

## تخمین مقدار نسبت تنش افقی به قائم ( $k$ ) با استفاده از روش عددی مطالعه موردی: تکیه‌گاه جناح چپ سد سیمره - استان ایلام

محمد مهدی علی محمد<sup>۱</sup>، سعید آلودری<sup>۲</sup>، کاوه آهنگری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی معدن گرایش استخراج، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۶/۴

### چکیده

مسائل بسیاری در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی مطرح می‌باشد که شامل پیچیدگی‌های مربوط به ژئومتری، ناهمسانگردی مصالح، رفتار غیرخطی، تنش‌های برجا و وجود فرآیندهایی از جمله فشارهای آب منفذی، بارگذاری ارتعاشی و غیره می‌باشد. این تحقیق مربوط به بررسی وضعیت پایداری زون شکست موجود در تکیه‌گاه جناح چپ سد سیمره و تخمین مقدار نسبت تنش افقی به قائم ( $k$ ) است. در این منطقه به دلیل پرهزینه بودن انجام روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تنش، از روابط تجربی برای بدست آوردن مقدار  $k$  استفاده شده است. با توجه به عملکرد نرمال گسل‌های منطقه و با توجه به نتایج بدست آمده از روابط تجربی، بازه‌ای مناسب از مقادیر  $k$  به منظور تحلیل پایداری شیروانی مذکور انتخاب شد. با ارزیابی نتایج بدست آمده از تحلیل پایداری شیروانی و با توجه به پارامترهای مهم در انتخاب  $k$  با در نظر گرفتن درجه اهمیت آن‌ها، مقدار  $k$  برابر با ۰/۳۳ در نظر گرفته شد.

واژگان کلیدی: نسبت تنش افقی به قائم ( $k$ )، سد سیمره، زون شکست، پایداری شیپ، مدل‌سازی عددی، نرم‌افزار یودک

### مقدمه

سنگی بر مبنای روش تعادل حدی به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل استفاده از این روش سادگی و قابلیت اجرائی این روش می‌باشد. فاکتور ایمنی حاصل از روش تعادل حدی به‌طور قاطع منحصربه‌فرد نمی‌باشد. دلیل آن این است که فاکتور ایمنی حاصل از این روش با توجه به وجود سطوح لغزش متغیر خواهد بود. روش‌های عددی رفتار مسائل تحلیل پایداری شامل پیچیدگی‌های مربوط به هندسه

همان‌طور که آشکار است، یکی از اهداف اصلی در تحلیل پایداری شیروانی‌های طبیعی و مصنوعی، تعیین فاکتور ایمنی شیروانی‌ها می‌باشد. فاکتور ایمنی می‌تواند در صورتی که سطح بحرانی شکست شیروانی به‌درستی شناسایی شود، بدست آید. سطح بحرانی شکست شیروانی، سطحی است که لغزش بر روی آن اتفاق می‌افتد و فاکتور ایمنی پائینی را دارا می‌باشد [3]. روش‌های مرسوم تحلیل پایداری شیروانی‌های

غربی شهرستان دره شهر و در ۱۰۶ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام واقع است. مختصات جغرافیایی آن به طول شرقی ۴۷°۱۲' عرض شمالی ۳۳°۱۷' می باشد. ساختگاه نیروگاه نیز روبه روی روستای تلخاب و به فاصله ۱/۵ کیلومتری از ساختگاه سد قرار دارد. زون شکست موجود در تکیه گاه جناح چپ سد سیمره است. این زون در مجاورت سازه آبریز تونل آب بر نیروگاه قرار دارد که بر اثر وقوع زمین لغزش به وجود آمده است. اهمیت پروژه مذکور به دلیل واقع شدن این زون در نزدیکی ورودی تونل آب بر نیروگاه و مشرف بودن به مخزن سد می باشد [۱].

#### ویژگی های زمین شناسی ناحیه زمین لغزه و ناحیه شکست

ناحیه زمین لغزه در منتهی الیه یال شمالی طاقدیس راوندی قرار گرفته که به دلیل مکانیزم عملکرد چرخشی آن، ناپیوستگی های متعدد کششی در لایه های بالائی طاقدیس با شیب تقریباً قائم و امتدادی به موازات محور اصلی طاقدیس که امتدادی غربی - شرقی می باشد ایجاد نموده است. واحدهای زمین شناسی تشکیل دهنده طاقدیس شامل آسماری بالائی، آسماری میانی و آسماری پائینی می باشد که از سنگ های آهکی با ضخامت لایه های متفاوت و بعضاً درجات مختلف مقاومت تشکیل شده اند [۲]. در این بین میان لایه های مارنی نیز وجود دارند. جنس لایه های تشکیل شده در زون شکست شامل آهک مارنی، آهک، مارن و آهک حفره دار بوده که پارامترهای مقاومتی مارلستون از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول تغییر شکل پذیری و غیره بسیار پائین می باشد. لذا اهمیت موضوع مورد بحث، مشرف در این بین

مدل، رفتار غیرخطی و ناهمسانگرد مواد را مجاز می شناسد. خصوصاً برای تحلیل پایداری شیروانی های سنگی روش های عددی مناسب تر می باشند. دلیل این امر اینست که رفتار شیروانی های سنگی بیشتر به خصوصیات و یکپارچگی توده سنگ بستگی دارد [4]. یکی از مزیت های ویژه مسائل تحلیل پایداری به خصوص در مدل سازی عددی، قابلیت آن ها در جهت برداشتن حالات تنش ابتدایی در تحلیل های پایداری و ارزیابی اهمیتشان می باشد. سنگ ها در عمق زمین در معرض تنش های ناشی از وزن لایه های رویی و نیز تنش های تکتونیکی که در یک محل معین تمرکز یافته اند، قرار می گیرند. تنش های اولیه موجود در عمق معینی زیر سطح زمین، به صورت تنش های قائم و افقی اندازه گیری می شوند [5]. تنش های برجا در سنگ به دو طریق روش اندازه گیری مستقیم و روابط تجربی برآورد می شوند.

از جمله آزمون های که برای تعیین تنش های برجای محلی مطرح می باشد عبارتند از شکست هیدرولیکی جک تخت، بیش مغزه گیری، گمانه زن دیواره ای و آزمون بارگذاری صفحه ای [6].

روش های اندازه گیری مستقیم تنش، آزمون های پرهزینه ای هستند، لذا معمولاً در اجرای پروژه های متعدد جهت تحلیل پایداری سازه های سنگی و محاسبه تنش های برجا از روابط تجربی استفاده می شوند.

با توجه به اینکه در این منطقه آزمون هایی برای تعیین تنش برجا انجام نشده است، برای بدست آوردن مولفه های تنش برجا و همچنین تعیین  $k$  (نسبت تنش افقی به قائم) از روابط تجربی استفاده می گردد. ساختگاه سد سیمره در حدود ۴۰ کیلومتری شمال

مقاطعی بدست می‌آید که بر روی توپوگرافی منطقه مورد مطالعه اختیار شود.

در این تحقیق بر روی توپوگرافی سه مقطع AA', BB' و CC' اختیار شد. برای تهیه هندسه مدل منطقه به دلایل ذیل از مقطع AA' استفاده شد.

اول اینکه در این مقطع تمامی ۱۰ گسل شناخته شده در مطالعات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بدست آمده است دیده می‌شود (وجود دارد) و دلیل دیگر اینکه این مقطع نسبت به بقیه مقاطع از ارتفاع بیشتری برای شیروانی مورد مطالعه برخوردار می‌باشد. مدل مورد مطالعه دارای ارتفاعی بالغ بر ۱۹۰ متر و گسترش طولی ۳۶۵ متر می‌باشد. شیب لایه‌بندی آن نیز ۴:۱ است. شکل شماره ۱ هندسه شیروانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

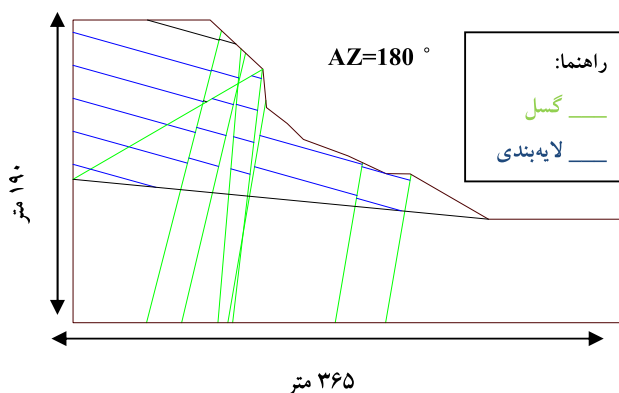
میان‌لایه‌های مارنی نیز وجود دارند. جنس لایه‌های تشکیل شده در زون شکست شامل آهک مارنی، آهک مارن و آهک حفره‌دار بوده که پارامترهای مقاومتی مارلستون از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول تغییرشکل پذیری و غیره بسیار پائین می‌باشد.

لذا اهمیت موضوع مورد بحث، مشرف بودن به سازه آبگیر مخزن سد و تکیه‌گاه چپ و فرار گرفتن در منطقه زمین لغزه قدیمی می‌باشد [۲].

#### آنالیز حساسیت بر روی مقادیر k انتخابی با استفاده

#### از نرم‌افزار یودک UDEC

اولین مرحله شبیه‌سازی شیروانی‌های سنگی در نرم‌افزار یودک (UDEC)، وارد کردن هندسه مدل منطقه مورد مطالعه می‌باشد. هندسه مدل توسط



شکل ۱- هندسه و ابعاد شیروانی مورد مطالعه

سازه‌های وابسته انجام پذیرفته است. این آزمایش‌ها براساس دستورالعمل‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و استاندارد (ASTM) انجام پذیرفته است.

برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی بیش از ۱۸۵ نمونه اخذ شده از گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محدوده سد و

جدول ۱- مشخصات ژئومکانیکی سنگ بکر

گروه‌های سنگی	اول	دوم	سوم
وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۶۲	۲/۴۴	۲/۲۵
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۱۰۶	۸۴/۶	۶۳
مدول تغییر شکل‌پذیری (GPa)	۲۲/۵	۹/۳۲	۲/۶
چسبندگی (MPa)	۲۰/۷۱	۱۶/۹۹	۱۳/۰۲۷
زاویه اصطکاک	۴۸/۱۳۸	۴۶/۹۱	۴۵/۴۸
مقاومت کششی (MPa)	-۱۳/۲۵	-۱۱/۲۸	-۹
$m_i$	۸	۷/۵	۷
$s_i$	۱	۱	۱
$a_i$	۰/۵	۰/۵	۰/۵

همچنین خصوصیتی که برای مصالح سنگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد معمولاً خصوصیات ژئومکانیکی سنگ بکر است اما در بعضی از مناطق به دلیل آن که ضخامت لایه‌بندی کم بوده و به دلیل سیستم درزه‌داری منطقه که باعث ایجاد بلوک‌های بسیار باریک می‌شود و همچنین با توجه به فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و خصوصیات سنگ بکر، مدل‌سازی آن توسط نرم‌افزار یودک (UDEC) با مشکل روبه‌رو می‌شود. به همین دلیل در این تحقیق از خصوصیات معادل (توده سنگ) استفاده شد. همچنین خصوصیات ژئومکانیکی که باید برای درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها معرفی شود عبارتند از سختی درزه در جهت نرمال (JKn)، سختی درزه در جهت برشی (JKs)، زاویه اصطکاک و چسبندگی می‌باشد.

با توجه به وجود انواع مختلف سنگ در محدوده شیروانی مورد مطالعه و نیز ارتباط بین جنس سنگ و خصوصیات مکانیکی آن‌ها، همچنین تحلیل نتایج آزمایشات صورت گرفته، مصالح سنگی موجود در منطقه مورد مطالعه به سه گروه اول، دوم و سوم تقسیم شده است. دلیل این امر این است که نتایج هر یک از آزمون‌ها برای انواع مختلف سنگ از پراکندگی قابل توجهی برخوردار است. از طرفی هم پوشانی موجود در نتایج آزمون‌های مختلف بر روی سنگ‌ها باعث ایجاد عدم قطعیت قابل توجه در استفاده از تقسیم بندی فوق در تحلیل‌ها و کاربردهای بعدی این نتایج خواهد شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده از آزمایشات مختلف برای مصالح سنگ بکر و توده سنگ عبارتند از: دانسیته، مدول تغییرشکل‌پذیری، چسبندگی، مقاومت فشاری تک‌محوره، زاویه اصطکاک، مقاومت کششی، ضریب  $m_i$ ، فاکتور دستخوردگی (که در این تحقیق از فاکتور دستخوردگی معادل ۰/۲ استفاده شده است)، ضرایب  $s$  و  $a$  که در جداول شماره ۱ و ۲ آورده شده است. از آن جایی که منطقه مورد مطالعه دارای لایه‌های مختلف مواد با ضخامت‌های متفاوت و نسبتاً پائینی در مقایسه با ارتفاع کل شیروانی می‌باشد و همچنین وجود ۱۰ گسل در شیروانی مذکور و نیز این که در روش‌های مدل‌سازی عددی برای جلوگیری از افزایش از آن جایی که منطقه مورد مطالعه دارای لایه‌های مختلف مواد با ضخامت‌های متفاوت و نسبتاً پائینی در مقایسه با ارتفاع کل شیروانی می‌باشد و همچنین وجود ۱۰ گسل در شیروانی مذکور و نیز اینکه در روش‌های مدل‌سازی عددی برای جلوگیری از افزایش خطا به دلیل پیچیدگی هندسی مدل، تا حد امکان از هندسه ساده شده مدل استفاده می‌گردد.

جدول ۲- مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ

گروه‌های سنگی	اول	دوم	سوم
مدول تغییرشکل پذیری (GPa)	۲۱/۳۴	۱۱/۰۳۹	۵/۳۵
مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	۲۲/۳۳	۱۳/۱۹	۷/۴
چسبندگی (MPa)	۲/۲۹	۱/۲۶	۰/۷۶۷
زاویه اصطکاک	۴۹/۰۹	۴۴/۹۷	۳۹/۳۴
مقاومت کششی (MPa)	-۰/۸۲۳	-۰/۳۱۷	-۰/۱۱۴
$\sigma_c$ (MPa)	۱۳/۰۹	۵/۶۸	۲/۲۶
GSI	۶۵	۵۵	۴۵
$m_b$	۱/۹۹	۱/۲۵	۰/۸۹
s	۰/۰۱۵۵	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۱۴
a	۰/۵۰۱	۰/۵۰۴	۰/۵۰۸

مدل رفتاری الاستیک پلاستیک موهر کولمب برای محیط‌های سنگی و خاکی توسعه زیادی پیدا کرده است و این مدل رفتاری می‌تواند رفتار محیط‌های خاک و سنگ را به‌طور جامع مدل‌سازی کند. مدل رفتاری شکست دراکر پراگر اساساً برای شرایط خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به توضیحات ارائه شده و با توجه در اختیار داشتن پارامترهای ورودی صحیح نسبت به پارامترهای ورودی سایر مدل‌ها و اطمینان بیشتر از صحت اطلاعات مربوطه در این تحقیق از مدل رفتاری شکست موهر کولمب برای بلوک‌ها استفاده شده است. همچنین برای ناپیوستگی‌ها مدل‌های رفتاری متنوعی را می‌توان تعریف کرد که عبارتند از مدل الاستیک، تماس صفحه‌ای الاستیک، تماس نقطه‌ای پلاستیک، تماس سطحی پلاستیک، تسلیم ناپیوسته و مدل رفتاری بارتن باندیس. در این تحقیق از مدل رفتاری تسلیم پیوسته برای ناپیوستگی‌ها استفاده شده است.

جدول شماره ۳ مقادیر پارامترهای مذکور را برای ناپیوستگی‌ها نشان می‌دهد [7].

جدول ۳- مشخصات ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها

نام سطح ناپیوستگی	گسل	لایه‌بندی
سختی نرمال (GPa)	۰/۷	۲
سختی برشی (GPa)	۰/۰۷	۰/۵
چسبندگی (MPa)	۰/۰۶	۰/۱۴
زاویه اصطکاک	۲۸/۵	۲۷

**تخمین نسبت تنش‌های برجا**  
در اکثر موارد، اندازه تنش قائم به صورت وزن روباره بیان می‌شود. تنش قائم در هر عمقی برابر حاصل ضرب عمق در وزن مخصوص روباره است. بنابراین می‌توان مولفه قائم تنش ( $\sigma_v$ ) را با استفاده از رابطه زیر تعیین نمود:

$$\sigma_v = \gamma \cdot Z \quad (1)$$

$\sigma_v$ : تنش قائم (MPa)

$\gamma$ : وزن مخصوص ( $MN/m^3$ )

Z: عمق سازه از سطح زمین (m)

مولفه افقی تنش ( $\sigma_h$ ) تابعی از مولفه قائم تنش ( $\sigma_v$ ) بوده و رابطه آنها به صورت زیر بیان می‌گردد:

مدل‌های رفتاری که در این نرم‌افزار برای بلوک‌ها وجود دارد عبارتند از مدل تهی، مدل الاستیک، مدل پلاستیک موهر کولمب، مدل درزه در همه جا، مدل پلاستیک نرم‌شوندگی / سخت‌شوندگی، مدل پلاستیک دراکر پراگر [7].

$\phi$  تشریح شود. در انتخاب این معیار شکست دو فرضیه وجود دارد:

- ۱- مقاومت سنگ مستقل از تنش اصلی متوسط باشد.
- ۲- شکست بر روی یک یا چند صفحه توام، که از راستای تنش اصلی متوسط عبور کرده اتفاق می افتد و به طور مساوی در زوایای کمتر از ۴۵ درجه به راستای تنش اصلی حداکثر متمایل می شود.

برای معیار شکست موهر کولمب تنش های اصلی حداکثر و حداقل به ترتیب  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  از رابطه زیر بدست می آید. این رابطه در سال ۱۹۸۹ توسط گودمن پیشنهاد شد [3]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = c_0 + \sigma_3 \left[ \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

که  $c_0$  مقاومت فشاری نامحدود می باشد و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$c_0 = 2s_0 \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (6)$$

معادله شماره ۵ نشان می دهد که در این مدل، تنش برشی حداکثر با تنش اصلی حداقل متناسب است. با فرض یک عمق معین همانند  $H$ ، وضعیت تنش مرکب از یک مولفه تنش عمودی  $\sigma_v = \gamma H$  و دو تنش افقی غیر یکسان می باشد. به دلیل تغییر شکل پذیر بودن توده سنگ، تنش افقی ممکن است تا زمانی که شکست توده سنگ اتفاق بیافتد، افزایش یا کاهش پیدا کند. یکی از حالات شکست مربوط به گسل نرمال است و مشخصه آن این است که یک محیط تکتونیکی گسترش می یابد. به عبارتی  $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$  می باشد [3]. با جایگزینی  $\sigma_v = \sigma_1$  و  $\sigma_h = \sigma_3$  در معادله ۵ و با توجه به فرمول نسبت تنش افقی به عمودی یعنی  $k_{min} = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$  خواهیم داشت:

$$k_{min} = \cot^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) - \frac{c_0}{\gamma H} \cot^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \quad (2)$$

$k$ : نسبت تنش و مقدار آن با استفاده از روش ثقلی و در محیط پلاستیک بصورت زیر تعیین می گردد:

$$k = \frac{v}{1-v} \quad (3)$$

$v$ : نسبت پواسون است و در اکثر سنگ ها بین بیشتر از ۰/۲ تا کمتر از ۰/۳۳ قرار دارد و لذا مقدار  $k$  همیشه کوچکتر از یک و بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ تغییر می کند و این در حالی است که مقدار  $k$  حاصل از نتایج اندازه گیری واقعی تنش های برجا در ۹۴ درصد حالات بزرگتر از ۱ و در نزدیک سطح زمین تا بیش از ۴ می رسد.

در توده سنگی که رفتار پلاستیک یا ویسکو-پلاستیک دارد، مقدار  $k$  به عدد یک میل می کند. تحقیقات فراوانی توسط محققین در رابطه با تغییر تنش های برجا با تغییرات عمق در سایت های مختلف و برای نقاط مختلف دنیا انجام شده است. بسیاری از این داده ها برای اعماق کمتر از ۳۰۰۰ متر می باشد. نمونه هایی از نمودارهای تنش و تغییرات آن به همراه تغییرات عمق مطرح شده است.

رامل در سال ۱۹۸۶ یک تحقیق وسیعی از تغییرات تنش با تغییرات عمق توسط اندازه گیری های تنش شکست هیدرولیکی عمیق در نقاط مختلف جهان انجام داده است [3].

همچنین هوک برآون در سال ۱۹۷۸ با انجام آزمایشاتی بر روی انواع داده ها، تغییرات تنش عمودی و نسبت تنش افقی متوسط و تنش عمودی را با تغییرات عمق در نقاط مختلف جهان نشان می دهد.

$$\frac{100}{z} + 0.3 < k < \frac{1500}{z} + 0.5 \quad (4)$$

$m$ : تغییرات عمق بر حسب  $Z$

مقاومت سنگ بکر می تواند توسط معیار شکست موهر کولمب و با استفاده از چسبندگی  $c$  و زاویه اصطکاک

رابطه زیر توسط شئوری به منظور محاسبه نسبت تنش برجای افقی و قائم ارائه گردید:

$$K=0.25+E_h(0.001+1/H) \quad (11)$$

از نکات مهم در تعیین مقدار k، عملکرد گسل‌های منطقه می‌باشد، همانطور که گفته شد، زون شکست موجود در تکیه‌گاه چپ سد سیمره بین ۱۰ گسل واقع شده است و عملکرد این گسل‌ها نرمال می‌باشد. در مواردی که کوچک‌ترین تنش اصلی حالت افقی و بزرگ‌ترین تنش اصلی حالت عمودی باشند، گسله نرمال را به وجود می‌آورند. بنابراین می‌توان با اطمینان گفت مقدار k کوچک‌تر از ۱ می‌باشد.

با توجه به اینکه در این منطقه آزمون‌های مستقیم تنش برای تعیین تنش برجا انجام نشده است بنابراین برای بدست آوردن مولفه‌های تنش برجا و همچنین تعیین مقدار k از روابط تجربی یاد شده استفاده گردید.

با بهره‌گیری از نتایج حاصل از روابط تجربی جدول شماره ۴ تهیه شده است.

جدول ۴- تعیین مقادیر نسبت بین تنش‌های برجا، K در زون شکست موجود در تکیه‌گاه چپ سد سیمره

تعیین k با استفاده از روابط ارائه شده				
۱۱	۱۰ و ۹	۷	۴	۳
۱/۶۱	۲/۶۶	۰/۳۵۳	۱/۱-۱۲/۵	۰/۳۳
۰/۹۷	۰/۳۷۶	۰/۳۳	۱/۸۴-۲۳/۵۸	
* مقدار حداکثر و متوسط مقدار k که در جدول آمده است براساس حداکثر ارتفاع و متوسط ارتفاع شیروانی مورد مطالعه یعنی ۱۹۰ متر و ۹۵ متر محاسبه شده است (به جز سه معادله ۳، ۹ و ۱۰).				

با توجه به این که در منطقه مورد مطالعه، لایه‌بندی مؤثرترین ناپیوستگی در منطقه می‌باشد، میزان k تخمین زده شده از فرمول‌های ۹ و ۱۰ که توسط

در این حالت شکست سنگ به موازات بزرگ‌ترین مولفه تنش افقی  $\sigma_h$  خواهد بود [3].

در مقایسه بین سنگ بکر و سنگ شکسته شده، سنگ شکسته شده ذاتاً دارای مقاومت کششی صفر و مقاومت برشی کمی خواهد بود. در حقیقت صفحات ضعیف، محدوده موجود برای k را به دلیل لغزش درزه یا بازشدگی آن کاهش خواهد داد. مقاومت برشی سنگ بکر با معیار شکست موهر کولمب با عبارت معین در فرمول شماره ۵ تشریح می‌شود.

به عبارتی مقاومت برشی درزه توسط معیار کولمب با چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک  $\phi_j$  تعریف می‌شود. بر حسب تنش‌های اصلی یعنی  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  مقاومت برشی به شکل زیر محاسبه می‌شود [3].

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{\tan(\delta + \phi_j)}{\tan \delta} \quad (8)$$

اگر مقادیر زاویه جهنداری  $\delta$  در محدوده ۱۵ الی ۴۵ درجه قرار گیرد، لغزش در طول درزه‌ها قبل از اینکه مقاومت سنگ بکر بسیج شود، اتفاق می‌افتد. در عوض محدوده تغییرات برای k کاهش می‌یابد. راه‌اندازی با حالت ابتدائی تنش یعنی  $\sigma_v = \gamma H$  و  $\sigma_h$  و با استفاده از فرمول شماره ۸،  $k_{min}$  و  $k_{max}$  مستقل از عمق بوده و از طریق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$k_{min} = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta + \phi_j)} \quad (9)$$

$$k_{max} = \frac{\tan(\delta + \phi_j)}{\tan \delta} \quad (10)$$

در رابطه بالا

$\phi_j$ : زاویه اصطکاک داخلی لایه‌بندی‌ها

روابط ۹ و ۱۰ معمولاً برای محیط‌های به‌کار برده می‌شود که توده سنگ دارای درزه‌های تقریباً منظم در تمامی قسمت‌های سنگ باشد و در آن به‌طور منظم لایه‌بندی‌ها دیده شود [3].

هدف از این کار آنالیز حساسیت بر روی مقدار  $k$  و انتخاب آن می باشد.

مقادیر  $k$  که در این تحقیق و با توجه به بازه آن انتخاب شد اعداد  $0/33$ ،  $0/4$ ،  $0/45$ ،  $0/5$  و  $0/57$  می باشد. جدول شماره ۵ نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی مذکور را در مقادیر  $k$  های مختلف در دو حالت الاستیک و پلاستیک نشان می دهد. نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی در حالت پلاستیک نشان می دهد که میزان جابه جایی کلی بلوک ها با افزایش مقدار  $k$  تا مقدار  $0/5$  افزایش می یابد اما در مقدار  $0/57$  کاهش می یابد. با این تفاسیر مقدار حداکثر جابه جایی کل بلوک ها در  $k$  برابر  $0/5$  اتفاق می افتد. تعداد المان تسلیم یافته نیز با افزایش مقدار  $k$  تا  $0/4$  نرخ صعودی داشته سپس از مقدار آن کاسته می شود. حداکثر تعداد المانی که تحت کشش گسیخته شده است در مقدار  $k$  برابر  $0/45$  بوده و مقدار آن برابر  $106$  المان می باشد.

گودمن در سال ۱۹۷۶ ارائه شد و مستقل از عمق می باشد به عنوان مقادیر اصلی انتخاب  $k$  انتخاب شد. با توجه به نتایج حاصل از روابط تجربی و مقادیر موجود در جدول و با توجه به عملکرد نرمال گسل های موجود در شیروانی مورد مطالعه، مقدار  $k$  عددی کوچکتر از ۱ در نظر گرفته شده است.

به همین دلیل مقدار  $k$  محاسبه شده از معادله شماره ۹ به همراه افزایش و کاهش ۵۰ درصد آن به عنوان محدوده آنالیز حساسیت انتخاب  $k$  در نظر گرفته شد. به عبارتی خواهیم داشت:

$$0.5 \times k_{\min} < k < 1.5 \times k_{\min}$$

$$k_{\min} = 0.376 \longrightarrow \boxed{0.188 < k < 0.5}$$

از آن جایی که مقدار حداقل  $k$  در جدول  $0/33$  بوده و از طریق معادله شماره ۳ محاسبه شده است، به جای مقدار حداقل  $k$  در بازه بالا عدد  $0/33$  را جایگزین می کنیم.

پس بازه انتخابی  $k$  به منظور آنالیز حساسیت به شکل زیر خواهد بود:

$$\boxed{0.33 < k < 0.5}$$

در این تحقیق با توجه به مقادیر مختلف  $k$  (نسبت تنش های افقی به قائم)، سطح تنش برجا وارد بر مدل محاسبه شد و بعد از آن، مدل مذکور برای رسیدن به حالت تعادل با تعداد کافی مرحله زمانی اجرا گردید.



جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه را در مقادیر k های مختلف در دو حالت الاستیک و پلاستیک

مقدار k	برشی				مقدار k	افقی			
	۰/۵۷	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴		۰/۳۳	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵
حداکثر جابجایی کلی بلوک‌ها (cm)	۷/۳۶	۸/۹	۶/۸۸	۶/۵۴	۵/۷	۷/۳۶	۸/۹	۶/۸۸	۶/۵۴
تعداد المان تسلیم یافته	۲۶۷۳	۲۷۲۴	۲۷۴۹	۲۹۶۲	۲۹۴۰	۲۶۷۳	۲۷۲۴	۲۷۴۹	۲۹۶۲
تعداد المان گسیختگی تحت کشش	۹۲	۹۵	۱۰۶	۲۲	۲۳	۹۲	۹۵	۱۰۶	۲۲
تعداد المان پلاستیک شده	۲۷۶۵	۲۸۱۹	۲۸۵۵	۲۹۸۴	۲۹۶۳	۲۷۶۵	۲۸۱۹	۲۸۵۵	۲۹۸۴
فاکتور ایمنی (معیار موهر کولمب)	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰	۲-۱۰
حداکثر جابجایی کلی بلوک‌ها (cm)	۳/۲۴	۲/۹۵	۲/۸۵	۲/۶۶	۱/۷۸	۳/۲۴	۲/۹۵	۲/۸۵	۲/۶۶

در مجموع، بیشترین تعداد کل نقاط پلاستیک یافته در مقدار k برابر ۰/۴ بوده و مقدار آن برابر ۲۹۸۴ المان می‌باشد. همچنین فاکتور ایمنی محاسبه شده با توجه به مقادیر مختلف k حاکی، از پایداری شیروانی مورد مطالعه و مقدار بزرگ‌تر از ۲ می‌باشد.

نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی در حالت الاستیک نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی کلی بلوک‌ها با افزایش مقدار k افزایش می‌یابد و در مقدار k برابر ۰/۵۷ بیشترین میزان جابه‌جایی کلی بلوک‌ها بوده و مقدار آن برابر ۳/۲۴ سانتی‌متر می‌باشد. همچنین در این تحقیق مدل شبیه سازی شده در

حالت روش کاهش مقاومت که نرم‌افزار یودک (UDEK) قادر به حل آن می‌باشد محاسبه شده است. فاکتور ایمنی نسبت مقاومت حقیقی سنگ به مقاومت برشی کاهش یافته در شکست می‌باشد.

تکنیک کاهش مقاومت برشی برای اولین بار با استفاده از المان‌های محدود، توسط زینکیوویچ و همکارانش در سال ۱۹۷۵ به منظور محاسبه فاکتور ایمنی یک شیروانی که ترکیبی از چندین مواد است، مورد استفاده قرار گرفته شد. با اجرای تحلیل پایداری شیروانی با استفاده از تکنیک کاهش مقاومت برشی شبیه‌سازی‌هایی برای یک‌سری فاکتورهای ایمنی آزمایشی فزاینده (F) اجرا می‌شود. خواص مقاومت برشی حقیقی، چسبندگی (C) و زاویه اصطحاکاک تکنیک کاهش مقاومت برشی برای اولین بار با استفاده از المان‌های محدود، توسط زینکیوویچ و همکارانش در سال ۱۹۷۵ به منظور محاسبه فاکتور ایمنی یک شیروانی که ترکیبی از چندین مواد است، مورد استفاده قرار گرفته شد. با اجرای تحلیل پایداری شیروانی با استفاده از تکنیک کاهش مقاومت برشی شبیه‌سازی‌هایی برای یک‌سری فاکتورهای ایمنی آزمایشی فزاینده (F) اجرا می‌شود. خواص مقاومت برشی حقیقی، چسبندگی (C) و زاویه اصطحاکاک (φ) برای هر آزمون مطابق با فرمول‌های زیر کاهش می‌یابد:

$$c_{\text{trial}} = \left(\frac{1}{F}\right) c \quad (12)$$

$$\varphi_{\text{trial}} = \arctan\left(\frac{1}{F}\right) \tan\varphi \quad (13)$$

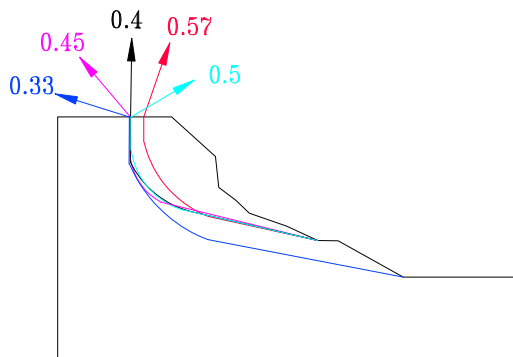
تکنیک کاهش مقاومت برشی دو مزیت اصلی نسبت به تحلیل‌های پایداری شیروانی تعادل حدی دارد.

بحرانی را به ازای مقادیر  $k$  از طریق تحلیل پایداری به روش کاهش مقاومت و توسط نرم افزار یودک (UDEC) را نشان می دهد.

همچنین شکل شماره ۲ نشان دهنده موقعیت قرارگیری سطوح بحرانی شکست بر روی شیروانی مورد مطالعه به ازای مقادیر  $k$  می باشد.

جدول ۷- مشخصات مربوط به موقعیت قرارگیری سطوح بحرانی شکست شیروانی به ازای مقادیر  $k$

مقدار $k$	فاصله ترک کششی تا لبه پله (متر)	عمق لغزش (متر)	عمق ترک کششی (متر)
۰/۳۳	۳۳/۴۶	۱۶۱/۱	۳۶/۱
۰/۴	۳۲/۵۲	۱۱۲/۸۱	۳۵/۴۵
۰/۴۵	۳۲/۶۴	۱۱۰/۵۳	۲۹/۸۹
۰/۵	۳۲/۰۳	۱۱۲/۸۵	۲۵/۶
۰/۵۷	۲۱/۸۷	۱۱۳	۱۸/۹۴



شکل ۲- موقعیت قرارگیری سطوح بحرانی شکست بر روی شیروانی مورد مطالعه به ازای مقادیر  $k$

اول این که، سطح لغزش بحرانی به صورت اتوماتیک وار مشخص می شود و تعیین شکل سطح لغزش در پیشروی، ضروری نمی باشد. دوم اینکه روش های عددی به طور اتوماتیک وار، تعادل گردشی و انتقالی را در هر المان ایفا می کنند در صورتی که هیچ کدام از روش های تعادل حدی قادر به انجام این کار نمی باشند. نتایج حاصل از تحلیل به روش کاهش مقاومت توسط در جدول شماره ۶ آمده است. UDEC نرم افزار یودک

جدول ۶- نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه را در مقادیر  $k$  های مختلف در حالت کاهش مقاومت

مقدار $k$	۰/۳۳	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۷
حداکثر جابجایی کلی بلوک ها (cm)	۱۲/۱	۱۶/۱	۹/۸۸	۱۱/۶۶	۱۱/۹۳
تعداد المان تسلیم یافته	۱۰۷۷۴	۹۸۹۰	۸۲۱۸	۱۰۶۶۷	۱۲۷۰۰
تعداد المان گسیختگی تحت کشش	۹۴۲	۱۱۶۴	۱۰۴۹	۷۴۶	۴۶۸
تعداد المان موجود در سطح شکست	۴۱۰۲	۳۶۰۳	۳۸۷۴	۳۱۶۴	۲۱۹۴
تعداد المان پلاستیک شده	۱۵۸۱۸	۱۴۶۵۷	۱۳۱۴۱	۱۴۵۷۷	۱۵۳۶۲
فاکتور ایمنی	۲/۶۵	۲/۶۷	۲/۶۶	۲/۶۸	۲/۶۸

یکی دیگر از مسائلی که در آنالیز حساسیت بر روی مقادیر  $k$  قابل توجه می باشد موقعیت قرارگیری سطوح بحرانی شکست شیروانی مورد مطالعه در ازای هر مقدار  $k$  می باشد. جدول شماره ۷ مشخصات هر سطح

### بحث و نتیجه گیری

برای بدست آوردن میزان نسبت تنش های برجای بحرانی  $k$ ، ابتدا فاکتور ایمنی مدنظر قرار گرفته شد.

به دلیل نزدیک بودن مقدار تمامی پارامترها به جز پارامتر عمق لغزش، معیار قضاوت در این مورد، عمق لغزش انتخاب شد.

در نهایت نسبت  $k$  برابر  $0/33$  با توجه به این مطلب که بزرگترین عمق لغزش را ایجاد می‌کند به‌عنوان نسبت تنش بحرانی مشخص شد.

### منابع

۱- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۱)، گزارش مطالعات مکانیک سنگ، سد و نیروگاه سیمره (مطالعات مرحله دوم)، جلد ۴-۱، ص ۳۰-۱۴.

۲- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۶)، گزارش تحلیل پایداری در بلوک‌های A و B واقع در تکیه‌گاه جناح چپ سد سیمره، مطالعات مرحله سوم، ص ۵-۱.

3-Kahatadeniya. K.S, Nanakorn. P, Neaupane. K.M., 2009, 'Determination of the Critical Failure Surface for Slope Stability Analysis Using ant-colony Optimization', Engineering Geology (108), pp 133-141.

4-L.C. Li, C.A. Tang, W.C. Zhu, Z.Z. Liang., 2009, 'Numerical analysis of slope stability based on the gravity increase method', Computers and Geotechnics(36), pp1246-1258.

5-Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah., 2004, 'Rock Slope Engineering Civil and mining', The Institute of Mining and Metallurgy, 4<sup>th</sup> Edition, pp 15-46.

6-Amadei. B., Stephansson. O., 1997, 'Rock Stress And Its Measurement', Published by Chapman & Hall, London. First Edition, pp 23-35.

7-Itasca Consulting Group, Inc. 2004, 'UDEC, Universal Distinct Element Code' User's Manual, Version 4.0.

8-Eberhardt. E., 2003, 'Rock Slope Stability Analysis Utilization of Advanced Numerical Techniques', Geological Engineering\Earth And Ocean sciences at UBC, 6339 Stores Rd., Vancouver, BC, V6T 1Z4, CANADA. pp 2-4.

بعد از بررسی نتایج بدست آمده برای آن، مشخص شد که میزان تغییرات این پارامتر کمتر از ۱ درصد می‌باشد (۲/۶۵ الی ۲/۶۸). این مطلب بیانگر این موضوع است که این پارامتر برای انتخاب نسبت تنش‌های برجای بحرانی منطقه مناسب نیست. بنابراین باید به دنبال پارامتر بهتری برای نیل به این هدف بود.

در مرحله بعد، پارامترهای تعداد المان‌های تسلیم یافته طول ترک کششی، فاصله ترک کششی از لبه پله جهت تعیین مقدار نسبت  $k$  بحرانی مورد بررسی قرار گرفت که به دلیل اشاره شده در قسمت فوق، مورد توجه قرار نگرفت.

در ادامه، عمق لغزش و منطقه دارای نقاط پلاستیک مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که به غیر از نسبت تنش برجای ( $k=0/57$ ) بقیه مقادیر نسبت تنش‌های برجا دارای منطقه لغزش نسبتاً یکسان می‌باشند. لازم به ذکر است منطقه لغزش با نسبت تنش ( $k=0/57$ ) کوچک‌تر از سایر موارد است. در این میان عمق ترک کششی در نسبت تنش برجای ( $k=0/33$ ) از بقیه موارد بزرگ‌تر می‌باشد. لذا به نظر می‌رسد نسبت تنش برجای بحرانی در این تحقیق برابر  $0/33$  می‌باشد.

در این تحقیق پارامترهای فاکتور ایمنی، تعداد المان‌های تسلیم‌یافته، عمق لغزش، طول ترک کششی فاصله ترک کششی از لبه پله جهت تعیین مقدار نسبت  $k$  بحرانی مورد بررسی قرار گرفت.

