸]. "میگنلی و همکاران" (۲۰۱۲)، روش مدیریت ریسک سقوط سنگ‌ها را برای جاده‌ها ارائه کرده و در ارزیابی‌های خود از آنالیز درخت رویداد استفاده کرده‌اند [۹]. "یانگ و همکاران" (۲۰۱۳)، روش ماتریس ریسک را برای ارزیابی ریسک سیل ناشی از شکست سدها به‌کار برده‌اند. این روش به صورت موفقیت‌آمیزی برای سدی واقع در جنوب تایوان استفاده شد [۱۰].

۳- مفهوم خطر و ریسک

خطر، احتمال وقوع یک حادثه با پتانسیل آسیب‌رسانی (لغزش دامنه) می‌باشد که در واحد زمان رخ می‌دهد. این احتمال

با شدت حادثه متغیر است (عموماً لغزش‌های کوچک بیشتر از لغزش‌های بزرگ، رخ می‌دهند). در نتیجه، خطر لغزش دامنه‌ها برحسب "بزرگی" (۱) بالقوه آنها و "احتمال" وقوعشان تخمین زده می‌شود. با این تعریف خطر، بیان‌کننده موقعیت و شرایطی است که برای مکانی مشخص تعیین و به‌کار برده می‌شود و می‌تواند شامل یک جایگاه، معدن، واحد منطقه‌ای از سطح زمین، پهنه و یا ساختگاهی مانند شریان‌های حیاتی و سدهای هیدرولیکی و غیره باشد [۱۱].

مفهوم بزرگی به حجم موادی که ممکن است گسیخته شود، سرعت حرکت در طول لغزش و محدوده‌ای که ممکن است تأثیر پذیرد، اطلاق می‌شود. بزرگی در درجه اول به شکل رویه لغزش و ارتباط آن با زمین‌شناسی، توپوگرافی و شرایط آب و هوایی منطقه بستگی دارد. احتمال وقوع لغزش نیز بیش از همه به شرایط آب و هوایی، لرزه‌خیزی، تغییر در شیب دامنه و عوامل زودگذر دیگر وابسته است [۱۲]. جدول ۱ تقسیم‌بندی درجه‌های مختلف خطر وقوع لغزش دامنه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- تقسیم‌بندی درجه‌های مختلف خطر وقوع لغزش دامنه [۱۲].

<ul style="list-style-type: none"> ● بدون خطر: امکان لغزش دامنه، تحت شرایط قابل پیش‌بینی وجود ندارد. ● خطر کم: لغزش کامل دامنه ممکن است در شرایط بسیار نامناسبی که احتمال وقوعشان کم است، اتفاق بیافتد. خطر کم، همچنین برای جایی که حجم و محدوده متاثر از لغزش بالقوه کم است ولی احتمال وقوع لغزش زیاد است، به کار می‌رود. ● خطر متوسط: دامنه ممکن است در آینده و در یک شرایط نامناسب گسیخته شود و حجم نسبتاً بزرگی از مواد بر اثر این شکست ممکن است جابجا شود، حرکت نسبتاً آهسته بوده و منطقه تأثیر پذیرفته به منطقه گسیخته شده و بخش محدودی از پایین دست آن خلاصه می‌شود (جابه‌جایی متوسط). ● خطر زیاد: تقریباً مسلم است که دامنه در آینده‌های نزدیک و تحت شرایط نامناسب ولی عادی (مثل بارندگی‌های شدید)، دچار لغزش شده و در نتیجه، حجم زیاد تا بسیار زیادی از مواد جابه‌جا خواهد شد یا اینکه دامنه، ممکن است تحت شرایط نامناسب (احتمال متوسط) گسیخته شود ولی حجم بالقوه مواد و محدوده متاثر از آن بسیار بسیار بزرگ بوده و سرعت حرکت نیز بسیار زیاد باشد.

معمولاً در ارتباط با ریسک سه سطح از ریسک وجود دارد که عبارتند از [۱۴]:

- ریسک ذاتی (۲)، سطحی از ریسک است که در سیستم وجود دارد و بایستی سطح آن را با روش‌های مهندسی کاهش داد. از آنجایی‌که ریسک‌ها همیشه حضور دارند، نمی‌توان آنها را به طور کامل حذف کرد.

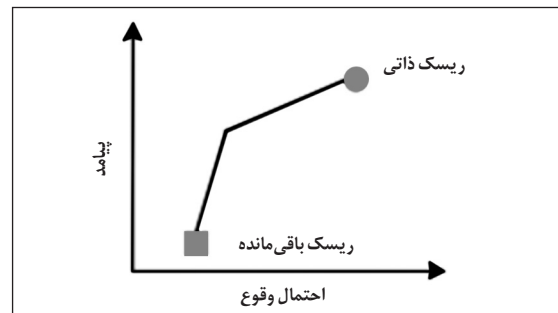
تأثیر لغزش دامنه‌ها بر فعالیت‌های بشری و سازه‌های مهندسی صرف‌نظر از خطر آنها، ریسک نام دارد. ریسک چیزی است که ممکن است اتفاق بیافتد و در صورت وقوع، اثر نامطلوبی بر پروژه خواهد گذاشت [۱۳] معمولاً درجه‌بندی ریسک، بر مبنای نوع سازه مهندسی و آثار ناشی از لغزش انجام می‌شود. جدول ۲، انواع گروه‌های تقسیم‌بندی ریسک لغزش دامنه‌ها را نشان می‌دهد.

<p>● بدون ریسک: لغزش دامنه، فعالیت‌های بشر را متاثر نخواهد ساخت.</p> <p>● ریسک پایین: بر اثر لغزش، ناراحتی‌هایی ایجاد می‌شود ولی حیات انسان‌ها و مایملک آنها تهدید نمی‌شود. مثل افتادن یک قطعه کوچک سنگ یا خاک از دامنه به داخل جاده که بخش کوچکی از راه را می‌بندد و به سهولت می‌توان آن را جابه‌جا کرد.</p> <p>● ریسک متوسط: لغزش، ناراحتی‌های شدیدتری را باعث می‌شود که با کوشش بیشتر برطرف می‌شود ولی غالباً به طور مستقیم حیات انسان‌ها و سازه‌های مهندسی را تهدید نمی‌کند. مثل لغزش خرده سنگی که بر روی راهی ریخته می‌شود و تا برداشته شدنش راه را می‌بندد.</p> <p>● ریسک بالا: بر اثر لغزش ممکن است سازه‌های مهمی کاملاً از دست برود یا به عنوان مثال راه برای مدتی به طور کامل بسته شود، ولی در خلال لغزش، الزاماً جان انسان‌ها در خطر نیست.</p> <p>● ریسک بسیار بالا: در زمان لغزش علاوه بر صدماتی که بر سازه‌ها وارد می‌شود، جان انسان‌ها نیز در خطر است. مثل تخریب سازه‌های مسکونی یا یک خط‌آهن، در جایی که فرصت کافی برای آگاه‌اندن قبلی ساکنان وجود نداشته باشد.</p>

قضاوت‌ها و تصمیم‌گیری‌های مهندسی توسط مهندسان عمران، معدن و زمین‌شناسی به تحلیل و مدیریت ریسک پرداخت. شناسایی عوامل ریسک‌زا و آگاهی از میزان و نوع تأثیرات، ارزیابی و رتبه‌بندی درست آنها، گامی اساسی در ارزیابی صحیح و نشان دادن عکس‌العمل به موقع به ریسک‌ها شده و باعث پایین آمدن احتمال حوادث ناخواسته می‌شود. به طوری که امروزه، سرمایه‌گذاری در پروژه‌ها به شدت تحت تأثیر عناصر ریسک^(۳) بوده و تصمیم‌گیری برای تأمین مالی با در نظر گرفتن ریسک و مدیریت آن اتخاذ می‌شود. عناصر ریسک می‌تواند، انواع سازه‌های مهندسی و فعالیت‌های بشری را شامل شود. از آن جمله [۱۲]:

- یک ساختمان مسکونی، یک روستا یا حتی یک شهر بزرگ
- کارخانه‌ها و نیروگاه‌ها
- زمین‌های کشاورزی و جنگلی
- عملیات معدنکاری روباز و استخراج زیرزمینی مواد معدنی
- راه‌ها و مسیرهای حمل و نقل و تونل‌های در دست احداث یا در حال بهره‌برداری
- سازه‌های هیدرولیکی مانند سدها، کانال‌های انحرافی و سرریزها
- مخازن و دریاچه‌ها
- لوله‌های گاز، آب و فاضلاب، خطوط تلفن و برق
- تأثیر غیر مستقیم مثل بسته شدن دهانه یک درّه توسط یک لغزش و ایجاد دریاچه‌ای در پشت آن، که در صورت تخریب ثانوی

- ریسک باقیمانده^(۱)، به سطحی از ریسک اطلاق می‌شود که علی‌رغم کاستن سطح ریسک همچنان وجود دارد.
- ریسک مجاز^(۲)، سطحی از ریسک باقیمانده است که اگر چه وجود دارد اما مانعی جدی بر سر راه رسیدن به اهداف و مأموریت‌های سازمان ایجاد نمی‌کند و خطر آن پذیرفته می‌شود.

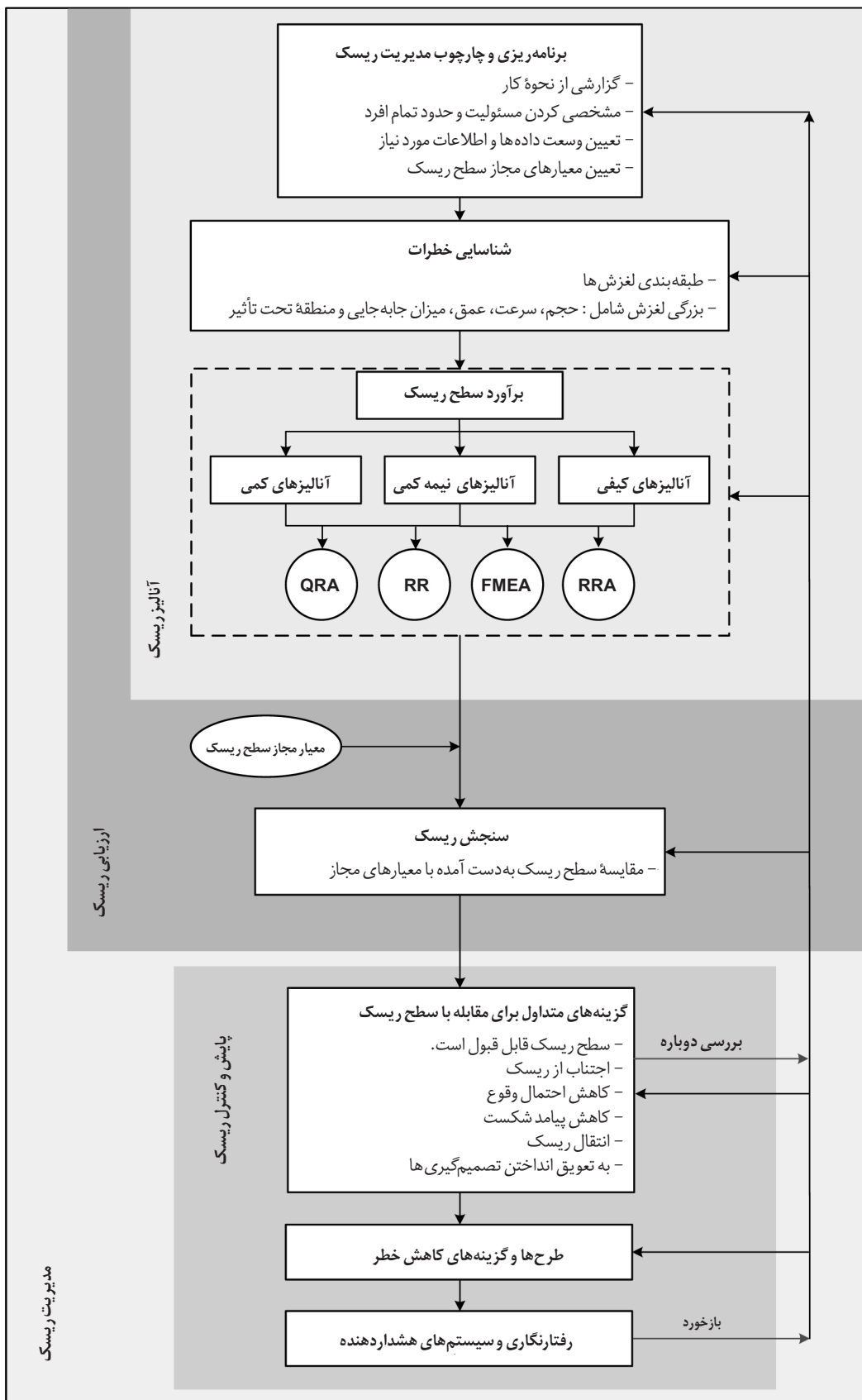


شکل ۲- تعریف سطوح ریسک (برگرفته از منبع [۱۴] با اندکی تغییرات).

در شکل ۲، علامت دایره ناحیه سطح ریسک غیر مجاز یا ریسک ذاتی را نشان می‌دهد که به دلیل بالا بودن سطح ریسک، بایستی سطح آن کاهش یابد تا به مقدار مجاز برسد (علامت مربع). این کاهش سطح ریسک می‌تواند به صورت کاهش احتمال وقوع و یا کاهش پیامد و یا کاهش هر دو صورت پذیرد.

۴- فرآیند مدیریت ریسک

در فرآیند مدیریت ریسک دامنه‌ها، می‌توان با به‌کارگیری



شکل ۳- فرآیند مدیریت ریسک لغزش دامنه‌ها (برگرفته از منبع [۱۵] با اندکی تغییرات)

این سد طبیعی، سیل جاری می‌شود و خسارات زیادی به بار می‌آید. فرآیند مدیریت ریسک لغزش دامنه‌ها، در شکل ۳ نشان داده شده است. در ادامه، هر یک از مراحل مدیریت ریسک شرح داده می‌شوند.

۱-۴- ارزیابی ریسک

ارزیابی ریسک لغزش دامنه‌ها براساس قضاوت مهندسی، چارچوبی از مدیریت و مهندسی تصمیم‌گیری‌های عاقلانه مربوط به ناپایداری دامنه‌ها و دیگر مشکلات ژئوتکنیکی است [۱۶]. انجمن ژئومکانیک استرالیا^(۱) (AGS) (۲۰۰۷) به طور کلی ارزیابی ریسک، لغزش دامنه‌ها را شامل مراحل آنالیز ریسک^(۲) و سنجش ریسک^(۳) معرفی می‌کند [۱۵]. "کورومیناس و همکاران" (۲۰۱۴) توضیح می‌دهند که آنالیز ریسک از اطلاعات موجود برای برآورد ریسک انفرادی^(۴)، گروهی^(۵) (جمعیت)، دارایی‌ها^(۶) و یا محیط زیست استفاده می‌کند. سنجش ریسک نیز مرحله‌ای است که قضاوت‌های مهندسی وارد فرآیندهای تصمیم‌گیری‌هایی از جمله توجه به اهمیت برآورد ریسک‌ها، پیامد اجتماعی، زیست محیطی و اقتصادی می‌شود [۱۷]. در زیر هر دو مرحله آنالیز و سنجش ریسک توضیح داده می‌شوند.

۱-۴-۱- آنالیز ریسک

در حالت کلی آنالیز ریسک شامل مراحل برنامه‌ریزی و چارچوب مدیریت ریسک، شناسایی خطرات و برآورد سطح ریسک است. در واقع آنالیز ریسک به منشأ ریسک‌ها، احتمال وقوع و پیامد آنها توجه دارد.

(الف) برنامه‌ریزی و چارچوب مدیریت ریسک

هدف از فرآیند برنامه‌ریزی مدیریت ریسک، تهیه یک استراتژی کلی مدیریت ریسک به منظور تصمیم‌گیری در خصوص چگونگی انجام فرآیندهای مدیریت ریسک و یکپارچه‌سازی آن با سایر فعالیت‌ها در سطح وسیع‌تر است. به منظور ایجاد منافع بیشتر، برنامه‌ریزی اولیه مدیریت ریسک باید در اوایل پروژه و در قالب برنامه‌ریزی کلی انجام شده و فعالیت‌های مرتبط با مدیریت ریسک با برنامه کلی مدیریت پروژه یکپارچه شود. البته ممکن است در مراحل بعدی، این برنامه، شفاف‌تر شده و یا تغییراتی در آن ایجاد

شود [۱۸]. اجرای مدیریت ریسک باید مرکب از ملاحظات فنی باشد و مشارکت همه طرفین درگیر مثل کارفرما، مدیر پروژه، ناظر، پیمانکار، کارشناسان و طراح را شامل شود [۱۴]. اصلی‌ترین معیارها برای یک برنامه صحیح مدیریت ریسک، تایید توسط ذی‌نفعان، هم‌راستایی با محدودیت‌های داخلی و خارجی در پروژه، توازن بین هزینه، تلاش با منافع و در نهایت کامل بودن با توجه به نیازمندی‌های فرآیند مدیریت ریسک پروژه است. سطح مجاز ریسک در یک پروژه نیز بستگی به نگرش ذی‌نفعان مربوطه، متفاوت است [۱۸].

(ب) شناسایی خطرات

این مرحله از آنالیز ریسک به تجزیه و تحلیل و مدیریت خطرات می‌پردازد و یکی از مهم‌ترین مراحل آنالیز ریسک است. شناسایی جامع خطرات با استفاده از یک فرآیند سیستماتیک سازمان یافته مهم و ضروری است. زیرا اگر خطری در این مرحله شناسایی نشود، ممکن است در مراحل بعدی در آنالیزها در نظر گرفته نشود. هدف این مرحله، شناسایی مکان وقوع، زمان وقوع و اینکه چرا و چگونه ممکن است یک خطر اتفاق بیفتد، می‌باشد. برای شناسایی خطر لغزش‌ها نیاز به درکی از فرآیندهای دامنه‌ها و ارتباط آنها با ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، هیدرولوژی، آب و هوا و پوشش گیاهی است. به طور کلی مراحل شناسایی خطرات محتمل لغزش دامنه‌ها، عبارتند از [۱۹]:

- طبقه‌بندی نوع پتانسیل لغزش: این تقسیم‌بندی‌ها در مرجع [۱۲] ذکر شده‌اند. بایستی توجه داشت که ممکن است در یک دامنه بیش از یک نوع لغزش اتفاق بیفتد. برای مثال ممکن است یک شکست قاشقی همراه با سقوط سنگ و جریان مواد سنگی و خاکی باشد.
- ارزیابی وسعت فیزیکی لغزش‌های محتمل شامل مکان، وسعت ناحیه‌ای و حجم ولو شده.
- ارزیابی فاکتورهای تأثیرگذار در شکست، مشخصات فیزیکی مواد دامنه، مقاومت برشی و فشار آب روزه‌ای و تعیین مکانیزم شکست برای تعیین رفتار پیش شکست^(۷) و پس شکست^(۸).
- محاسبه میزان فاصله جابه‌جایی^(۹) مواد، مسیر حرکت،

1-Australian geomechanics society

2-Risk analysis

3-Risk evaluation

4-Individual

5-Population

6-Property

7-Pre failure

8-Post failure

9-Travel distance

سرعت حرکت مواد، عمق لغزش و حجم درجا.

● شناسایی علائم هشداردهنده پیش شکست با استفاده از برنامه‌های نظارت.

مراحل مکانیزم شکست توسط "لروئیل" توضیح داده شده است. اطلاعات بیشتر در این زمینه در منبع [۲۰] است. انواع روش‌های شناسایی خطرات در ارتباط با لغزش دامنه‌ها، شامل نقشه‌های ژئومورفولوژی، جمع‌آوری اطلاعات گذشته از لغزش‌ها در توپوگرافی‌های مشابه، زمین‌شناسی، آب و هوا، روش‌های رفتارنگاری و نشانه‌های سطحی است [۲۱].

ج) برآورد سطح ریسک

برای برآورد سطح ریسک روش‌های مختلفی ارائه شده که در ادامه به طور مختصر به شرح آن پرداخته می‌شود.

انواع روش‌های برآورد سطح ریسک

روش‌های برآورد سطح ریسک می‌توانند به صورت کمی^(۱)، نیمه کمی^(۲) و یا کیفی^(۳) صورت پذیرند. در هر سه روش، ابتدا باید تمامی خطرات ممکن به خوبی شناسایی شوند تا بتوان یک آنالیز ریسک مناسب برای پروژه مورد نظر انجام داد. در صورت امکان بهتر است برای برآورد سطح ریسک، از آنالیزهای کمی استفاده شود حتی اگر نتایج آن در اصطلاحات کیفی خلاصه شده باشد.

روش‌های آنالیز کیفی

روش‌های کیفی از توصیف کلامی برای احتمال وقوع و پیامد آن استفاده می‌کنند. این روش ممکن است در مراحل اولیه مدیریت ریسک برای شناسایی ریسک‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. تحلیل کیفی ریسک، آسان‌ترین روش برای درک روش‌های تحلیل ریسک است. هدف از تحلیل، جدا کردن ریسک‌های جزئی (قابل قبول) از ریسک‌های اصلی و بزرگ است. این آنالیز ممکن است شامل سیستم امتیازدهی ریسک^(۴) و یا ماتریس رتبه‌بندی ریسک باشد. در برخی موارد می‌توان از این روش در کنار روش‌های کمی همراه با قضاوت‌های مهندسی استفاده کرد [۱۹].

روش‌های آنالیز نیمه کمی

روش‌های نیمه کمی از وزن‌دهی برای توصیف کیفی احتمال وقوع و یا پیامد استفاده می‌کنند. در این روش بایستی مراقب بود مقیاس و یا وزنی که در نظر گرفته می‌شود به خوبی منعکس‌کننده شرایط مورد نظر باشد. آنالیزهای نیمه کمی ممکن است بین ریسک‌ها اختلاف قائل نشوند، به ویژه زمانی که احتمال وقوع و یا اثر پیامد شدید باشد. در برخی موارد ممکن است تا حدی این مشکلات با توصیف کیفی از پیامد و احتمال وقوع برطرف شود. این روش برای رتبه‌بندی و اولویت‌بندی ریسک‌ها مفید است [۲۲].

روش‌های آنالیز کمی

آنالیزهای کمی، اندازه‌گیری احتمال وقوع و میزان تأثیر کمی ریسک‌ها بر اهداف پروژه بیان می‌کنند. تحلیل‌های کمی برای ارائه تخمین‌های واقع‌بینانه از احتمالات پروژه مورد نظر، لازم هستند. در این روش ابتدا باید تمام خطرات ممکن ناشی از یک رویداد، شناسایی شود. لیست خطرات کیفی می‌تواند اساس تحلیل کمی را شکل دهد. این روش به دقت، کامل بودن داده‌های موجود و اعتبار مدل وابسته است. پیامد ممکن است به صورت پولی، فنی، عملیاتی و یا مرگ و میر افراد بیان شود. عدم قطعیت موجود در داده‌ها بایستی در تعیین احتمال وقوع و پیامدهای آن مورد توجه قرار بگیرد. هنگامی که از ابزار و داده‌های معتبر استفاده می‌شود، این روش روشن‌ترین و مفیدترین نتایج را بیان می‌کند [۲۲]. برخی از مزایای روش‌های آنالیز کمی ریسک، عبارتند از [۱۹، ۲۳]:

- سطح ریسک قابل قبول از نظر ایمنی و اقتصادی تعریف می‌شود.
- مقایسه‌ای معنی‌دار بین طراحی‌های مختلف دامنه را ارائه می‌دهد.
- چارچوبی برای عدم قطعیت‌ها و قضاوت‌های مهندسی فراهم می‌کند.
- به طور منطقی، روش سیستماتیکی برای آنالیز ایمنی دامنه‌های طبیعی و مهندسی است.
- اطلاعات دقیقی را برای استفاده در مدیریت ریسک فراهم می‌کند.

- این روش مبنایی برای توجه به گزینه‌های کاهش خطر و آنالیزهای سود و هزینه فراهم می‌آورد. زهکشی،
 - هیدروژئولوژیست‌ها، برای جمع‌آوری اطلاعات بیشتر و بهبود برنامه‌ریزان معادن، برای انعطاف‌پذیری در طراحی دامنه‌ها
 - مهندسان ژئوتکنیک، برای جمع‌آوری اطلاعات بیشتر، بهبود رفتارنگاری دامنه و بهبود عملیات حفاری دامنه،
 - این روش همچنین می‌تواند راهنمایی برای [۲۳]:
 - باشد.

منابع

- [۱] Einstein, H., (۱۹۸۸), "Special lecture: landslide risk assessment procedure", *Proc. ۵th Int. Symp. on Landslides, Lausanne*, pp. ۱۰۷۵-۱۰۹۰.
- [۲] Pierson, L. A., Davis, S. A., and Van Vickle, R., (۱۹۹۰), "Rockfall Hazard Rating System: Implementation Manual".
- [۳] Pine, R. and Roberds, W., (۲۰۰۵), "A risk-based approach for the design of rock slopes subject to multiple failure modes—illustrated by a case study in Hong Kong", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. ۴۲, No. ۲, pp. ۲۶۱-۲۷۵.
- [۴] Steffen, O., Terbrugge, P., Wesseloo, J., and Venter, J., (۲۰۰۶), "A risk consequence approach to open pit slope design", *Proc. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering Situations*, Cape Town.
- [۵] Joy, J. and Griffiths, D., (۲۰۰۷), "National minerals industry safety and health risk assessment guideline version ۶", *Minerals Council of Australia and Minerals Industry Safety and Health Centre*.
- [۶] Alejano, L., Stockhausen, H., Alonso, E., Bastante, F., and Ramírez Oyanguren, P., (۲۰۰۸), "ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. ۴۵, No. ۸, pp. ۱۲۵۲-۱۲۷۲.
- [۷] Xin, Z., Xiaohu, X., and Kaili, X., (۲۰۱۱), "Study on the risk assessment of the tailings dam break", *Procedia Engineering*, vol. ۲۶, pp. ۲۲۶۱-۲۲۶۹.
- [۸] Santos, R. N. C. d., Caldeira, L. M. M. S., and Serra, J. P. B., (۲۰۱۲), "FMEA of a tailings dam", *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. ۶, No. ۲, pp. ۸۹-۱۰۴.
- [۹] Mignelli, C., Russo, S. L., and Peila, D., (۲۰۱۲), "Rockfall risk management assessment: the RO. MA. approach", *Natural Hazards*, vol. ۶۲, No. ۳, pp. ۱۱۰۹-۱۱۲۳.
- [۱۰] Yang, S.-H., Pan, Y.-W., Dong, J.-J., Yeh, K.-C., and Liao, J.-J., (۲۰۱۳), "A systematic approach for the assessment of flooding hazard and risk associated with a landslide dam", *Natural Hazards*, vol. ۶۵, No. ۱, pp. ۴۱-۶۲.
- [۱۱] Glade, T., Anderson, M. G., and Crozier, M. J., (۲۰۰۵), "Landslide Hazard and Risk", ۱st, John Wiley & Sons.

[۱۲] معماریان، ح.، (۱۳۸۴)، "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک"، دانشگاه تهران، چاپ چهارم.

- [۱۳] Wideman, R. M., (۱۹۹۲), "Project and program risk management: a guide to managing project risks and opportunities".
- [۱۴] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., and Xu, S., (۲۰۰۸), "Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design Methodology and Construction Control", Taylor & Francis, London, UK.

- [۱۵] AGS Landslide Taskforce. (۲۰۰۷), "A national landslide risk management framework for Australia", *Australian Geomechanics*, vol. ۴۲, No. ۱.
- [۱۶] Silva, F., Lambe, T. W., and Marr, W. A., (۲۰۰۸), "Probability and risk of slope failure", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. ۱۳۴, No. ۱۲, pp. ۱۶۹۱-۱۶۹۹.
- [۱۷] Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., *et al.*, (۲۰۱۴), "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. ۷۳, No. ۲, pp. ۲۰۹-۲۶۳.
- [۱۸] PMI, (۲۰۱۳), "*Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*", ۵th, Project Management Institute, US.
- [۱۹] Fell, R., Ho, K., Lacasse, S., and Leroi, E., (۲۰۰۵), "A framework for landslide risk assessment and management", *Landslide Risk Management*, Hungr, O., Fell, R., Couture, R., and Eberhardt, E. (Eds), London, UK, Taylor & Francis, pp. ۳-۲۵.
- [۲۰] Leroueil, S. and Jacques, L., (۱۹۹۸), "Slope movements-Geotechnical characterization, risk assessment and mitigation", *Geotechnical Hazards*, Rotterdam, Balkema.
- [۲۱] Popescu, M. E., Trandafir, A. C., and Federico, A., (۲۰۱۴), "Risk assessment of slope instability related geohazards", *Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment*, Kadry, S. and El Hami, A. (Eds), Springer, pp. ۲۴۳-۲۶۹.
- [۲۲] Brown, T. and Booth, A., (۲۰۰۹), "Risk management", *Guidelines For Open Pit Slope Design*, Read, J. and Stacey, P. (Eds), ۱st, CRC Press, pp. ۳۸۱-۴۰۰.
- [۲۳] Calderon, A., (۲۰۰۶), "Slope stepping decision using a quantified risk assessment: the Chuquicamata case", *Proc. The ۴th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*.
- [۲۴] Wong, H., (۲۰۰۵), "Landslide risk assessment for individual facilities", *Landslide Risk Management*, Hungr, O., Fell, R., Couture, R., and Eberhardt, E. (Eds), London, UK, Taylor & Francis, pp. ۲۳۷-۲۹۶.
- [۲۵] Steffen, O., Contreras, L., Terbrugge, P., and Venter, J., (۲۰۰۸), "A risk evaluation approach for pit slope design", *Proc. ۴th US Rock Mechanics Symposium, ARMA*.
- [۲۶] Galve, J. P., Cevasco, A., Brandolini, P., and Soldati, M., (۲۰۱۴), "Assessment of shallow landslide risk mitigation measures based on land use planning through probabilistic modelling", *Landslides*, pp. ۱-۱۴.
- [۲۷] Dai, F., Lee, C., and Ngai, Y. Y., (۲۰۰۲), "Landslide risk assessment and management: an overview", *Engineering Geology*, vol. ۶۴, No. ۱, pp. ۶۵-۸۷.
- [۲۸] Saldivar-Sali, A. and Einstein, H. H., (۲۰۰۷), "A landslide risk rating system for Baguio, Philippines", *Engineering Geology*, vol. ۹۱, No. ۲, pp. ۸۵-۹۹.
- [۲۹] Budetta, P., (۲۰۰۴), "Assessment of rockfall risk along roads", *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. ۴, No. ۱, pp. ۷۱-۸۱.