

تحلیل پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی

مهدی موسوی^{۱*}، علیرضا یاراحمدی بافقی^۲ و حمید رضا بخشی^۳

^۱دانشیار دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی - دانشگاه یزد

^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۲/۱۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۱/۲۵، تاریخ تصویب ۸۸/۵/۱۴)

چکیده

در گذشته تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، به طور معمول با روش‌های گرافیکی یا محاسبات دستی انجام می‌گرفت، اما امروزه روش‌های متنوعی برای تحلیل پایداری شیب وجود دارد و لازم است با توجه به شرایط منطقه و نوع شکست بالقوه، روش تحلیل مناسب انتخاب شود. در تحلیل‌های دوبعدی تأثیر مقعر و یا محدب بودن دیواره معدن در نظر گرفته نمی‌شود. حال آنکه شیب‌های مقعر به دلیل تأثیر نگهداری جانبی توسط مواد دو طرف توده لغزشی، پایدارترند. در معادن روباز که سعی در افزایش شیب می‌شود، توجه به این نکته بسیار مهم است. در این مقاله پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه در طرح گسترش با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای تحلیل پایداری، دیواره غربی با توجه به نوع سنگ، به سه منطقه ساختاری تقسیم شد و با استفاده از نتایج آزمایش‌هایی که قبل از این انجام شده بود و انجام آزمایش‌های تکمیلی، خواص مقاومتی توده سنگ و درزه‌ها تعیین شد. همچنین در سنگ آندزیت که سنگ غالب دیواره غربی است، مشخصات هندسی دسته درزه‌ها نیز معین شد. سپس برای مشخص کردن رفتار کلی توده سنگ، تحلیل‌هایی با استفاده از نرم‌افزار Slide^{5.0} انجام گرفت و تأثیر فاکتور آشفتگی، آب زیرزمینی، شتاب افقی لرزه و نوع سنگ بر پایداری دیواره بررسی شد. در مرحله بعد مدل هندسی و مکانیکی معدن در نرم‌افزار 3DEC، ساخته شد و پایداری دیواره در وضعیت‌های مختلف بررسی شد. نتایج حاصل از 3DEC، ریزش‌هایی در حد چند پله در قسمت‌های پایین دیواره را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد در صورت زهکشی اکثر مناطق ناپایدار، پایدار می‌شوند، ولی باز هم در پاشنه ریزش‌هایی با وسعت کمتر مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، معدن مس سرچشمه، مدل سازی عددی، 3DEC

مقدمه

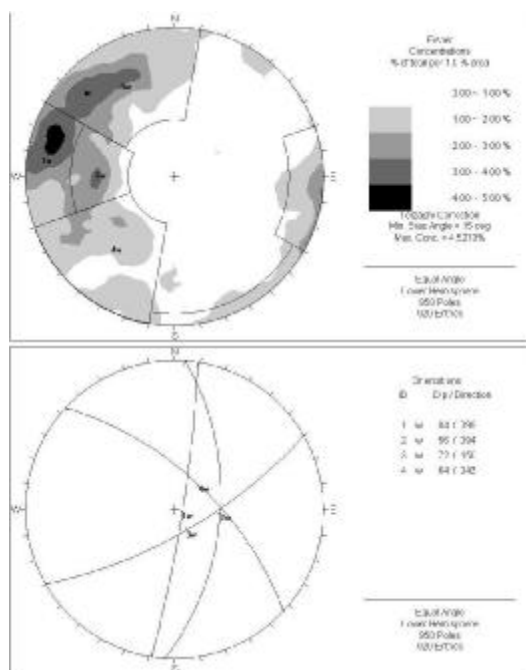
تکنیک‌های مناسب تحلیل پایداری شیب استفاده شود. با توجه به پیچیدگی‌های هندسی دیواره‌های معدن و برای بررسی فرایندهای تلفیقی (برای مثال: بارهای لرزه‌ای، فشار آب و ...)، تحلیل پایداری با استفاده از مدل‌سازی عددی مناسب‌تر است. بخصوص در دیواره غربی معدن که ارتفاع آن به بیشتر از ۸۰۰ متر می‌رسد، لازم است تأثیر شعاع انحناء در نظر گرفته شود. همچنین هندسه شیب نیز به گونه‌ای است که مدل‌های دو بعدی با فرض تقارن یا کرنش صفحه‌ای، نمی‌توانند بیانگر رفتار آن باشند و بهتر است از مدل‌های سه بعدی استفاده شود.

موقعی که شیب سنگی شامل چندین دسته درزه باشد که مکانیزم گسیختگی را کنترل می‌کنند، مدل‌سازی ناپیوسته مناسب‌تر است. توده سنگ دیواره غربی معدن سرچشمه نیز ناپیوستگی‌های زیادی دارد. در این شرایط، مدل‌سازی ناپیوسته نتایج واقعی‌تری می‌دهد.

امروزه از یک طرف کاهش قیمت تمام شده فلزات، به عنوان تابعی از پیشرفت تکنولوژی و حضور ماشین‌آلات عظیم الجثه در معادن روباز و از طرفی دیگر افزایش قیمت پایه فلزات، باعث شده است منابع بیشتری از مواد معدنی به ذخیره قابل استخراج تبدیل شوند و عیار حد اغلب کانسارها به پایین‌ترین حد ممکن تنزل یابد. با گذشت زمان و رشد اقتصادی، ذخایری که به نسبت در اعماق قرار داشتند و امکان استخراج آنها تا چند سال قبل وجود نداشت، بار دیگر طراحی و آماده استخراج روباز شده‌اند. از این رو نقش پایداری شیب چه در طراحی، چه در اجرا و یا پیش‌بینی ریسک شکست، بسیار پر اهمیت است و لازم است از تکنیک‌های مناسب تحلیل پایداری شیب در طراحی و تحلیل برگشتی استفاده شود.

در معدن مس سرچشمه نیز که یکی از بزرگ‌ترین معادن مس پورفیری جهان است، لازم است از

(شکل ۱). بعد از تحلیل این داده‌ها، برای تعیین صحت آنها برداشت‌های سطحی تکمیلی در دیواره غربی انجام گرفت و مشخص شد علاوه بر این چهار دسته درزه، درزه‌هایی وجود دارند که به سمت داخل دیواره شیب دارند. این درزه‌ها به عنوان دسته درزه تصادفی وارد شدند.



شکل ۱: دسته درزه‌های اصلی دیواره غربی معدن سرچشمه.

پس از تشخیص چهار دسته درزه اصلی و یک دسته درزه تصادفی در دیواره غربی، میانگین و انحراف معیار شیب، جهت شیب و فاصله‌داری مربوط به هر دسته درزه به دست آمد. فاصله‌داری به صورت میانگین فواصل عمودی بین ناپیوستگی‌های موجود در یک دسته ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود و به طور معمول توزیع نمایی دارد. جهت داری سطح درزه‌ها در فضا توسط شیب و جهت شیب درزه مشخص می‌شود که توزیع نرمال دارند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول (۱) آورده شده است.

کیفیت توده سنگ

برای ارزیابی کیفیت توده سنگ در دیواره غربی معدن از سیستم امتیاز دهی به توده‌های سنگی (RMR₈₉) استفاده شد. در استفاده از این سیستم طبقه‌بندی، با توجه به شرایط، توده سنگ مورد بررسی به چند منطقه ساختاری^۵ تقسیم شده و هر منطقه نیز به طور جداگانه

نرم افزار سه بعدی مناسب برای تحلیل عددی ناپیوسته، نرم افزار 3DEC است. این نرم افزار محصول شرکت Itasca است که بر پایه روش اجزاء مجزا که یکی از تکنیک‌های ناپیوسته است، بنا نهاده شده است و قابلیت تحلیل عددی محیط‌های ناپیوسته به صورت سه‌بعدی را دارد. با استفاده از 3DEC می‌توان انواع گسیختگی‌های سنگی و عوامل مؤثر بر آنها را بررسی کرد [۱]. همچنین این نرم افزار امکان استفاده از مدل‌های رفتاری غیر خطی، شبیه سازی ناپیوستگی‌ها و غیره را فراهم کرده است. این نرم افزار بخصوص در مواقعی که نوع گسیختگی گوه‌ای تشخیص داده شود به کار می‌رود.

در این مقاله، ابتدا خواص ژئوتکنیکی دیواره غربی معدن مس سرچشمه تعیین شده و با استفاده از روش تعادل حدی دو بعدی، بررسی‌هایی انجام می‌گیرد. در مرحله بعد بر مبنای نتایج حاصل از روش تعادل حدی دو بعدی، مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار 3DEC ساخته شده و تحلیل می‌شود.

خواص ژئوتکنیکی

وجود ساختارهای متنوع ژئوتکنیکی در معدن مس سرچشمه، تشکیلات معدنی را از حالت یک توده متجانس خارج کرده و وضعیت دشوار و پیچیده در تحلیل پایداری بوجود آورده است. شناخت این عوامل در قالب مطالعات ژئوتکنیکی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این بخش، این عوامل بررسی می‌شود.

ساختار

با توجه به اینکه در این تحقیق، شیب کلی دیواره غربی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد فقط ساختارهای اصلی شامل گسل‌ها و درزه‌های اصلی^۱ در مدل هندسی وارد می‌شوند و بقیه ساختارها (بافت سنگ^۲ و ساختارهای حد واسط^۳) به صورت تغییر در کیفیت توده سنگ^۴ در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین در مدل هندسی وارد نمی‌شوند [۲].

در معدن مس سرچشمه، برداشت‌های سطحی و عمقی زیادی انجام گرفته است. با تحلیل داده‌های مربوط به این برداشت‌ها در دیواره غربی توسط نرم‌افزار Dips^{5.0} مشخص شد که شکستگی‌های اصلی در کل دیواره غربی، به طور تقریبی روند یکسانی دارند. با بررسی درزه‌های اصلی در این دیواره، چهار دسته درزه تشخیص داده شد

جدول ۱: پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌های دیواره غربی معدن مس سرچشمه.

System	Dip (Degree)		Dip Direction (Degree)		Spacing (m)	
	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.
J1	84	5.3	99	11.3	5.4	6.6
J2	56	8.2	94	12.4	7.5	7.1
J3	72	12.0	150	17.5	3.8	5.7
J4	64	15.0	43	18.8	5.7	5.1
J5 (Random)	71	8.7	266	31.3	18.4	24.7

جدول ۲: ارزیابی RMR در دیواره غربی معدن مس سرچشمه.

	SP		Dike		Andesite	
	Avg. Value	Avg. Rating	Avg. Value	Avg. Rating	Avg. Value	Avg. Rating
UCS (MPa)	23	3	77	7	63	6
RQD	8	3	80	17	70	13
Joint spacing (cm)	<6	5	20-60	10	6-20	8
Joint condition	Slightly rough, 1mm to 5 mm separation with pyrite filling, Slightly Weathered walls	15	Slightly rough, 1mm to 5 mm separation with calcite/ pyrite filling, Slightly Weathered walls	18	Slightly rough, 1mm to 5 mm separation with calcite/ pyrite filling, Slightly Weathered walls	17
Groundwater	Dry	15	Dry	15	Dry	15
Total		41		67		59

آنها را یک واحد سنگی یکسان در نظر گرفت. ۳- سرچشمه پورفیری (SP): پاشنه دیواره غربی معدن روی این نوع سنگ قرار می‌گیرد. دگرسانی این سنگ فیلیک در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه در این تحقیق، هدف از تعیین RMR، محاسبه اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI) است، شرایط آب زیرزمینی خشک و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها مساعد در نظر گرفته می‌شود [۳]. مقدار مقاومت فشاری تک محوری سنگ سالم از نتایج آزمایش‌های تک محوری و سه محوری به دست آمده است. همچنین برای ارزیابی RQD، فاصله و شرایط ناپیوستگی‌ها از داده‌های گمانه‌های ژئوتکنیکی حفر شده در معدن استفاده شد. در جدول (۲) میانگین مقادیر

تحلیل می‌شود. مرز هر یک از منطقه‌های ساختاری اغلب با مشخصه‌های ساختاری بزرگی نظیر گسل و یا تغییر در نوع سنگ، منطبق است [۳]. دیواره غربی معدن با توجه به نوع سنگ به سه منطقه ساختاری تقسیم شد که عبارتند از:

۱- آندزیت: هر چند دگرسانی بر کیفیت سنگ‌های معدن تأثیر زیادی دارد، اما با توجه به اینکه دگرسانی غالب در آندزیت‌های دیواره غربی از نوع پروپیلیتیک است، این نوع دگرسانی برای آندزیت در نظر گرفته می‌شود.

۲- دایک: در دیواره غربی معدن دو نوع دایک (بیوتیت پورفیری و هورنبلند پورفیری) وجود دارد. نتایج آزمایش‌های نشان می‌دهد، این دو نوع دایک خواص مقاومتی مشابهی دارند. به طوری که در تحلیل می‌توان

جدول ۳: خواص توده سنگ دیواره غربی معدن مس سرچشمه (H=800m).

Geotechnical Formation	Intact Rock Properties		Rock Mass Properties					
	m_i	$\sigma_{ci} (kPa)$	$\gamma (kN/m^3)$	GSI	Property	D=0	D=0.5	D=1
Andesite	10	63	25.5	54	$\phi(\text{deg})$	33	28	20
					$c(\text{MPa})$	3.1	2.5	1.6
					m_b	1.93	1.12	0.37
					s	0.006029	0.002169	0.000468
					a	0.504	0.504	0.504
					$\sigma_{cm}(\text{MPa})$	12.0	9.0	5.1
					$\sigma_{tm}(\text{MPa})$	0.20	0.12	0.08
					$E(\text{GPa})$	10.0	7.5	5.0
					$K(\text{GPa})$	6.7	5.0	3.3
					$G(\text{GPa})$	4.0	3.0	2.0
Dike	12	77	25.7	62	$\phi(\text{deg})$	38	34	27
					$c(\text{MPa})$	4.1	3.4	2.4
					m_b	3.09	1.96	0.80
					s	0.014666	0.006303	0.001776
					a	0.502	0.502	0.502
					$\sigma_{cm}(\text{MPa})$	19.09	14.90	9.33
					$\sigma_{tm}(\text{MPa})$	0.37	0.25	0.17
					$E(\text{GPa})$	17.5	13.1	8.8
					$K(\text{GPa})$	11.7	8.7	5.8
					$G(\text{GPa})$	7.0	5.2	3.5
SP	8	24	24.9	36	$\phi(\text{deg})$	20	15	8
					$c(\text{MPa})$	1.4	1.0	0.5
					m_b	0.81	0.38	0.08
					s	0.000804	0.000197	0.000023
					a	0.515	0.515	0.515
					$\sigma_{cm}(\text{MPa})$	2.73	1.80	0.83
					$\sigma_{tm}(\text{MPa})$	0.02	0.01	0.01
					$E(\text{GPa})$	2.2	1.6	1.1
					$K(\text{GPa})$	1.8	1.4	0.9
$G(\text{GPa})$	0.8	0.6	0.4					

- ◀ مقدار اندیس مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، برای توده سنگ مورد بررسی (5 - $GSI = RMR_{89}$).
- ◀ فاکتور آشفستگی (D)؛
- ◀ وزن مخصوص توده سنگ (γ)؛
- ◀ ارتفاع شیب (H).
- و پارامترهای خروجی این نرم‌افزار نیز عبارتند از:
- ◀ مقاومت کششی توده سنگ (σ_t)؛
- ◀ مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (σ_c)؛
- ◀ مدول ارتجاعی توده سنگ (E_m)؛

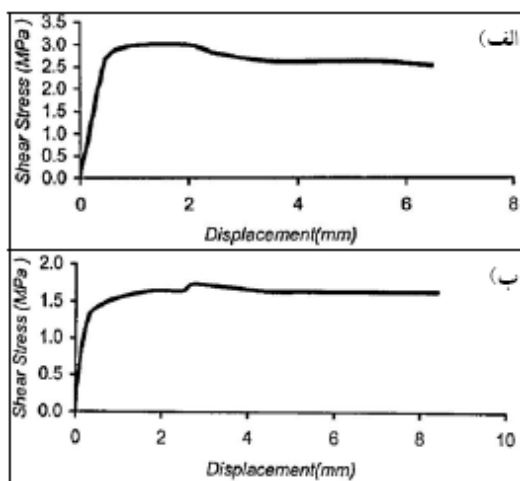
RMR محاسبه شده برای هر منطقه آورده شده است.

خواص توده سنگ

برای به دست آوردن خواص توده سنگ از ملاک هوک و براون (نسخه ۲۰۰۲) استفاده شد [۴]. برای تسریع در محاسبات می‌توان از نرم‌افزار Roclab استفاده کرد. پارامترهای ورودی این نرم‌افزار عبارتند از:

- ◀ مقاومت فشاری تک محوری تکه‌های سنگ بکر (σ_{ci}) و مقدار ثابت هوک و براون (m_i) که از آزمایش‌های سه محوره و تک محوره به دست می‌آیند،

که در آن v_r ضریب پواسون سنگ سالم، v_m ضریب پواسون توده سنگ، E_r مدول یانگ سنگ سالم و E_m مدول یانگ توده سنگ است.



شکل ۲: نمونه‌ای از آزمایش‌های مقاومت برشی مستقیم؛ (الف) پرشدگی کلسیت (ب) پرشدگی پیریت.

با در نظر گرفتن مقادیر زیر که برای آندزیت به دست آمده است خواهیم داشت:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= 15.2 \text{ GPa} \\ v_r &= 0.17 \\ E_m &= 10.0 \text{ GPa} \\ v_m &= 0.25 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{k_n}{k_s} = 2.8 \quad (4)$$

بدین ترتیب برای پرشدگی رس - پیریت، $k_n = 0.2 \text{ MPa/mm}$ و برای پرشدگی کلسیت و همچنین پرشدگی پیریت $k_n = 11.2 \text{ MPa/mm}$ به دست می‌آید.

تحلیل تعادل حدی

با توجه به شیب زیاد درزه‌ها در دیواره غربی معدن مس سرچشمه، امکان گسیختگی صفحه‌ای فقط در حد یک پله وجود دارد. با توجه به تأثیر دگرسانی در سنگ‌های دیواره معدن که سبب ایجاد محیطی به شدت درزه‌دار با خواص مقاومتی کم شده است، امکان ریزش قاشقی نیز در دیواره‌های معدن وجود دارد. برای تحلیل این نوع ریزش و همچنین مشخص کردن رفتار کلی توده سنگ در ابتدا تحلیل‌هایی با استفاده از نرم‌افزار Slide^{5.0} انجام گرفت.

تحلیل ریزش قاشقی در دو مقطع A-A و B-B دیواره نهایی معدن انجام گرفت (شکل ۳). در این تحلیل‌ها تأثیر عامل D، آب زیرزمینی، شتاب افقی لرزه و نوع سنگ بر

چسبندگی توده سنگ (c)؛

زاویه اصطکاک توده سنگ (φ)؛

پارامترهای m_b ، s و a توده سنگ.

در مرحله بعد می‌توان مدول حجمی (K) و مدول برشی (G) توده سنگ را از روابط زیر محاسبه کرد:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

که در آن ضریب پواسون (ν) برای آندزیت و دایک، ۰/۲۵ و برای سرچشمه پورفیری، ۰/۳۰ در نظر گرفته شد. خواص توده‌سنگ که با نرم‌افزار Roclab^{1.0} محاسبه شده است در جدول (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که پایین ارامترها در حالت اشباع بررسی شده‌اند.

خواص درزه‌ها

در معدن مس سرچشمه، درزه‌ها به دو دسته زبر و نرم تقسیم شدند. پرشدگی درزه‌های نرم از نوع رس - پیریت است. در این نوع درزه‌ها، ضخامت قابل توجهی از مواد پرکننده رسی به همراه پیریت وجود دارد. در این حالت از آزمایش‌های مکانیک خاک که روی مواد پرشدگی این درزه‌ها انجام شده بود، استفاده شد. برای این نوع درزه‌ها با استفاده از آزمایش‌های مقاومت، برشی مستقیم و سه محوری $C = 15 \text{ kPa}$ و $\varphi = 32^\circ$ به دست آمد.

همچنین برای به دست آوردن سختی برشی درزه‌ها (k_s) از منحنی‌های جا به جایی برشی - تنش برشی حاصل از آزمایش‌های مقاومت برشی، استفاده شد. چند نمونه از این آزمایش‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. شیب قسمت اولیه این منحنی‌ها به عنوان k_s در نظر گرفته شد. بدین ترتیب برای پرشدگی رس - پیریت، $k_s = 0.07 \text{ MPa/mm}$ و برای پرشدگی کلسیت و همچنین پرشدگی پیریت $k_s = 4 \text{ MPa/mm}$ به دست آمد.

برای تعیین سختی نرمال درزه‌ها از نسبت سختی نرمال به برشی استفاده شد. این رابطه برای بارگذاری تک محوری سنگ، شامل یک دسته از درزه‌های ساده با فاصله‌داری یکنواخت که در جهت عمود بر جهت بارگذاری قرار دارند به دست می‌آید [۱]:

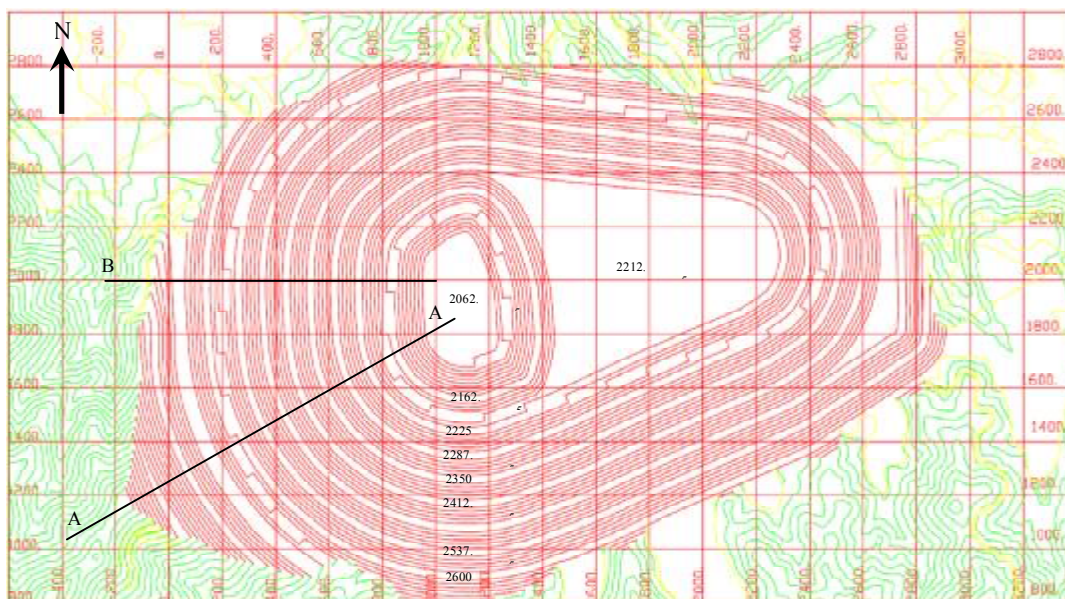
$$\frac{k_n}{k_s} = \frac{2[E_r(1+\nu_m) - E_m(1+\nu_r)]}{E_r - E_m} \quad (3)$$

داشت که اگر زاویه اصطکاک کمتر از ۳۰ درجه باشد و لغزش نیز عمقی باشد این روش بسیار خطا دارد [۶]. در مقاطع مورد نظر نوع سنگ غالب، آندزیت با $D=0/5$ می‌باشد که زاویه اصطکاک آن کمتر از ۳۰ درجه است، پس بهتر است از روش جانبی استفاده نشود. در شکل (۴) سطح لغزش بحرانی به دست آمده از روش بیشاپ در مقطع A-A، نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، لغزش سطحی است و فقط قسمت کوچکی از آن در منطقه‌ای بسیار آشفته قرار دارد. پس می‌توان عامل آشفستگی را برای کل توده سنگ ۰/۵ فرض کرد.

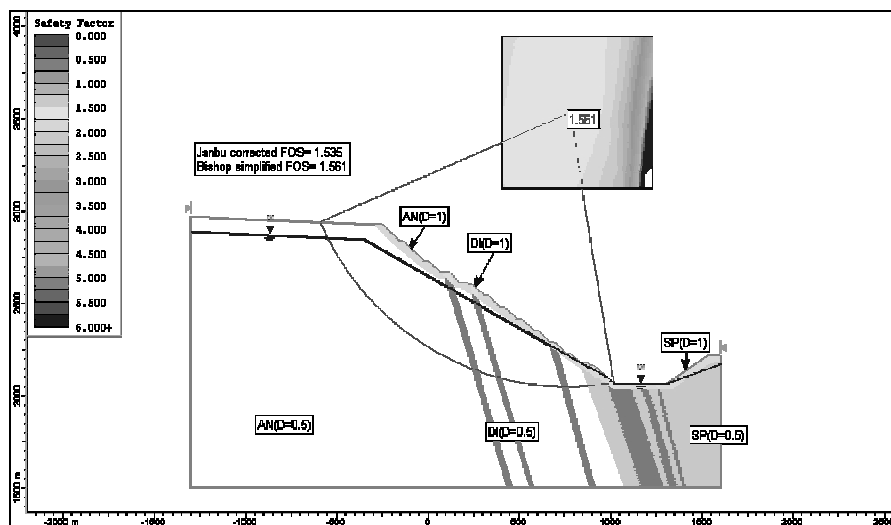
پایداری دیواره بررسی شد.

باید توجه داشت که فقط قسمت‌های سطحی دیواره دچار آشفستگی شدید ناشی از آتشیاری و روباره‌برداری می‌شوند و در اعماق بیشتر از سطح دیواره تأثیر این عوامل کمتر می‌شود، پس عامل D نیز با فاصله گرفتن از سطح دیواره کاهش می‌یابد [۵]. در تحلیل‌ها تا فاصله عمودی ۲۵ متر از سطح دیواره $D=1$ در نظر گرفته شد و در فواصل بیشتر از آن $D=0/5$ در نظر گرفته شد.

تحقیقات گذشته نشان داده که اغلب برای لغزش سطحی (که به طور معمول در سنگ‌های ضعیف مشاهده می‌شود)، روش جانبی مناسب‌تر است. البته باید توجه



شکل ۳: موقعیت مقاطع انتخابی در کاواک نهایی معدن مس سرچشمه جهت تحلیل.



شکل ۴: سطح لغزش بحرانی به دست آمده از روش بیشاپ در مقطع A-A.

جدول ۴: مقادیر عامل ایمنی در شرایط مختلف آب زیرزمینی.

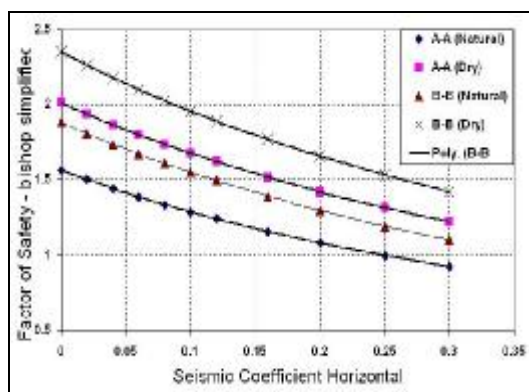
Section	Method	Groundwater condition		
		Natural	Dry	Saturate
A-A	Janbu corrected	1.53	2.00	1.41
	Bishop simplified	1.56	2.01	1.45
B-B	Janbu corrected	1.85	2.34	1.72
	Bishop simplified	1.88	2.35	1.76

در مرحله بعد برای بررسی تأثیر سطح آب زیرزمینی بر عامل ایمنی، تحلیل‌هایی با فرض کاملاً اشباع بودن و کاملاً خشک بودن توده سنگ انجام شد. نتایج در جدول (۴) آورده شده است. البته باید توجه داشت حتی در شرایط کاملاً خشک نیز از خواص مقاومتی در حالت اشباع استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد سطح آب زیرزمینی، تأثیر زیادی بر پایداری دیواره معدن دارد و لازم است این عامل در مدل عددی گنجانده شود.

برای بررسی تأثیر نوع سنگ بر پایداری دیواره، تحلیل‌هایی با جایگزینی دایک و یا سرچشمه پورفیری با سنگ مجاور آنها انجام شد. همچنین در تحلیل‌های بعدی به جای دایک و سرچشمه پورفیری در قسمت پاشنه محیط معادل در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در قسمت پاشنه، دایک و سرچشمه پورفیری با نسبتی تقریباً مساوی وجود دارد خواص محیط معادل مورد نظر با میانگین گیری از خواص دایک و سرچشمه پورفیری به دست آمد. عامل ایمنی به دست آمده از این تحلیل‌ها در

جدول (۵) آورده شده است.

تأثیر مثبت دایک‌ها و تأثیر منفی سرچشمه پورفیری در پایداری دیواره معدن در تحلیل‌های ذکر شده نمایان است. همچنین نتایج نشان می‌دهد، می‌توان برای ساده‌تر شدن مدل سازی عددی، کل توده سنگ را آندزیت در نظر گرفت. در مرحله بعد تحلیل‌های شبه استاتیک با در نظر گرفتن شتاب افقی لرزه انجام شد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. حداکثر شتاب افقی لرزه در معدن مس سرچشمه $0.158g$ با احتمال رخداد کمتر از ۱٪ تخمین زده شده است [۷]. با در نظر گرفتن این مقدار شتاب، در هیچ یک از مقاطع، عامل ایمنی کمتر از یک نمی‌شود. پس در این شرایط دیواره کلی معدن پایدار خواهد بود.



شکل ۵: تأثیر شتاب افقی لرزه بر عامل ایمنی.

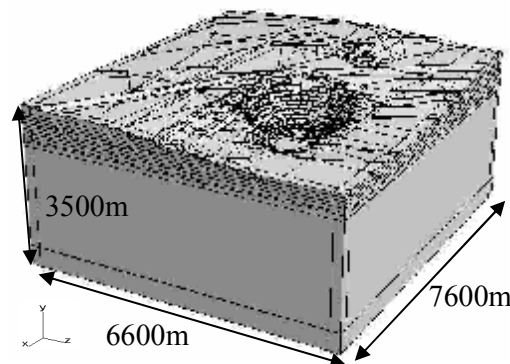
جدول ۵: مقادیر فاکتور ایمنی برای تغییر نوع سنگ.

Section	Condition Method	□	¥	#	*	€	£
		A-A	Janbu corrected	1.53	1.45	1.57	1.54
	Bishop simplified	1.56	1.48	1.60	1.56	1.58	1.55
B-B	Janbu corrected	1.85	1.78	1.89	1.86	1.87	1.85
	Bishop simplified	1.88	1.79	1.91	1.85	1.89	1.86
□ شرایط واقعی							
¥ جایگزینی دایک با سنگ مجاور آن							
# جایگزین کردن آندزیت بجای سرچشمه پورفیری							
* جایگزین کردن آندزیت بجای دایک و سرچشمه پورفیری							
€ جایگزین کردن محیط معادل بجای دایک و سرچشمه پورفیری در قسمت پاشنه							
£ جایگزین کردن محیط معادل بجای دایک و سرچشمه پورفیری در قسمت پاشنه و جایگزینی آندزیت بجای بقیه دایک‌ها							

مدل سازی عددی دیواره غربی معدن مس

سرچشمه

در تحلیل های سه بعدی نمی توان مرزها را خیلی دور از منطقه مورد نظر، گرفت. از طرفی موقعیت مرزها تأثیر بسزایی در نتایج دارد. برای حل این مشکل می توان مدل سازی را با یک مدل کلی بزرگ شروع کرد. در این حالت برجستگی های توپوگرافی نسبت به ابعاد خارجی مدل باید کوچک باشند و عمق مدل بگونه ای انتخاب می شود که تنش ها در ته مدل یکنواخت باشند. در ادامه مدل کوچک تر می شود و جزئیات افزایش می یابد. در 3DEC می توان تنش ها را در موقعیت های تعیین شده، به طور خودکار ثبت کرد. این تنش ها می توانند به عنوان نیروهای مرزی در مدل های کوچک تر به کار روند. در این صورت می توان توزیع تنش مرزی پیچیده تری نسبت به تغییرات خطی مرسوم ایجاد کرد. بنابراین ابعاد مرزها در مدل جزئی تر در مقایسه با برجستگی های توپوگرافی می توانند کوچک تر باشند [۱].



شکل ۶: مدل اولیه در نرم افزار 3DEC.

در معدن مس سرچشمه نیز از این تکنیک فوق استفاده شد. برای این هدف ابتدا یک مدل بسیار بزرگ ساخته شد. در شکل (۶) مدل ساخته شده نشان داده شده است. در این مدل محور x در جهت شرق، محور y به سمت بالا و محور z به سمت شمال است و توپوگرافی اولیه منطقه معدن در نظر گرفته شده است. در مراحل بعد می توان با حفظ تنش ها در مرزهای مدل کوچک تر، مناطق

بیرونی را از محاسبات حذف کرد.

قبل از حفاری یک وضعیت تنش برجا در زمین وجود دارد. برای به دست آوردن وضعیت تنش ها در مدل، ابتدا مدل بزرگ اولیه (مدل A) به تعادل رسانده می شود. در این حالت با توجه به شرایط توپوگرافی معدن تنش ها ثقیل در نظر گرفته می شوند. در مرحله بعد کاواک مورد نظر حفاری شده و مدل بار دیگر به تعادل رسانده می شود. در مراحل بعدی، با حفظ تنش های به دست آمده در مرزهای مدل کوچک تر مورد نظر (مدل B)، مناطق بیرونی از محاسبات حذف می شوند. در شکل (۷) وضعیت تنش ها (σ_{yy}) در حالت الاستیک و بعد از حفر کاواک نهایی معدن، در مقطع A-A مشاهده می شود. این مقطع در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مدل کل توده سنگ، آندزیت و $D=0.5$ در نظر گرفته شده است. همچنین در این شکل ابعاد مدل B در مقایسه با مدل اولیه و همچنین وضعیت تنش ها در مرزهای مدل B مشاهده می شوند.

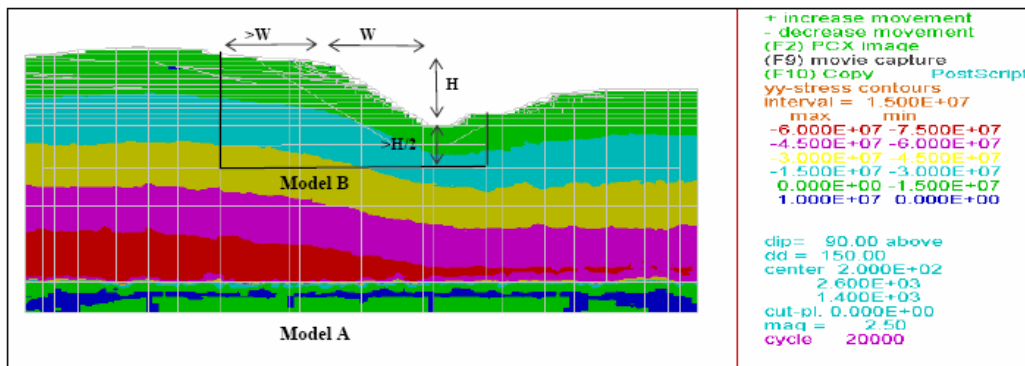
تحلیل پایداری دیواره غربی معدن بدون در نظر گرفتن درزه ها

بهتر است مدل سازی با مجموعه ساده شده ای از پارامترها و شرایط شروع شود [۸] و [۹]. برای مثال مدل الاستیک فرض شود و مقاومت را افزایش دهیم تا از گسیختگی جلوگیری شود و یا درزه ها صلب فرض شوند. این کارها از برای تشخیص اشتباهات قبلی در ساخت مدل، مفید هستند. بعد از بررسی نتایج وضعیت های ساده تر، مدل با مجموعه پارامترهای بهبود یافته حل می شود [۱]. برای این کار ابتدا مدل هایی بدون در نظر گرفتن درزه ها ساخته و اجرا شدند و سپس درزه ها در مدل گنجانده شدند.

در این تحلیل ها، کل توده سنگ آندزیت، $D=0.5$ و خواص مواد در حالت الاستیک و پلاستیک مطابق جدول (۶) در نظر گرفته شد. در این جدول ϕ زاویه اتساع است.

جدول ۶: خواص مواد استفاده شده در تحلیل عددی.

	K (GPa)	G (GPa)	C (MPa)	ϕ (deg)	σ_{tm} (MPa)	ϕ (deg)
Elastic	5	3	100000	*	10000	*
Plastic	5	3	2.5	28	0.12	3



شکل ۷: وضعیت تنش‌ها در مرزهای مدل B بعد از حفاری کاواک.

$$\phi^{trial} = \arctan[(1/f) \tan \phi] \quad (6)$$

که در آن c چسبندگی و ϕ زاویه اصطکاک واقعی است. علاوه بر این عوامل فوق مقاومت کششی توده سنگ و زاویه اتساع نیز در هر مرحله کاسته شد. این روند (افزایش f) ادامه می‌یابد تا گسیختگی رخ دهد، در این حالت عامل ایمنی واقعی، مساوی عامل ایمنی آزمایشی است.

برای بررسی پایداری دیواره در این حالت، از نشانگرهای پلاستیک استفاده شد. برای این کار بعد از هر بار افزایش عامل ایمنی آزمایشی، مدل B اجرا شد و وضعیت مناطق پلاستیک در مقاطع مختلف بررسی شدند. با افزایش عامل ایمنی آزمایشی، مشاهده شد ابتدا مناطقی که در پاشنه شیب قرار دارند، ملاک شکست را اغنا می‌کنند. با افزایش بیشتر این عامل این مناطق گسترده‌تر می‌شوند. البته در مقطع B-B که در شکل (۳) نشان داده شده است، گسترده‌تر شدن این مناطق بیشتر از دیگر مقاطع است. بدین ترتیب عامل ایمنی واقعی حداقل ۲/۰ و در مقطع B-B حاصل می‌شود.

عامل ایمنی در مقطع B-B، با استفاده از روش بیشاپ ۱/۸۸ بدست آمد که به عامل ایمنی به دست آمده از روش کاهش مقاومت برشی نزدیک است. اما در مقطع A-A که عامل ایمنی با استفاده از روش بیشاپ ۱/۵۶ بدست آمد، عامل ایمنی با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی بیشتر از ۲/۰ به دست می‌آید. این تفاوت تأثیر شعاع انحنا و نگهداری جانبی توسط مواد دو طرف توده لغزشی بالقوه را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد، آب زیرزمینی از مدل حذف شد و تحلیل‌های ذکر شده تکرار شد، در این حالت عامل ایمنی حداقل ۲/۶ و در همان مقطع B-B به دست آمد.

برای بررسی وضعیت پایداری مراحل زیر طی شد:

- ۱- ساخت مدل هندسی اولیه،
- ۲- زون بندی مدل: در نواحی نزدیک به دیواره ابعاد زون‌ها کوچکتر در نظر گرفته شدند،
- ۳- اجرای مدل A در حالت الاستیک تا رسیدن به تعادل اولیه،
- ۴- حفاری کاواک و مشخص کردن سطح آب زیرزمینی در مدل و اجرای مدل A تا رسیدن به تعادل،
- ۵- حذف مناطق بیرونی از محاسبات و اجرای مدل B،
- ۶- تغییر مدل رفتاری بلوک‌ها به پلاستیسیته موهر کولمب و اجرای مدل B.

برای بررسی وضعیت پایداری دیواره در این حالت از منحنی‌های جا به جایی- زمان و سرعت- زمان در نقاط شاهد استفاده شد. جا به جایی‌ها در این نقاط ثابت شده‌اند. سرعت نیز در این نقاط به صفر نزدیک شده است. پس در این وضعیت دیواره پایدار خواهد بود. همچنین نشانگرهای پلاستیک نیز نشان می‌دهند در این حالت ملاک شکست اغنا نشده است.

برای محاسبه عامل ایمنی از کاهش مقاومت برشی استفاده شد. بدین منظور مقاومت برشی کاسته می‌شود تا گسیختگی رخ دهد. نسبت مقاومت برشی واقعی به مقاومت برشی که گسیختگی رخ داده است بیانگر فاکتور ایمنی است. برای به دست آوردن فاکتور ایمنی از یک سری شبیه سازی با عامل ایمنی آزمایشی (f) صعودی استفاده می‌شود. یعنی در هر بار مدل‌سازی f افزایش می‌یابد. در این صورت c^{trial} (چسبندگی آزمایشی) و ϕ^{trial} (زاویه اصطکاک آزمایشی) طبق معادلات زیر در هر مرحله کاهش می‌یابند [۱۰]:

$$c^{trial} = (1/f)c \quad (5)$$

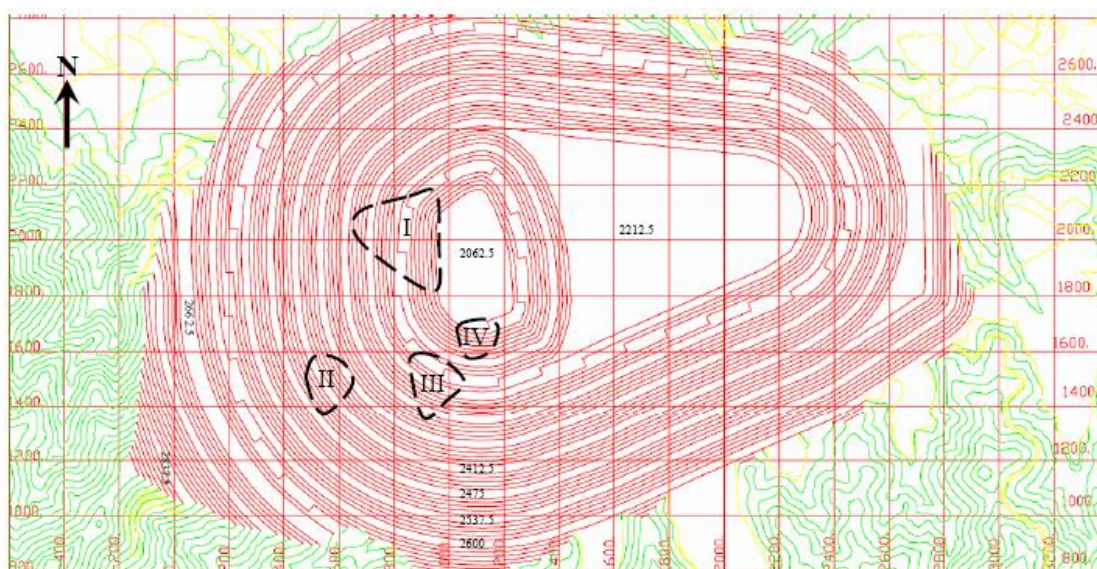
تحلیل پایداری دیواره غربی معدن با در نظر گرفتن درزه‌ها

بعد از بررسی نتایج وضعیت های ساده، مدل با در نظر گرفتن درزه‌ها بار دیگر حل شد. البته در این حالت فاصله‌داری درزه‌ها ۲۵ برابر مقدار واقعی آن در نظر گرفته شد و نوع پرشدگی درزه‌ها رس در نظر گرفته شد. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهند از هر ۱۲ درزه اصلی پرشدگی یکی از آنها رس است که با توجه به اینکه خواص مقاومتی این نوع درزه‌ها کمتر از سایر انواع پرشدگی است می‌توان نتیجه گرفت این فرضیه‌ها تأثیر اندکی بر جواب مدل دارند.

در ابتدا برای بررسی امکان لغزش بر سطح ناپیوستگی‌ها، بلوک‌ها الاستیک در نظر گرفته شدند. بعد از اجرای مدل، منحنی‌های جا به جایی در نقاط شاهد بررسی شدند. این منحنی‌ها در انتها افقی شده‌اند و پایداری دیواره در این حالت را نشان می‌دهند. همچنین بردارهای سرعت نیز در مقاطع مختلف بررسی شدند و مشخص شد در نقاط نزدیک به سطح دیواره، بردارهای سرعت مقادیر بیشتری دارند، اما با ادامه اجرای مدل مشخص شد این مقادیر روند کاهشی دارند و با توجه به اینکه تفاوت قابل ملاحظه‌ای در مقادیر بردارهای سرعت که نشانگر ریزش در آن منطقه خاص باشد دیده نمی‌شود، می‌توان نتیجه گرفت امکان لغزش بر سطح ناپیوستگی‌ها به تنهایی وجود ندارد.

باید توجه داشت که ممکن است بلوک‌هایی وجود داشته باشند که تمایل به لغزش دارند، اما حدود آنها به طور کامل توسط سیستم درزه‌ها معین نشده است. این بلوک‌ها می‌توانند با تکمیل شکستگی سنگ و مجزاسازی بلوک گسیخته شوند. برای بررسی این نوع گسیختگی لازم است بلوک‌ها پلاستیک در نظر گرفته شوند.

برای بررسی وضعیت پایداری دیواره با در نظر گرفتن رفتار پلاستیک برای بلوک‌ها، ابتدا مدل تا ارتفاع ۲۴۱۲/۵ متری حفاری شد. این حالت به طور تقریبی نشان‌دهنده شرایط فعلی معدن است. در این حالت ابتدا مدل با در نظر گرفتن نوع سنگ آندزیت و $D=0/5$ حل شد و مشخص شد در این حالت، مناطق پلاستیک کوچکی تشکیل می‌شوند اما در کل، در این شرایط دیواره غربی معدن پایدار است. در مرحله بعد $D=1$ در نظر گرفته شد. در این حالت نشانگرهای پلاستیک ریزش‌هایی در حد چند پله را در دیواره غربی معدن نشان می‌دهند. این‌گونه ریزش‌ها در معدن رخ داده است. نتایج حاصل از این مدل‌ها نشان می‌دهد موقعی که $D=1$ در نظر گرفته می‌شود، مدل نتایج بهتری در ارتباط با ریزش‌های کوچک و سطحی می‌دهد. اما باید توجه داشت $D=1$ فقط برای ریزش‌های کوچک که سطحی و در حد چند پله هستند مناسب است و برای بررسی ریزش‌های عمقی‌تر، باید D کمتر در نظر گرفته شود.



شکل ۸: موقعیت مناطق ریزشی بالقوه در دیواره غربی معدن مس سرچشمه.

قسمت‌های پایین دیواره است.

در مرحله بعد، مدل با در نظر گرفتن شتاب افقی $0.06g$ و $0.16g$ و $0.3g$ در جهات x و z اجرا شد. در حالتی که شتاب افقی $0.06g$ در نظر گرفته شد، تغییر خاصی در رفتار مدل که بیانگر ریزش‌های بزرگتر باشد مشاهده نمی‌شود. اما با در نظر گرفتن شتاب افقی $0.16g$ در مناطق پلاستیک کمی بزرگ‌تر می‌شوند. با در نظر گرفتن شتاب افقی $0.3g$ مشاهده شد مناطق پلاستیک در قسمت‌های پایین دیواره بخصوص در قسمت‌هایی که دیواره ارتفاع بیشتری دارد (مانند مقطع A-A)، بسیار بزرگتر شده و دیواره به طور کامل ناپایدار می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش تعادل حدی دو بعدی و المان مجزای سه بعدی برای تحلیل پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه استفاده شد. از مدل‌ها و تحلیل‌های ارائه شده می‌توان این نتایج را بیان کرد:

۱- با استفاده از روش تعادل حدی دو بعدی، در مقاطعی که دیواره ارتفاع بیشتری دارد، عامل ایمنی پایین‌تری به دست می‌آید. در مقطع A-A (مرتفع‌ترین دیواره)، عامل ایمنی با استفاده از روش بیشاپ ساده شده به صورت زیر به دست می‌آید:

◀ بدون در نظر گرفتن آب زیرزمینی و بدون در نظر گرفتن اثر زلزله: $2/01$

◀ شرایط طبیعی آب زیرزمینی و بدون در نظر گرفتن اثر زلزله: $1/56$

◀ شرایط طبیعی آب زیرزمینی و با در نظر گرفتن شتاب افقی $0.16g$ برای زلزله: $1/16$

۲- نتایج حاصل از روش تعادل حدی نشان می‌دهد که اگر کل توده سنگ دیواره غربی، آندزیت در نظر گرفته شود عامل ایمنی تغییر چندانی نمی‌کند.

۳- چنانچه کل توده سنگ دیواره غربی، آندزیت و $D=0.5$ در نظر گرفته شود و درزه‌ها در نظر گرفته نشوند، با استفاده از روش کاهش مقاومت برشی، عامل ایمنی حداقل در مقطع B-B، $2/0$ به دست می‌آید. این عامل ایمنی به عامل ایمنی به دست آمده از روش تعادل حدی در همان مقطع ($SF=1/88$) نزدیک است. حال آنکه در مقطع A-A عامل ایمنی به دست آمده از روش عددی سه بعدی بیشتر از عامل ایمنی حاصل از روش تعادل حدی

در روش‌های تعادل حدی و یا حتی مدل‌سازی عددی دو بعدی، می‌توان لایه‌هایی در نظر گرفت و عامل D را از سطح به سمت داخل توده سنگ کاهش داد ولی در نرم‌افزار 3DEC این عمل با مشکلاتی همراه است. با توجه به اینکه در معادن روباز ریزش‌های در حد چند پله مشکل خاصی به وجود نمی‌آورند، ترجیح داده شد برای کل توده سنگ $D=0.5$ در نظر گرفته شود و پایداری کلی دیواره غربی معدن بررسی شود.

هرچند در این شرایط بهتر است پایداری با در نظر گرفتن بردارهای سرعت و جا به جایی بررسی شود، اما در این حالت مشاهده شد در بعضی از نقاط گریه سرعت‌ها و جا به جایی‌ها مقادیر غیر واقعی دارند و امکان استفاده از این شاخص‌ها برای بررسی وضعیت مدل وجود ندارد. اما با توجه به اینکه امکان لغزش روی سطح ناپیوستگی‌ها بدون گسیختگی سنگ سالم وجود ندارد، پس می‌توان برای بررسی وضعیت پایداری، از نشانگرهای پلاستیک استفاده کرد. نشانگرهای پلاستیک، ریزش در چهار قسمت از دیواره غربی را نشان می‌دهند. این مناطق در شکل (۸) نشان داده شده‌اند.

در مرحله بعد، برای بررسی تأثیر آب زیرزمینی بر مناطق ناپایدار، این عامل از مدل حذف شد و مشخص شد با حذف آب زیرزمینی مناطق II و IV پایدار می‌شوند و منطقه III بسیار کوچک می‌شود، اما شرایط ناپایداری در منطقه I هنوز وجود دارد. حجم ریزش در منطقه I به طور تقریبی دومیلیون متر مکعب به دست می‌آید که در صورت زهکشی کامل به 750 هزار مترمکعب کاهش خواهد یافت.

به دلیل عدم قطعیتی که در فاکتور D وجود دارد، مدل با در نظر گرفتن $D=0.7$ و $D=1$ نیز حل شد. در حالتی که $D=0.7$ در نظر گرفته شود مناطق پلاستیک گسترش بیشتری می‌یابند (البته در این حالت منطقه ناپایدار II، گسترش بیشتری از سایر مناطق یافته است)، اما ارتباط منطقی بین این مناطق و ناپیوستگی‌ها که بیانگر ریزش‌های خیلی بزرگ‌تر باشد وجود ندارد. در این حالت حتی با در نظر گرفتن آب زیرزمینی، هر چهار منطقه‌ای که به آن اشاره شد، ناپایدار هستند. اما با در نظر گرفتن $D=1$ ، دیواره به طور کامل ناپایدار می‌شود. این ناپایداری ترکیبی از گسیختگی بر روی سطح ناپیوستگی‌ها در قسمت‌های بالایی دیواره و گسیختگی سنگ سالم در

درباره ناپایداری معدن با عمیق‌تر شدن آن دشوار است. بنابراین موضوعات زیر برای بررسی در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شوند:

- ۱- مدل باید با اندازه‌گیری بر جا به جایی‌ها کالیبره شود.
- ۲- با عمیق‌تر شدن معدن، مدل ژئومکانیکی، باید به طور پیوسته با بررسی‌های بیشتر در دیواره، شناسایی زون‌های ضعیف، آزمایش‌های بیشتر و غیره بروز شود.
- ۳- همچنین لازم است برای بررسی تأثیر آتشیاری و زلزله بر پایداری دیواره، تحلیل‌های دقیق‌تر دینامیکی انجام گیرد.
- ۴- مدل‌های ارائه شده در این تحقیق غیراحتمالاتی بودند. بنابراین برای بررسی و تقلیل ابهام‌های این مدل‌ها، ایجاد مدل‌های احتمالاتی و تعیین قابلیت اعتماد به دیواره‌ها از جزو ضروریات و الزامها است.

تقدیر و تشکر

از مسئولان محترم مرکز تحقیقات معدن مس سرچشمه برای همکاری صمیمانه و ایجاد زمینه مناسب تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌شود.

دو بعدی است. این تفاوت، تأثیر شعاع انحنا و نگهداری جانبی توسط مواد دو طرف توده لغزشی بالقوه را نشان می‌دهد.

- ۴- چنانچه در این شرایط فوق $D=1$ ، در نظر گرفته شود؛ عامل ایمنی حداقل $1/35$ به دست می‌آید.
- ۵- با افزودن درزه‌ها به مدل، ریزش‌هایی در چهار منطقه از دیواره نهایی معدن مشاهده می‌شود.
- ۶- با حذف آب زیرزمینی از مدل، دو منطقه از مناطق چهارگانه ذکر شده (II و IV) پایدار و منطقه III، بسیار کوچک می‌شود؛ اما در قسمت پاشنه دیواره در مقطع B-B، باز هم ریزش‌هایی مشاهده می‌شود. پس می‌توان با یک سیستم زهکشی مناسب تا حدی از ریزش جلوگیری کرد.
- ۷- چنانچه درزه‌ها در مدل گنجانده شوند و فاکتور آشفستگی نیز یک در نظر گرفته شود، دیواره به طور کامل ناپایدار خواهد شد. با توجه به اینکه می‌توان با آتشیاری کنترل شده، تا حدی آشفستگی را کاهش داد، پس لازم است در دیواره نهایی از آتشیاری کنترل شده استفاده شود.

پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

با توجه به عدم قطعیت‌های موجود، اظهار نظر دقیق

مراجع

- 1 - Itasca, (2003). *3DEC – 3D Distinct Element Code*. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis.
- 2 - Nicholas, D. E. and Sims, D. B. (2000). "Collection and Using Geologic Structure Data for Slope Design." *Slope stability in surface mining, SME*, Littleton, PP. 11-26.
- 3 - Hoek, E. (2000). *Practical Rock Engineering*. www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp.
- 4 - Hoek, E., Carranz-Torres, C. C. and Corkum, B. (2002). *Hoek-brown failure criterion – 2002 Edition*, <http://www.rockscience.com>.
- 5 - Hoek, E. and Karzulovic, A. (2000). "Rock Mass Properties for Surface Mining." *Slope stability in surface mining, SME*, Littleton, PP. 11-26.
- 6 - Wyllie, D. C. and Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*, 4th ed, Spon Press: London and New York, PP. 431.
- 7 - Sarcheshmeh Mine, Geological Department, (2004). *Geological Report of Sarcheshmeh Mine*. Mining affairs, Sarcheshmeh mine, Kerman, Iran.
- 8 - Jing, L. and Hudson, J. A. (2002). "Numerical Methods in Rock Mechanics." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 39, PP. 409-427.
- 9 - Ledesma, A., Hurlimann, M., Prat, P., Scavia, C., Amatruda, G., Poisel, R., Roth, W. and Preh, A. (2004). "Guidelines on the Use of numerical Methods for the Prediction of Failure." *Impact of Large landslides in the Mountain environment: Identification and Mitigation of Risk*, www.ranet.regione.piemonte.it.

- 10 - Valdivia, C. and Lorig, L. (2000). "Slope Stability at Escondida Mine." *In Slope Stability in Surface Mining*, Colorado: SME, Ch. 17, PP. 153-162.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Major joint
- 2 - Rock fabric
- 3 - Intermediate structure
- 4 - Rock mass quality
- 5 - Structural region