

## توسعه روش‌های بیشاپ و نمودار برای تحلیل پایداری شیروانی‌ها با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط

احد علیخانی<sup>۱</sup>، محسن طاهری مقدر\*<sup>۲</sup>، حمید محمدی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

(دریافت: آبان ۱۳۹۶، پذیرش: شهریور ۱۳۹۷)

### چکیده

در معادن روباز بزرگ یکی از عوامل بسیار تعیین کننده شیب بهینه حد نهایی معدن است. در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی، تنها به تنش‌های اصلی کمینه و بیشینه زمین توجه می‌شود و تقریباً در اغلب موارد، اثر تنش اصلی متوسط محیط به طور کامل نادیده گرفته می‌شود. در حالی که پژوهش‌های اخیر نشان داده است که طراحی‌ها و محاسبه ضریب ایمنی بدون در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط، محافظه‌کارانه خواهد بود. بر همین اساس در این مقاله در ابتدا با در نظر گرفتن معیار شکست سه محوری مقاومت جامع و انجام تعداد زیادی مدلسازی عددی و بررسی نتایج به دست آمده، نموداری برای تحلیل پایداری شیروانی‌های با احتمال شکست دایره‌ای با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط به دست آمد. همچنین روش تعادل حدی بیشاپ نیز بر مبنای این معیار شکست توسعه داده شد به نحوی که بتواند اثر تنش اصلی متوسط را در نظر بگیرد. تحلیل حساسیت انجام شده نشان داد که با افزایش اثر تنش اصلی متوسط، مقدار ضریب ایمنی افزایش می‌یابد و بنابراین صرف نظر کردن از اثر این تنش در طراحی شیب دیواره‌های معدن می‌تواند تأثیر مهمی بر شرایط اقتصادی معدن داشته باشد. همچنین اثر تنش اصلی متوسط بر ضریب ایمنی تابعی از تغییرات تنش قائم نیست و در شیروانی‌های با ارتفاع مختلف اثر یکسانی دارد.

### کلمات کلیدی

تحلیل پایداری شیروانی سنگی، تنش اصلی متوسط، معیار شکست سه محوری مقاومت جامع، روش تعادل حدی بیشاپ

\*عهده‌دار مکاتبات: [taheri@uk.ac.ir](mailto:taheri@uk.ac.ir)

## ۱- مقدمه

نمونه سنگ بکر پیش‌بینی کند. ج) خصوصیات رفتار توده‌سنگی را که دارای یک یا چند مجموعه ناپیوستگی است به صورت تقریبی نشان دهد.

علی‌رغم پژوهش‌های بسیار وسیع، هنوز هیچ یک از معیارهای شکست که بتوانند هر سه مورد گفته شده را برای انواع سنگ‌ها تأمین کنند، ارائه نشده است. در واقع هریک از معیارهای شکست ارائه شده، در بخشی از موارد بالا توانا و در بخشی دیگر دچار ضعف هستند. بنابراین یک مهندس طراح باید بر اساس شرایط محیط مورد مطالعه و با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر یک از معیارها و با قضاوت مهندسی، مناسب‌ترین معیار را برای انجام محاسبات خود در امر طراحی انتخاب نماید. در میان معیارهای شکست ارائه شده، معیار شکست خطی موهر-کولمب و معیار شکست غیر خطی تعمیم یافته هوک و براون به دلیل هم‌خوانی بیشتر با خصوصیات محیط‌های سنگی، بیش‌ترین کاربرد را داشته‌اند [۷]. معیار شکست موهر-کولمب و معیار شکست تعمیم یافته هوک و براون معیارهای دو محوره بر مبنای تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل هستند. در واقع فرض بر این است که فرآیند شکست سنگ توسط تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل کنترل می‌شود و تنش اصلی متوسط اثری بر فرآیند شکست ندارد [۷]. اما در سال‌های اخیر تعدادی از پژوهشگران توانسته‌اند با انجام آزمایش‌های دقیق مکانیک سنگی از جمله آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی (True Triaxial Strength Test)، تأثیر تنش اصلی متوسط را در معیار شکست لحاظ کنند به نحوی که معیار دچار پیچیدگی‌های ریاضی نشود [۸-۱۰]. بر همین مبنای، در سال‌های اخیر با بهکارگیری معیارهای شکست سه‌محوره، به بررسی اثر تنش اصلی متوسط بر فرآیند شکست و ناپایداری در پروژه‌های مکانیک سنگی پرداخته و نشان داده شده است که شرایط پایداری شیروانی‌ها کاملاً تابعی از تنش اصلی متوسط است به طوری که با افزایش اثر آن، ضریب ایمنی افزایش می‌یابد و عدم اعمال اثر آن حین طراحی زاویه شیب، منجر به یک طراحی محافظه کارانه می‌شود [۱۰-۱۶]. در سال‌های اخیر مطالعه‌های جدید و البته محدودی در خصوص اثر تنش اصلی متوسط بر پایداری شیروانی‌ها بر مبنای روش‌های عددی یا روش‌های تحلیلی پیچیده انجام شده است اما تاکنون در هیچ‌کدام از آنها اقدام به ارائه نمودارهای تحلیل پایداری یا

مطالعه‌های انجام شده برای بررسی وضعیت پایداری شیروانی‌ها در معادن روباز از دو جنبه اهمیت فراوان دارد. جنبه اول جلوگیری از وقوع ناپایداری است که در صورت وقوع آن، مسائلی همچون تحمیل خسارت‌های جانی، وارد شدن خسارت‌های مالی به ماشین‌آلات و همچنین تحمیل خسارت‌های مالی ناشی از دست رفتن مواد معدنی و زمان در پی خواهد داشت. جنبه دوم، جنبه اقتصادی پروژه است. در اثر اعمال یک زاویه شیب محافظه کارانه، علاوه بر اینکه باعث از دست رفتن بخشی از ماده معدنی می‌شود، نسبت باطله برداری را نیز افزایش داده و در نتیجه ارزش خالص فعلی معدن دچار کاهش می‌شود [۳-۱۱]. این درجه اهمیت، تا جایی پیش رفته است که اخیراً برخی از معادن روباز بزرگ دنیا و ایران با تحمل هزینه‌های سنگین و با استفاده از فناوری رادار، اقدام به پایش و رفتارنگاری شرایط پایداری شیب دیواره‌های معدن نموده‌اند، اگرچه این روش‌ها فقط زنگ خطری برای امکان وقوع ناپایداری هستند و قادر به افزایش پایداری یا افزایش ارزش خالص فعلی معدن نخواهند بود. بنابراین برای داشتن بالاترین ارزش خالص فعلی، باید زاویه شیب بهینه و ضریب ایمنی قبل از اجرای پروژه محاسبه شود.

روش‌های مختلفی برای طراحی شیب بهینه و تحلیل پایداری شیروانی‌ها ارائه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش‌های عددی، روش‌های تحلیلی، روش‌های تعادل حدی و روش‌های نموداری (گرافیکی) اشاره کرد [۴، ۵]. اختلاف مهم روش‌های گفته شده با یکدیگر در نوع روش تحلیل است. با توجه به اینکه همه این روش‌ها بر پایه در نظر گرفتن یک معیار شکست مناسب، قابل استفاده هستند و در واقع پیش‌بینی امکان شکست بر اساس رابطه معیار شکست امکان پذیر است، بنابراین لازم است قبل از طراحی و با توجه به شرایط و خصوصیات توده‌سنگ یا خاک محیط، یک معیار شکست مناسب انتخاب شود. یک معیار شکست مناسب برای محیط‌های سنگی باید ویژگی‌های زیر را داشته باش [۶]: الف) خصوصیات نمونه‌های سنگی بکر را در دامنه‌ای وسیع از شرایط تنش‌هایی که سنگ در زیر زمین امکان دارد با آن مواجه شود، به طور مناسب توصیف کند. ب) تأثیر یک یا چند مجموعه ناپیوستگی را بر رفتار

در رابطه‌های (۱) و (۲)،  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به ترتیب تنش‌های اصلی بیشینه، متوسط و کمینه هستند و  $b$  ثابتی است که انعکاس دهنده اثر تنش اصلی متوسط در فرآیند شکست است و به وسیله آزمایش‌های آزمایشگاهی از جمله آزمایش مقاومت فشاری سه محوره واقعی به دست می‌آید. همچنین  $b$  را می‌توان از رابطه (۳) نیز تعیین کرد. (مقدار  $b$  بین صفر تا یک متغیر است) [۱۷، ۱۱].

$$b = \frac{(\sigma_c + \sigma_t)\tau_0 - \sigma_t\sigma_c}{(\sigma_t - \tau_0)\sigma_c} \quad (۳)$$

که  $\sigma_t$  مقاومت کششی تک محوره،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوره و  $\tau$  مقاومت برشی مواد هستند.

مطابق با شکل ۱ در  $b=0$ ، معیار شکست مقاومت جامع تبدیل به معیار شکست موهر-کولمب می‌شود و وقتی که  $b=1$  است، این معیار تبدیل به معیار شکست تعمیم یافته تنش برشی مزدوج خواهد شد. برای مقادیر  $b$  بین صفر تا یک، این معیار بیان کننده طیف کاملی از معیارهای جدید است که نشان‌دهنده جامع بودن این معیار در بحث بیان اثر تنش‌های اصلی سه گانه است.

در مفاهیم مکانیک سنگ، تنش فشاری مثبت در نظر گرفته می‌شود، به همین دلیل برای جلوگیری از وقوع خطا در محاسبات، معیار شکست مقاومت جامع با در نظر گرفتن علامت مثبت برای تنش فشاری به جهت کاربرد در مباحث مکانیک سنگ به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) بازنویسی می‌شود.

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b} = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (۴)$$

$$\text{if } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$$

$$\frac{1 - \sin \varphi}{(1 + b)(1 + \sin \varphi)} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (۵)$$

در مباحثی که فرض کرنش صفحه‌ای و تقارن محوری صحیح است، تنش اصلی متوسط عموماً به عنوان تنش خارج از صفحه (عمود بر صفحه) در نظر گرفته می‌شود و ارتباط آن با تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه به صورت رابطه (۶) است.

$$\sigma_2 = m \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad 2\nu \leq m \leq 1 \quad (۶)$$

ارائه روابطی ساده با در نظر گرفتن اثر این تنش نشده است [۱۶-۱۲]. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، ارائه رابطه‌ها و نمودارهایی کاربردی و با پیچیدگی‌های پایین ریاضی برای اعمال اثر تنش اصلی متوسط در فرآیند محاسبه ضریب ایمنی و طراحی شیب بهینه در شیروانی‌های سنگی و خاکی است، برای رسیدن به این هدف، لازم است به طور بنیادی نسبت به تغییر معیار شکست از حالت دو محوری به سه‌محوری برای توسعه روش‌های تحلیل پایداری اقدام شود. یکی از مهم‌ترین معیارهای شکست سه‌محوری، معیار شکست مقاومت جامع است [۱۰]. با توجه به اینکه در سال‌های اخیر این معیار بسیار مورد توجه قرار گرفته و کاربرد موفقیت آمیز آن در محیط‌های سنگی و خاکی اثبات شده است، در این پژوهش از این معیار استفاده خواهد شد. علاوه بر این، سعی شده است تا دو روش تحلیل پایداری تعادل حدی و نمودار بر مبنای معیار شکست مقاومت جامع توسعه یابند. در این راستا با در نظر گرفتن این معیار، روش تعادل حدی بیشاپ مورد بازنگری قرار می‌گیرد و در نهایت با در نظر گرفتن تنش اصلی متوسط، نمودارهایی برای تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی و خاکی با احتمال شکست دایره‌ای توسعه داده می‌شود.

## ۲- معیار شکست مقاومت سه‌محوره جامع

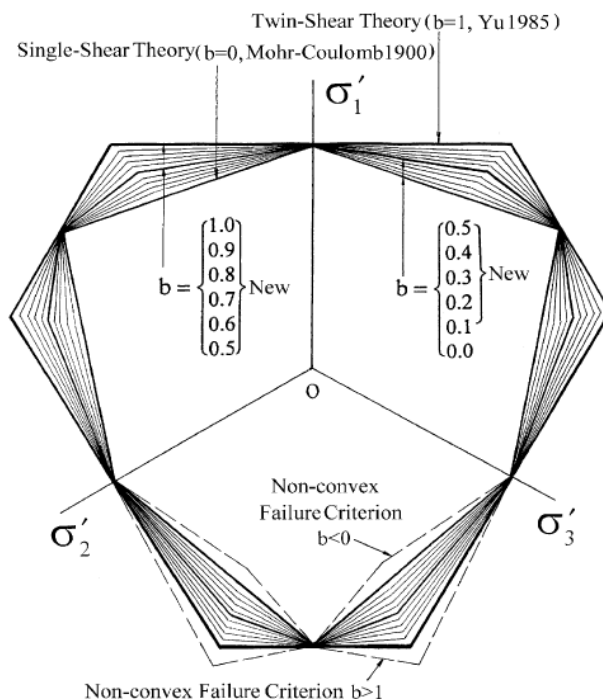
معیار شکست مقاومت سه‌محوره جامع اولین بار در فاصله سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۵ معرفی و ارائه شد. فرم اصلی معیار شکست مقاومت جامع بر پایه پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و با در نظر گرفتن علامت مثبت برای تنش کششی در علم مکانیک است و به صورت خطی با رابطه‌های (۱) و (۲) بیان می‌شود [۱۷، ۱۱].

$$\sigma_1 - \frac{1 - \sin \varphi}{(1 + b)(1 + \sin \varphi)} (b\sigma_2 + \sigma_3) \sigma_3 = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (۱)$$

$$\text{when } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$$

$$\frac{1 - \sin \varphi}{(1 + b)(1 + \sin \varphi)} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_3 = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (۲)$$

$$\text{when } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$$



شکل ۱: تغییر محدوده کاربرد معیار شکست مقاومت جامع بر اساس تغییر  $b$  [۱۷، ۱۱]

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \sin^{-1} \frac{(2+2b)\sin\phi}{2+b+b\sin\phi} \right) + \frac{2(1+b)c}{2+b+b\sin\phi} \quad (9)$$

بنابراین معیار شکست مقاومت جامع، معیارهای شکست موهر-کولمب و تعمیم یافته مقاومت برشی مزدوج و دیگر معیارهای تجربی را پوشش می‌دهد. از خصوصیات این معیار می‌توان مواردی که در ادامه می‌آید، اشاره کرد: الف) توانایی خوبی در انعکاس خصوصیات اساسی در رفتار سنگ‌ها را دارد که از آن جمله می‌توان به مواردی مثل انواع مقاومت فشاری و کششی، اثر فشار هیدرواستاتیک، اثر تنش متوسط اصلی و انطباق مناسب با شرایط مختلف رفتاری توده‌سنگ اشاره کرد. ب) مبنای فیزیکی و مکانیکی کاملاً واضحی دارد و بر اساس یک مدل ریاضی واحد ارائه شده است. معیاری ساده و صریح است و به راحتی همه اجزای مستقل تنش و خصوصیات مواد را در نظر می‌گیرد. ج) مناسب برای انواع سنگ‌ها در حالت‌های مختلف تنش است و تمامی نتایج مربوط به آزمایش سه محوره صحیح برای آن صادق است. د) قابلیت کاربرد آن در مدلسازی‌های عددی و تحلیلی آسان است.

### ۳- تحلیل پایداری شیروانی‌ها با احتمال وقوع شکست دایره‌ای

#### ۳-۱- روش تعادل حدی

در رابطه (۶)،  $\nu$  ضریب پواسون است و  $m$  پارامتری است که مقدار آن بستگی به رفتار توده‌سنگ دارد به طوری که برای رفتار الاستیک مقدار آن برابر با  $2\nu$  است و در شرایطی که رفتار توده‌سنگ از نوع غیر الاستیک است، مقدار یک برای  $m$  در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط محیط غیرالاستیک و جایگزینی رابطه (۶) در رابطه‌های (۴) و (۵)، معیار شکست مقاومت جامع برای استفاده در مسائل با فرض تقارن محوری و کرنش صفحه‌ای به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود.

$$\sigma_1 = \left( \frac{(2+b) + (2+3b)\sin\phi}{(2+b)(1-\sin\phi)} \right) \sigma_3 + \frac{4(b+1)c \cos\phi}{(2+b)(1-\sin\phi)} \quad (7)$$

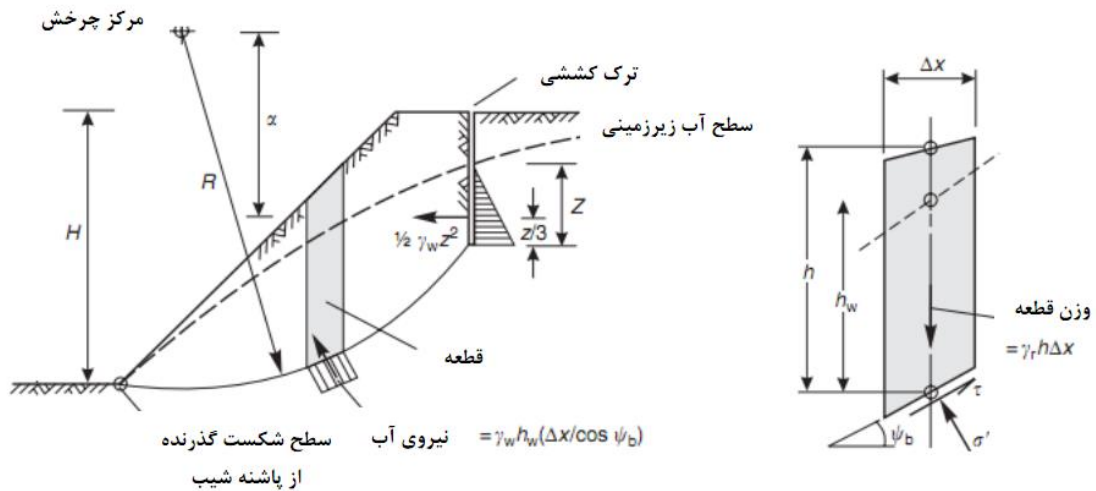
همچنین معیار شکست مقاومت تک محوره جامع بر اساس تنش برشی و تنش نرمال بر صفحه شکست به صورت زیر است.

$$\tau = \sigma_n \tan \left( \sin^{-1} \frac{(b-bm) + (2+bm+b)\sin\phi}{2+b+b\sin\phi} \right) + \frac{2(1+b)c}{2+b+b\sin\phi} \quad (8)$$

مشابه با حالت‌های قبل،  $m$  برای رفتار الاستیک مقدار آن برابر با  $2\nu$  است و در شرایطی که رفتار توده‌سنگ از نوع غیرالاستیک است، مقدار آن یک خواهد بود. بنابراین با در نظر گرفتن شرایط محیط غیرالاستیک رابطه (۸) به صورت رابطه (۹) بازنویسی می‌شود.

اساس روش بیشاپ بر مبنای معیار شکست موهر کولمب است و از اثر تنش اصلی متوسط زمین بر روی مقاومت برشی سطح لغزش و همچنین نیروی متعادل کننده صرف نظر می‌شود و در نتیجه مقدار ضریب ایمنی به دست آمده مقداری محافظه کارانه است. بنابراین در این بخش به طور جداگانه به نحوه اعمال اثر تنش اصلی متوسط بر معادله‌های روش بیشاپ پرداخته خواهد شد.

در روش ساده شده بیشاپ، فرض بر این است که سطح لغزش کاملاً دایره‌ای بوده و قطعات در نظر گرفته شده برای تحلیل پایداری نیروی افقی به یکدیگر وارد می‌کنند و تعادل نیروها در راستای قائم و همچنین تعادل گشتاورها نیز ارضاء می‌شوند (شکل ۲) [۵].



شکل ۲: روش ساده شده بیشاپ برای تحلیل پایداری شیروانی‌های مستعد شکست دایره‌ای [۵]

نسبت به افق، عرض  $\Delta x$ ، عمق آب درون ترک کششی، شعاع لغزش (شکست) و  $\alpha$  فاصله بین مرکز قوس شکست تا دو سوم عمق ترک کششی هستند.

حال برای در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط در روش ساده شده بیشاپ، بایستی معیار شکست موهر-کولمب در نظر گرفته شده در رابطه (۱۰) را با معیار شکست مقاومت جامع (رابطه (۹)) جایگزین نمود. در این حالت، رابطه محاسبه ضریب ایمنی بر مبنای روش ساده شده بیشاپ به صورت رابطه (۱۱) بازنویسی می‌شود.

در روش تعادل حدی، در ابتدا مقاومت برشی سطح لغزش و نیروی لازم برای حفظ تعادل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و سپس جهت محاسبه ضریب ایمنی توده لغزنده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در تحلیل پایداری شکست دایره‌ای، توده لغزنده در اغلب موارد به قطاعی عمودی تقسیم و تحلیل پایداری به صورت قطعه قطعه انجام می‌شود. چنانچه شرایط تعادل برای هر یک از قطعات برقرار باشد، آنگاه تمام توده لغزنده در حال تعادل است. بنابراین تعداد معادله‌هایی که برای تحلیل لازم است به دو عامل شرایط تعادل و تعداد قطعه‌های مورد بررسی بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین روش‌های تعادل حدی برای تحلیل شکست دایره‌ای، روش بیشاپ است [۵].

برای شیروانی‌هایی که رفتار توده لغزنده و سطح لغزش از معیار شکست موهر-کولمب پیروی می‌کنند، ضریب ایمنی بر مبنای روش ساده شده بیشاپ از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۵].

$$FS = \frac{\sum \frac{[c + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \tan \phi] (\Delta x / \cos \psi_b)}{1 + \frac{\tan \psi_b \tan \phi}{FS}}}{\sum \left[ \gamma_r h \Delta x \sin \psi_b + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \frac{\alpha}{R} \right]} \quad (10)$$

در این رابطه،  $FS$  ضریب ایمنی،  $\gamma_r$  وزن واحد حجم محیط،  $\gamma_w$  وزن واحد حجم آب،  $h$  ارتفاع هر قطعه،  $h_w$  ارتفاع آب داخل هر قطعه،  $\psi_b$  شیب وجه زیرین قطعه

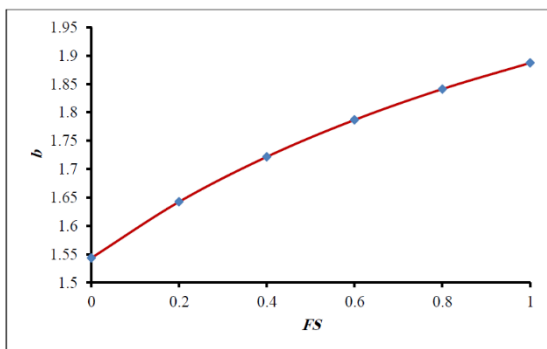
$$FS = \frac{\sum \left[ \left( \frac{2(1+b)c}{2+b+b\sin\varphi} \right) + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \times \tan \left( \sin^{-1} \frac{(2+2b)\sin\varphi}{2+b+b\sin\varphi} \right) \right] (\Delta x / \cos\psi_b)}{1 + \frac{\tan\psi_b \tan \left( \sin^{-1} \frac{(2+2b)\sin\varphi}{2+b+b\sin\varphi} \right)}{FS}} \quad (11)$$

$$FS = \frac{\sum \left[ \gamma_r h \Delta x \sin\psi_b + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \frac{\alpha}{R} \right]}{\sum \left[ \left( \frac{2(1+b)c}{2+b+b\sin\varphi} \right) + (\gamma_r h - \gamma_w h_w) \times \tan \left( \sin^{-1} \frac{(2+2b)\sin\varphi}{2+b+b\sin\varphi} \right) \right] (\Delta x / \cos\psi_b)}$$

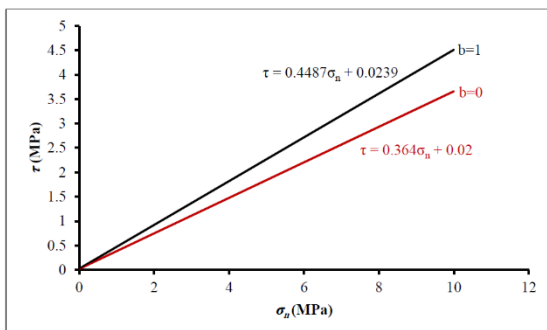
قطعه	$\Delta x$	$H$ (m)	$\gamma_r h \Delta x$ (kN)	$c$ (kPa)	$\varphi$ (deg)	$\psi_b$
۱	۵	۲۰	۱۶۰	۲۰	۲۰	-۱۹/۲
۲	۵	۶	۴۸۰	۲۰	۲۰	-۱۱/۴
۳	۵	۹	۷۲۰	۲۰	۲۰	-۳/۸
۴	۵	۱۱/۵	۹۲۰	۲۰	۲۰	۳/۸
۵	۵	۱۳/۵	۱۰۸۰	۲۰	۲۰	۱۱/۴
۶	۵	۱۴/۵	۱۱۶۰	۲۰	۲۰	۱۹/۲
۷	۵	۱۵	۱۲۰۰	۲۰	۲۰	۲۷/۴
۸	۵	۱۴/۵	۱۱۶۰	۲۰	۲۰	۳۶/۲
۹	۵	۱۲	۹۶۰	۲۰	۲۰	۴۶/۲
۱۰	۵	۵	۴۰۰	۲۰	۲۰	۵۸/۶

جدول ۲: نتایج تحلیل اثر تنش اصلی متوسط بر ضریب ایمنی

$b$	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۱
$FS$	۱/۵۴	۱/۶۴	۱/۷۲	۱/۷۹	۱/۸۴	۱/۸۹

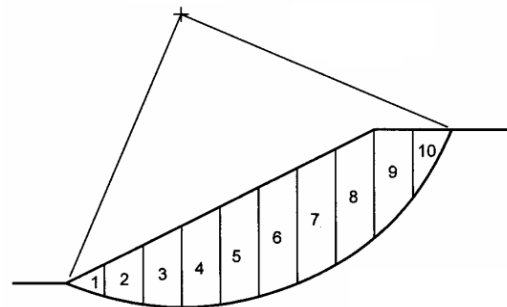


شکل ۴: نمودار تغییرات ضریب ایمنی نسبت به پارامتر  $b$  (پارامتر نماینده اثر تنش اصلی متوسط)



شکل ۵: مقایسه پوش شکست سنگ در دو شرایط بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط ۳-۲- روش نمودار

برای بررسی اثر تنش اصلی متوسط بر میزان ضریب ایمنی محاسبه شده بر مبنای روش ساده شده بیشاپ، مثالی مطابق با شکل ۳ در نظر گرفته شده است. در این شکل توده لغزنده به ۱۰ قطعه با عرض مساوی تقسیم و سایر خصوصیات هر یک از قطعه‌ها در جدول ۱ داده شده است.



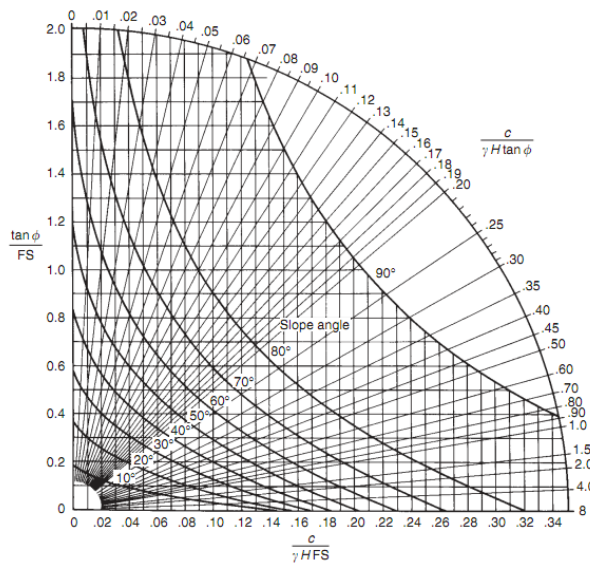
شکل ۳: مقطع قائم مثال در نظر گرفته شده برای تحلیل پایداری به روش بیشاپ

برای بررسی میزان اثرگذاری تنش اصلی متوسط بر ضریب ایمنی، پارامتر  $b$  که نماینده اثر این تنش است، در بازه صفر تا یک و با فاصله‌های ۰/۲ تغییر داده شده است. همان‌طور که در جدول ۲ و نمودار شکل ۴ ملاحظه می‌شود، در شرایطی که به طور کامل از اثر تنش اصلی متوسط صرف نظر می‌شود، مقدار ضریب ایمنی برابر با ۱/۵۴ است و با افزایش اثر این تنش، مقدار ضریب ایمنی افزایش می‌یابد به طوری که در شرایط  $b=1$  مقدار ضریب ایمنی ۲۳ درصد افزایش یافته به مقدار ۱/۸۹ می‌رسد. دلیل این افزایش در مقدار ضریب ایمنی، طبق شکل ۵، مربوط اثر تنش اصلی متوسط بر پوش شکست می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار پارامتر  $b$  از مقدار صفر به یک، شیب پوش شکست حدود ۵ درجه و عرض از مبدا آن حدود ۴ کیلو پاسکال افزایش داشته و قاعدتاً تنش بیش‌تری برای ایجاد شکست در حالتی که اثر تنش اصلی متوسط در نظر گرفته شده است، لازم خواهد بود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که عدم اعمال اثر تنش اصلی متوسط بر فرایند تحلیل پایداری شیروانی‌ها می‌تواند منجر به یک طراحی محافظه کارانه شود.

جدول ۱: داده‌های لازم برای تحلیل پایداری به روش بیشاپ

نظر بگیرد. بهترین روش برای در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط، اعمال آن از طریق معیار شکست است و به همین منظور از معیار شکست سه محوره مقاومت جامع استفاده خواهد شد.

به منظور در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط، تعداد ۳۷۴ مدل عددی در دو شرایط محیطی کاملاً خشک و کاملاً اشباع از آب زیرزمینی به وسیله نرم‌افزار عددی  $RS^2$  ساخته و ضریب ایمنی بر اساس محتمل‌ترین سطح شکست، محاسبه شد. برای اینکه در مدلسازی‌های عددی ویژگی‌های معیار مقاومت سه محوره جامع در نظر گرفته شود، ابتدا مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با توجه به تغییرات پارامتر  $b$  در محدوده صفر و یک محاسبه و سپس مقادیر به دست آمده وارد نرم‌افزار شدند. پس از گردآوری همه نتایج و دسته‌بندی آنها در دو دسته خشک و اشباع و همچنین انجام تحلیل حساسیت، یک ساختار دوبعدی برای نمودارهای تحلیل پایداری به دست آمد (شکل‌های ۷ و ۸) به طوری که محور افقی آن نشان دهنده رابطه (۱۲) و منحنی قائم آن معرف رابطه (۱۳) است.

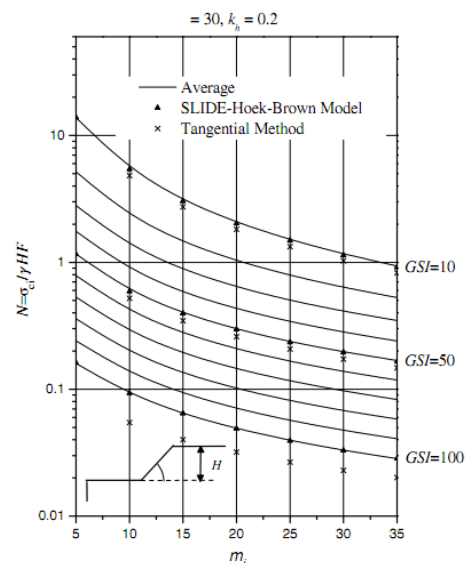


شکل ۵: نمونه‌ای از نمودارهای تحلیل پایداری شیب بر مبنای معیار شکست موهر کولمب و معیار شکست تعمیم یافته هوک و براون [۵]

افقی محاسبه شده و سپس با حرکت به سمت بالا و برخورد با منحنی مورد نظر (شیب شیروانی)، مقدار ضریب ایمنی با استفاده از محور قائم و محاسبه  $B$  به دست می‌آید. برای بررسی میزان کارایی نمودارهای ارائه شده، در شرایط  $b=0$ ، مقایسه‌ای بین نمودار ارائه شده و نمودار سمت چپ نشان داده شده در شکل ۶ انجام شد. به این منظور با در نظر گرفتن مقدار  $0.2$  مگاپاسکال برای چسبندگی،  $25$  درجه

یکی از روش‌های محاسبه ضریب ایمنی برای شکست دایره‌ای، استفاده از نمودار است. این نمودارها برای اولین مرتبه بر مبنای معیار شکست موهر کولمب طراحی شدند و در سال‌های اخیر تعدادی از پژوهشگران با الهام از نمودارهای پیشین، نمودارهای جدیدی برای تحلیل پایداری شیب بر اساس معیار شکست هوک و براون پیشنهاد داده‌اند (شکل ۶) [۵].

علی‌رغم اینکه روش‌های مختلفی برای تحلیل شکست دایره‌ای وجود دارد، دو دلیل مهم باعث شده است تا پژوهش در جهت توسعه این نمودارها همچنان ادامه یابد. این عوامل عبارتند از: الف) تحلیل شکست دایره‌ای با استفاده از نمودار که نسبت به سایر روش‌ها و به خصوص در فازهای اولیه طراحی بسیار ساده، سریع و ارزان است و ب) به کمک آنها می‌توان حساسیت شیروانی در برابر تغییر شرایط و خواص مواد نیز بررسی نمود [۵]. در این پژوهش نیز، هدف ارائه نمودارهایی است که علاوه بر اینکه قابلیت نمودارهای پیشین را داشته باشند، توانایی در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط را بر شرایط پایداری شیب نیز در



شکل ۶: نمونه‌ای از نمودارهای تحلیل پایداری شیب بر مبنای معیار شکست موهر کولمب و معیار شکست تعمیم یافته هوک و براون [۵]

$$A = \frac{1}{\gamma H} \left( \frac{2(1+b)c}{2+b+b \sin \varphi} \right) \left( 1 - \left( \frac{(2+2b) \sin \varphi}{2+b+b \sin \varphi} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (12)$$

$$B = \frac{1}{S.F} \frac{200(1+b)c}{(2+b+b \sin \varphi) \gamma H} \quad (13)$$

روش استفاده از این نمودار به این صورت است که با داشتن چسبندگی و زاویه اصطکاک و همچنین وزن واحد حجم توده سنگ و ارتفاع شیروانی، مقدار  $A$  بر روی محور

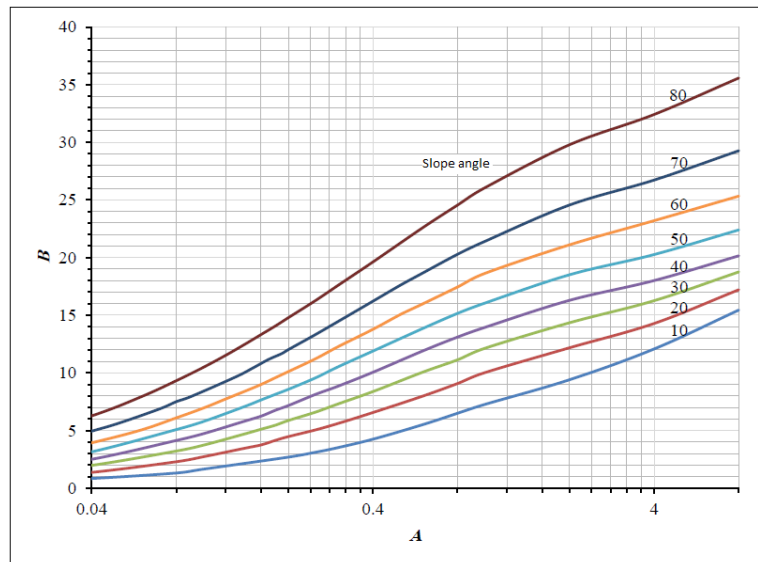
داخلی و چسبندگی توده‌سنگ می‌شود و از طرفی افزایش مقدار این خصوصیات، باعث افزایش ضریب ایمنی محاسبه شده برای یک شیروانی با زاویه شیب مشخص می‌شود. بنابراین واضح است در نظر نگرفتن اثر تنش اصلی متوسط، باعث می‌شود تا زاویه شیب طراحی شده برای یک شیروانی، به طور مثال شیب دیواره معادن روباز، کمتر از مقدار بهینه در نظر گرفته شود و در نتیجه طراحی محافظه کارانه باشد. این طراحی محافظه کارانه در محاسبه شیب دیواره معدن، باعث می‌شود تا نسبت باطله‌برداری افزایش یابد و در نتیجه هزینه‌های معدنکاری بالا رود و بر شرایط اقتصادی معدن تاثیر خواهد گذاشت. بنابراین اعمال اثر تنش اصلی متوسط در طراحی شیب معادن روباز بسیار مهم است.

برای زاویه اصطکاک داخلی، ۱۰۰ متر ارتفاع شیروانی با وزن واحد حجم ۰/۰۲۵ مگا نیوتن بر مکعب برای یک شیروانی با شیب ۳۰ درجه، ضریب ایمنی حاصل از نمودار نشان داده شده در شکل ۶ و همچنین در شکل ۷ حدود ۱/۳ به دست آمد که نشان می‌دهد نمودارهای ارائه شده از کارایی مناسبی برخوردار هستند.

#### ۴- بحث

##### ۴-۱- اثر تنش اصلی متوسط بر شرایط اقتصادی معادن

در نمودار شکل ۵ اثر تنش اصلی متوسط در دو حالت بر روند پوش شکست بررسی شد؛ حالت اول بدون اثر تنش اصلی متوسط ( $b=0$ ) و حالت دوم با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط به طور کامل ( $b=1$ ). همان‌طور که ملاحظه می‌شود اثر تنش اصلی باعث افزایش مقادیر زاویه اصطکاک



شکل ۷: نمودار پایداری شیب با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط برای محیط کاملاً خشک

۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. سپس با استفاده از یکسری تحلیل برای مقادیر مختلف  $b$  مقادیر ضریب ایمنی برای زاویه‌های مختلف شیب به دست آمد و نتایج آن در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شد.

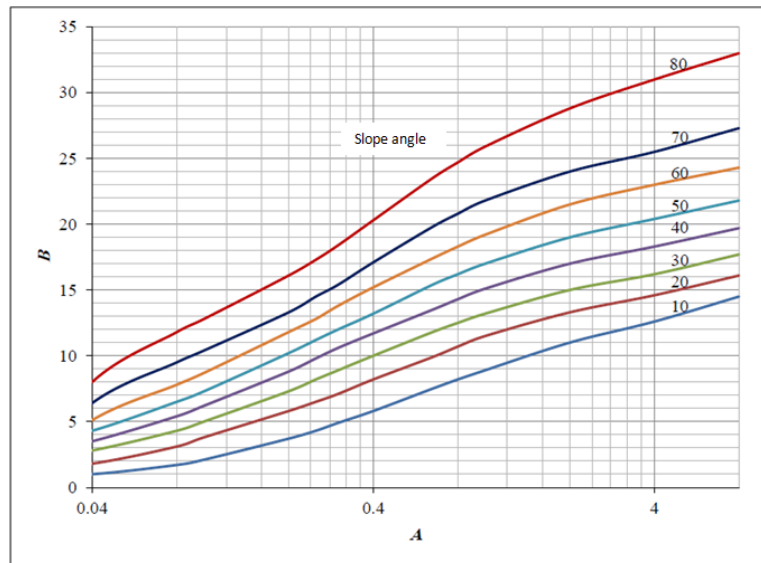
جدول ۳: ویژگی‌های توده‌سنگ برای تحلیل حساسیت

نوع سنگ	$c$ (MPa)	$\phi$ (deg.)
متوسط	۰/۴	۳۵
سخت	۲	۵۰

##### ۴-۲- بررسی اثر تنش اصلی متوسط بر ضریب ایمنی در مقادیر مختلف زاویه شیب

پارامتر  $b$  نماینده میزان اثر تنش اصلی متوسط است به طوری که در شرایطی که  $b$  برابر با صفر باشد، تنش اصلی متوسط هیچ‌گونه تأثیری ندارد و وقتی که مقدار  $b$  برابر با یک است، تنش اصلی متوسط بیش‌ترین تاثیر خود را دارد. از این‌رو برای نشان دادن اثر تنش اصلی متوسط بر محاسبه ضریب ایمنی شیروانی‌ها، ویژگی‌های دو نوع سنگ مطابق با جدول ۳ در نظر گرفته شد و مقادیر  $\gamma$  و  $H$  برای هر دو نوع سنگ ثابت و به ترتیب برابر با  $0.025 \text{ MN/m}^3$  و  $m$





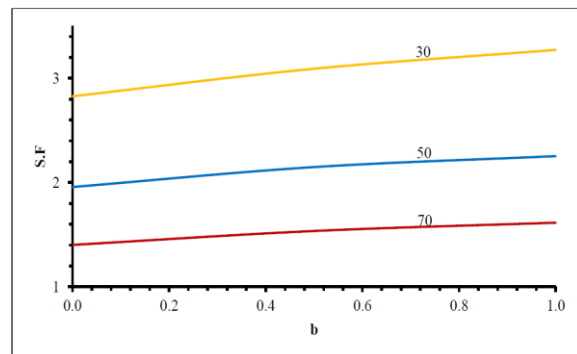
شکل ۸: نمودار پایداری شیب با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط برای محیط کاملاً اشباع از آب

است. این نشان می‌دهد که نحوه اثرگذاری تنش اصلی متوسط در محاسبه ضریب ایمنی تابعی از خصوصیات شیروانی مورد بررسی نیست.

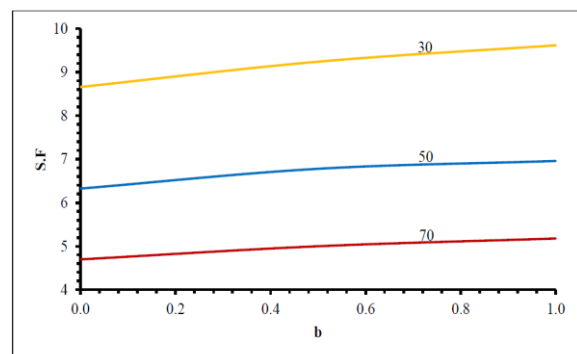
#### ۳-۴- بررسی اثر تنش اصلی متوسط بر ضریب ایمنی در مقادیر مختلف ارتفاع شیب شیروانی

برای بررسی شرایط اثرگذاری مقدار تنش اصلی متوسط بر ضریب ایمنی در ارتفاع‌های مختلف برای شیروانی، ارتفاع‌های مختلف بین دو مقدار ۵۰ و ۱۰۰ متر برای ارتفاع شیروانی با ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ متوسط (جدول ۳) در نظر گرفته و سپس یک تحلیل حساسیت برای تعیین ضریب ایمنی در سه مقدار  $b$ ، ۰، ۰/۵ و ۱ و همچنین در زوایای شیب ۳۰، ۵۰ و ۷۰ انجام و نتایج آن در شکل ۱۱ نمایش داده شد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در زوایای شیب مختلف برای شیروانی و همچنین مقادیر مختلف  $b$ ، با افزایش مقدار ارتفاع، مقدار ضریب ایمنی در همه زوایای شیب با یک روند مشابه و یکسان کاهش پیدا می‌کند. این تحلیل نشان می‌دهد اثر تنش اصلی متوسط بر شرایط پایدار شیروانی تابعی از ارتفاع شیروانی نیست. از طرفی تنش قائم در شیروانی (وزن بلوک یا بخش ریزشی شیروانی) تابعی مستقیم از ارتفاع شیروانی است و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اثر تنش اصلی متوسط بر محاسبه ضریب ایمنی شیروانی‌ها تابعی از تنش قائم نیست.

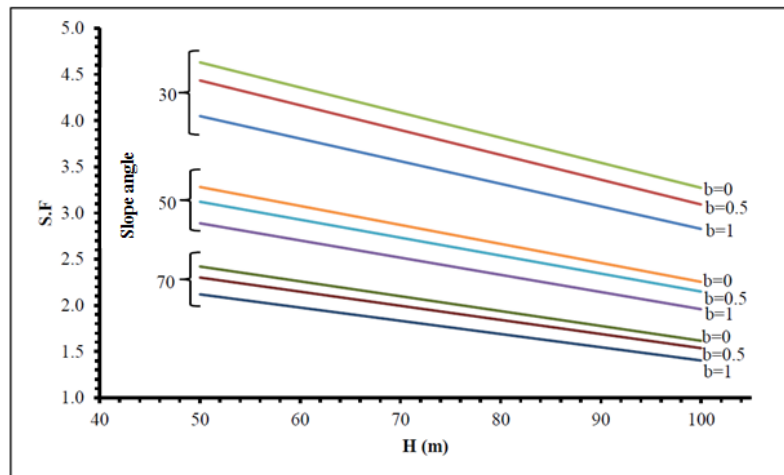


شکل ۹: تغییرات ضریب ایمنی نسبت به پارامتر  $b$  (نماینده اثر تنش اصلی متوسط) برای سنگ متوسط در زوایای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه



شکل ۱۰: تغییرات ضریب ایمنی نسبت به پارامتر  $b$  (نماینده اثر تنش اصلی متوسط) برای سنگ سخت در زوایای ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درجه

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییر مقدار  $b$  از صفر تا یک، در مقادیر مختلف زاویه شیب شیروانی باعث افزایش ضریب ایمنی می‌شود و البته برای هر دو نوع سنگ سخت و متوسط، این افزایش ایمنی از روند یکسانی برخوردار



شکل ۱۱: تحلیل حساسیت مقدار ضریب ایمنی نسبت به تغییرات ارتفاع شیروانی در شرایط مختلف اثر تنش اصلی متوسط

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از معیار شکست سه‌محوره مقاومت جامع، اثر تنش اصلی متوسط بر روابط روش تعادل حدی ساده شده بیشاپ برای محاسبه ضریب ایمنی پایداری شیروانی‌های سنگی و خاکی اعمال و در نهایت این روش توسعه داده شد. نتایج تحلیل انجام شده به وسیله معادله‌های توسعه‌یافته نشان داد که مقدار ضریب ایمنی و همچنین طراحی زاویه شیب بهینه تابعی از تنش اصلی متوسط است به طوری که عدم اعمال اثر تنش اصلی متوسط می‌تواند منجر به یک طراحی کاملاً محافظه کارانه شود. این طراحی محافظه کارانه می‌تواند تأثیر مهمی بر شرایط اقتصادی معدن‌کاری در معادن روباز بگذارد و بنابراین لازم است اثر این تنش در طراحی‌ها در نظر گرفته شود.

همچنین اثر تنش اصلی متوسط بر احتمال وقوع شکست دایره‌ای با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت و بر مبنای آنها دو نمودار تحلیل پایداری در دو شرایط خشک و اشباع به دست آمد. تحلیل حساسیت‌های انجام شده نشان دادند که با در نظر گرفتن اثر تنش اصلی متوسط در محاسبه ضریب ایمنی شیروانی‌ها در یک زاویه شیب مشخص، ضریب ایمنی افزایش می‌یابد و البته آهنگ افزایش ضریب ایمنی نسبت به پارامتر  $b$  وابسته به جنس و شرایط مقاومتی سنگ نیست. همچنین مشخص شد که در یک مقدار ثابت برای پارامتر  $b$ ، اثر تنش اصلی متوسط بر روی ضریب ایمنی شیروانی کاملاً مستقل از ارتفاع شیروانی است و تابعی از تنش قائم نیست.

## مراجع

- [1] Honarkhah, M., (2011), Stochastic Simulation of Patterns Using Distance-Based Pattern Modeling, Caers, J., Department of Energy Resources Engineering, Stanford University.
- [2] Strebelle, S. (2002). Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-Point Statistics, *Mathematical Geology*, 34(1), 1-21.
- [3] Mariethoz G, Renard P, Caers J (2010) Bayesian inverse problem and optimization with iterative spatial resampling. *Water Resour Res* 46.
- [4] Zhang, T. (2006). Filter-based Training Pattern classification for spatial Pattern simulation, Switzer, P., The Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University.
- [5] Wua, J., Boucherb, A., Zhang, T. (2008), A SGeMS code for pattern simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM, *Computers & Geosciences*, 34(1), 1863-1876.
- [6] Wua, J., Zhang, T., Journel, A. (2008), Fast FILTERSIM Simulation with Score-based Distance, *Math Geosci*, 40(1), 773-788.
- [7] Mariethoz, G., Caers, J. (2015), *Multiple-point geostatistics*, John Wiley & Sons, Ltd, USA.
- [8] Carvalho PRM, Costa JFCL, Rasera LG, Varella LES (2016) Geostatistical facies simulation with geometric patterns of a petroleum reservoir. *Stoch Environ Res Risk Assess*:1-18. doi: 10.1007/s00477-016-1243-5
- [9] Zhang T, Du Y, Li B, Zhang A (2017) Stochastic reconstruction of spatial data using LLE and MPS. *Stoch Environ Res Risk Assess*:1-14.
- [10] Zhang T, Du Y, Huang T, Yang J, Lu F, Li X (2016) Reconstruction of porous media using

ISOMAP-based MPS. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 30(1):395–412.

[11] Wu, J.(2007), 4D Seismic and Multiple-Point Pattern Data Integration Using Geostatistics, *Journel, A.G. Department of Energy Resources Engineering, Stanford University.*

[12] Burc,G.,Caers,J.(2004) , A Multiple-scale, Pattern-based Approach to Sequential Simulation, *springer, [Quantitative Geology and Geostatistics](#), 14(1), 255-264.*

[13] Zhang, T., Switzer, P., Journel, A.,(2006) , Filter-Based Classification of Training Image Pattern for Spatial Simulation, *Mathematical Geology*, 38(1), 63-80.

[14] Duda, R., Hart, P., Seork,D., ( 2001). *Pattern Classification, the Electrical Engineering Department at San Jose State University, San Jose, California.*

[15] Shannon, C.E.,(1948) *A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal*, 27(1) 379-423.

[16] Cover TM., Thomas JA.,( 1991). *Elements of information theory.*Wiley, New York.

[17] Tibshirani, R., G. Walther, and T. Hastie. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B. Vol. 63, Part 2, 2001, pp. 411–423.*

[18] Maimon O. and Rokach L., (Ed). 2010, *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook, Second Edition, Springer*