

تعیین شیب پایدار دیواره‌های معدن سنگ آهن چادرملو با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی

احمد جعفریⁱ؛ جواد غلام نژادⁱⁱ

چکیده

پایداری دیواره‌های معدن سنگ آهن چادرملو با عمیق‌تر شدن معدن، از نظر طراحی بسیار حایز اهمیت است. در تحقیق حاضر، زوایای طراحی شده برای این دیواره‌ها، بازنگری شده است. به منظور روزآمد کردن مدل زمین شناسی معدن و تعیین پارامترهای زمین‌شناسی و مکانیک‌سنگی، برداشت‌های ژئوتکنیکی لازم در معدن انجام گرفت. بعد از ترسیم مقاطع قائم و افقی جدید معدن، تحلیل پایداری دیواره‌های آن با سه روش تجربی، تحلیلی و عددی انجام شد. در ابتدا برای تخمین ابتدایی زوایای شیب از طبقه‌بندی MRMR استفاده شد. بعد از ترسیم مقاطع قائم جدید بر اساس نتایج به دست آمده از طبقه بندی مذکور، پایداری این مقاطع با روش‌های تحلیلی، بررسی شد. در ادامه، مقاطع بررسی شده با روش اجزای محدود تحلیل و بررسی گشت. نتایج نشان داد که زوایای شیب بین رمپی؛ که در طرح اولیه معدن ۵۵ درجه فرض شده بود، زیاد است به طوری که زوایای شیب پایدار بسته به نوع سنگ در بخش‌های مختلف معدن بین ۳۰ تا ۵۵ درجه می‌باشد.

کلمات کلیدی

پایداری شیب، معدن روباز، طبقه بندی MRMR، روش تعادل حدی، روش عددی و ضریب ایمنی

Slope Stability Analysis of Chadormalu Iron Mine by Using Analytical and Numerical Models

Ahmad Jafari; Javad Gholamnejad

ABSTRACT

Deepening of Chadormalu Iron Mine pit is important from the planning point of view. This paper aims to re-evaluate the pre-designed slope angles of Chadormalu Open pit. In order to update the geological model of open pit and for determination of geological and mechanical properties of rock mass, geotechnical mapping was performed. After obtaining the updated vertical and horizontal planes of open pit, the stability of slopes was investigated using experimental, analytical and numerical methods. MRMR classification was first used for estimation of primary slope angles. Then, the resultant sections were analyzed using analytical methods. Finally, the stability of the slopes obtained from analytical method was re-evaluated by using a Finite Element Code. Results showed that the inter-ramp slope angle of 55 degrees is not stable in some parts of the pit. Depending on the rock type, the safe slope angles in Chadormalu pit are suggested between 30 to 55 degrees.

KEYWORDS

Slope stability, Open pit mine, MRMR classification, Limit equilibrium method, Numerical method, Safety factor

ⁱ - استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران: ajafari@ut.ac.ir

ⁱⁱ - دانشجوی دوره دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر: jgholam@aut.ac.ir

نوع سنگ	مشخصات
I	سنگ آهن خیلی محکم و بلوکی
II	ترکیبی از دیوریت/متاسوماتیت/فلسیت، ماده سنگ خیلی مقاوم و توده سنگ آن خوب می باشد
III	ترکیبی از دیوریت/متاسوماتیت با ماده سنگ مقاوم و توده سنگ ضعیف و برش خورده
IV	ترکیبی از متاسوماتیت/ دیوریت آلتره/ آلیت و سنگ های گسل خورده که توده سنگ مربوطه خیلی ضعیف است
V	شامل برش/کنگومرا که ماده سنگ آن ضعیف بوده؛ اما توده سنگ آن نسبت به بقیه از شرایط بهتری برخوردار است
VI	واریزه هایی است که از قسمت های بالا دست شسته شده و درجه سیمانه شدن آن نیز خیلی کم است و دانه های درشت سنگ نیز دارد

معدن سنگ آهن چادرملو یکی از معادن بزرگ ایران است که به روش روباز استخراج می شود. این معدن در ۱۸۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان یزد قرار گرفته است و سالانه ۷/۲ میلیون تن کانسنگ و ۷ میلیون تن باطله از آن استخراج می شود. ذخیره کلی معدن ۴۰۰ میلیون تن برآورد و در دو توده شمالی (۳۵۰ میلیون تن) و جنوبی (۵۰ میلیون تن) متمرکز شده است. تاکنون ۲۰ میلیون تن از سنگ آهن اکسیده تا تراز ۱۴۶۵ متری استخراج شده است و عمق نهایی پیت فعلی ۲۲۵ متر تا تراز ۱۳۰۰ متری می باشد. بر اساس مطالعات اولیه، زاویه شیب بین رمپی ۵۵ درجه، ارتفاع پله ها ۳۰ متر، عرض پله ایمنی ۱۰ متر و شیب دیواره پله ها ۷۰ درجه انتخاب شده است [۱۸].

از تراز ۱۳۰۰ متری (کف معدن) تا تراز سطح زمین ترسیم شدند. سپس یک پلان مرکب از کل این پلان ها تهیه شد تا وضعیت رخنمون سنگ ها در دیواره پیت مشخص شود. با توجه به این پلان مرکب، معدن به هشت بخش تقسیم شد؛ به طوری که خصوصیات ژئوتکنیکی و ساختاری در تمام نقاط هر بخش تقریباً یکسان باشد. در نهایت، در مرکز هر بخش یک مقطع قائم ترسیم شد. پلان مرکب و محل مقاطع ترسیم شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

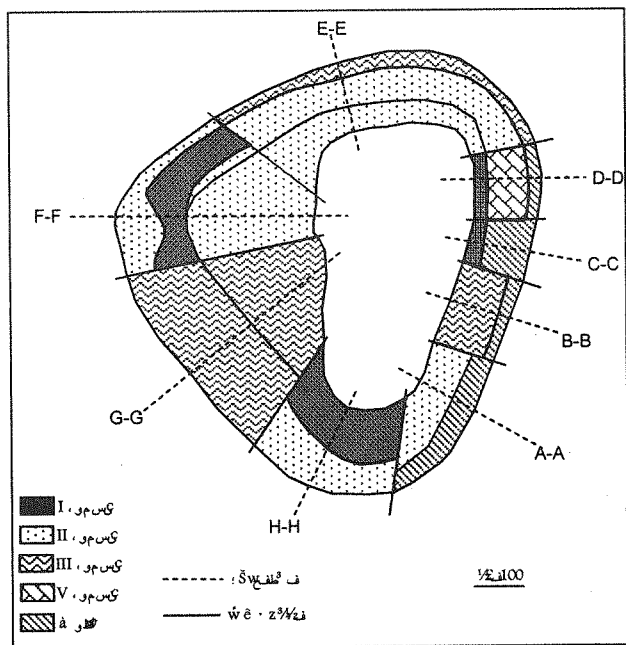
استخراج معدن تا به امروز نشان داده است که شرایط زمین شناسی کانسار خیلی پیچیده تر از آن است که تاکنون گزارش شده است و شیب ۵۵ درجه در خیلی از نقاط آن قابل اجرا نیست. به منظور شناخت دقیق مشخصات سنگ های منطقه، برداشت های زمین شناسی و ژئوتکنیکی گسترده ای در معدن انجام گرفت. نتیجه این بررسی ها روزآمد شدن مدل زمین شناسی کانسار و تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ بود. بعد از ترسیم مقاطع و پلان های جدید، با استفاده از سه روش تجربی (طبقه بندی MRMR)، تحلیلی (استفاده از روش ساده شده بیشاب و نرم افزار CLARA) و عددی (روش اجزای محدود و نرم افزار PLAXIS) تحلیل پایداری دیواره های معدن انجام شد.

۲- نتایج برداشت های ژئوتکنیکی

از حدود ۲۰۰۰ متر طول جبهه کارهای در دسترس در پله های ۱۴۶۵، ۱۴۸۰، ۱۴۹۵ و ۱۵۱۰ متری، برداشت های زمین شناسی و ژئوتکنیکی انجام و تاثیر انفجار بر انواع مختلف سنگ در جبهه کارها بررسی شد. زمین شناسی منطقه بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی به شش گروه تقسیم شد. توصیف کیفی این سنگ ها در جدول (۱) آورده شده است.

۳- ترسیم مقاطع جدید

به دلیل پیچیده بودن نقشه های زمین شناسی موجود، لازم بود مقاطع قائم جدیدی بر اساس تقسیم بندی جدید سنگ ها با فاصله ۱۰۰ متر از هم ترسیم شوند. بعد از ترسیم مقاطع قائم جدید، مقاطع افقی با فاصله ۳۰ متر از هم (برابر با ارتفاع پله ها)



شکل (۱): پلان مرکب پیت و محل مقاطع ترسیم شده

۴- تعیین خواص مکانیکی توده سنگ

بر اساس اطلاعات موجود از آزمایش های انجام شده [۲]، برداشت های زمین شناسی صورت گرفته و همچنین انجام بیش

۵- تحلیل پایداری دیواره های معدن

برای تعیین زاویه شیب ایمن در معدن سنگ آهن چادرمولو از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی استفاده شد. روش کار بدین صورت بود که ابتدا زوایای شیب اولیه با روش MRMR به دست آورده شدند. در مرحله بعد، مقاطع جدید با نرم افزار CLARA تحلیل شدند. در نهایت نیز زوایای به دست آمده از مرحله قبلی با نرم افزار عددی PLAXIS؛ که بر اساس روش اجزای محدود می باشد، تحلیل شدند. جزئیات تحلیل پایداری در بخش های بعدی تشریح می شود.

۵-۱- تعیین زاویه شیب با استفاده از طبقه بندی MRMR

سیستم طبقه بندی MRMR مدل توسعه یافته طبقه بندی RMR است؛ که در سال ۱۹۹۰ میلادی پیشنهاد شد [۱۲]. با اعمال چهار ضریب تعدیل به مقادیر RMR می توان مقدار MRMR را برای توده سنگ به دست آورد. این چهار ضریب عبارتند از:

- ضریب مربوط به هوازدگی (R1) توده سنگ که بین ۳۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر است.
- ضریب مربوط به جهت یافتگی ناپیوستگی ها (R2) که بین ۶۳ تا ۱۰۰ درصد متغیر است.
- ضریب مربوط به تنش های القایی (R3) که بین ۶۰ تا ۱۲۰ درصد متغیر است.
- ضریب مربوط به تاثیر انفجار (R4) که بین ۸۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر است.

مقادیر RMR، MRMR و تعدیلات مربوطه که طی عملیات برداشت ثبت شده در جدول (۳) آورده شده است.

از ۱۰۰ آزمایش باز نقطه ای بر روی نمونه های مغزه ای و کلوخه ای در معدن، خواص مقاومتی و فیزیکی ماده سنگ به دست آمد؛ اما به علت درزه دار بودن سنگ منطقه، این خواص نمی توانست به کل توده سنگ تعمیم داده شود. از طرف دیگر، تعیین خواص مقاومتی توده سنگ از طریق نمونه گیری و آزمایش برجا در توده سنگ، مشکل و پرهزینه است. برای غلبه بر این مشکل از معیار شکست هوک و براون برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ استفاده شد [۵]، [۱۷]. روش معمول برای تخمین پارامترهای این معیار استفاده از طبقه بندی RMR بوده است [۱]؛ اما محدودیت کاربردی این طبقه بندی در مورد توده سنگ خیلی ضعیف و شکسته شده و تعدیل های غیرواقعی آن در مورد جهت گیری ناپیوستگی ها در شیروانی ها باعث شده است که شاخص های دیگر جایگزین آن شود. یکی از این شاخص ها، شاخص مقاومت ژئوتکنیکی توده سنگ یا شاخص GSI است [۱۶] که هوک [۴]، هوک، کایزر و باودن [۷] هوک و همکاران [۹] استفاده از آن را پیشنهاد کرده اند. بعدها این شاخص را هوک و همکاران [۱۰]، هوک و مارینوس [۸]، مارینوس و هوک [۱۳] و هوک و همکاران [۶] تعدیل و تصحیح کرده اند. با استفاده از این شاخص، پارامترهای معیار هوک و براون تعیین می شوند. از آنجا که اغلب نرم افزارهای مکانیک سنگی بر اساس پارامترهای معیار موهر-کولمب (C, ϕ) نوشته شده اند، می توان با استفاده از روابطی که هوک و همکاران [۶] ارائه داده اند و همچنین مقادیر معیار هوک و براون، پارامترهای معیار موهر-کولمب را به دست آورد. کلیه مراحل توضیح داده شده فوق می تواند با نرم افزار Roclab [۱۵] انجام شود. خواص مکانیکی ماده سنگ و توده سنگ برای انواع مختلف سنگ ها در معدن سنگ آهن چادرمولو در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): خواص مکانیکی ماده سنگ و توده سنگ برای انواع مختلف سنگ ها در معدن سنگ آهن چادرمولو

نوع سنگ	مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ (MPa)	چگالی (ton m^{-3})	GSI	مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ (MPa)	چسبندگی توده سنگ (kPa)	ϕ (درجه)	مدول تغییر شکل توده سنگ (GPa)	ضریب ضریب پواسون
I	۱۸۵	۵	۶۰	۶۴	۱۵۹۰	۴۸	۹	۰/۲
II	۱۱۰	۲/۶	۴۹	۳۷/۲	۶۴۰	۴۱	۴/۷۲	۰/۲۵
III	۶۵	۲/۶	۳۳	۱۱/۶	۳۳۰	۲۶/۴	۱/۵۲	۰/۳
IV	۱۰	۲/۴	۲۰	۱/۵	۱۰۰	۱۵	۰/۲۸	۰/۳
V	۱۵	۲/۴	۷۵	۷/۳	۳۶۰	۲۰	۸/۲	۰/۲۵
VI	۰/۵	۱/۹	-	-	۴	۳۳	۰/۰۲۲	۰/۲۵



جدول (۳): مقدار MRMR برای انواع مختلف سنگ ها در معدن

سنگ آهن چادرملو						
نوع سنگ	RMR	(R1)	(R2)	(R3)	(R4)	MRMR
I	۶۶	۱	۰/۸	۱	۰/۹	۴۸
II	۵۵	۱	۰/۸	۱	۰/۹	۴۰
III	۳۹	۰/۸	۰/۸	۱	۰/۹	۲۲
IV	۲۷	۰/۸	۰/۸	۱	۰/۹	۱۶
V	۷۰	۰/۸	۱	۱	۰/۹	۵۰
VI	-	-	-	-	-	-

برای تعیین زوایای شیب با استفاده از مقادیر MRMR، از جدول (۴) استفاده شد [۱۲].

جدول (۴): زوایای شیب تقریبی در انواع مختلف سنگ بر حسب مقدار MRMR [۱۲]

MRMR	۰-۲۰	۲۱-۴۰	۴۱-۶۰	۶۱-۸۰	۸۱-۱۰۰
زاویه شیب	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵	۷۵

با توجه به جدول شماره (۴) و ارتفاع هر واحد سنگی در شیروانی، مقادیر زاویه شیب برای انواع مختلف سنگ تعیین شد که در جدول (۵) آورده شده است.

به عنوان مثال، در مقطع H مقدار MRMR در سنگ نوع II برابر ۴۰ و در سنگ نوع I برابر ۴۸ است. حال با توجه به جدول (۴) زاویه پیشنهادی برای سنگ نوع II برابر ۴۵ درجه و برای سنگ نوع I برابر ۵۵ درجه در نظر گرفته می شود. ذکر این نکته لازم است در مواردی که ارتفاع دیواره زیاد بوده، مقدار زاویه شیب به دست آمده از جدول (۴) کاهش داده شده است.

۵-۲- تعیین زاویه شیب با استفاده از روش تحلیلی

در مرحله دوم، پایداری دیواره ها با استفاده از نرم افزار CLARA بررسی شد [۱۱]. در این تحلیل فرض بر این است که سطح شکست، دایره ای است. اگر چه شکست دایره ای یک نوع شکست متداول در محیط های خاکی می باشد؛ اما در شیروانی های سنگی؛ که توده سنگ آن درزه دار است و هیچ ناپیوستگی با جهت گیری غالب در آن وجود ندارد نیز ممکن است این نوع شکست اتفاق افتد. اگر نسبت فاصله داری و طول درزه ها به ابعاد شیروانی طوری باشد که ابعاد بلوک های ایجاد شده

جدول (۵): زاویه شیب در سنگ های مختلف و مقاطع مختلف در

معدن چادرملو

نام مقطع	نوع سنگ	ارتفاع	MRMR	زاویه شیب
A-A	VI	۴۵	-	۳۰
	II	۱۲۰	۴۰	۴۵
B-B	VI	۲۰	-	۲۵
	III	۱۰۵	۲۲	۴۰
	I	۲۰	۴۸	۵۵
C-C	VI	۹۰	-	۳۰
	I	۶۰	۴۸	۵۵
D-D	VI	۴۰	-	۲۵
	V	۶۰	۵۰	۵۰
	II	۴۰	۴۰	۵۰
E-E	III	۴۰	۲۲	۴۵
	II	۱۰۵	۴۰	۴۵
F-F	II	۸۰	۴۰	۴۵
	I	۶۰	۴۸	۵۵
G-G	III	۲۴۰	۲۲	۴۰
H-H	II	۸۰	۴۰	۴۵
	I	۱۲۵	۴۸	۵۵

نسبت به ابعاد شیروانی کوچک باشد، در این حالت توده سنگ به صورت "به شدت درزه دار" توصیف می شود. در این حالت، توده سنگ را می توان همگن فرض کرد؛ بنابراین چنانچه ناپیوستگی های بزرگ مقیاس در توده سنگ وجود نداشته باشد یا در صورت وجود از نظر سینماتیکی نقشی در پایداری نداشته باشد، شکست در این نوع شیروانی ها مثل شکست در شیروانی های خاکی است [۳]. پس با توجه به مشخصات توده سنگ در معدن چادرملو فرض دایره ای بودن سطح لغزش به واقعیت نزدیک است.

پارامترهای لازم برای این برنامه عبارتند از: هندسه شیروانی، وزن مخصوص مصالح، C و ϕ توده سنگ و خاک، سطح آب زیرزمینی (در صورت وجود)، سطوح ضعیف (در صورت وجود) مثل گسله، شتاب ثقل افقی منطقه (α)، ارتفاع خطی که سطوح لغزش بر آن مماس است و مرکز دایره ای که به عنوان سطح لغزش محتمل، در نظر گرفته می شود.

با استفاده از مدل ساخته شده، زوایای شیب ایمن در هر نوع سنگ به طور جداگانه به دست آمده است. ضریب ایمنی قابل قبول برای دیواره سرتاسری ۱/۴-۱/۳۵ و برای دیواره های بین رمپی، ۱/۲ در نظر گرفته شد. زوایای شیب ایمن در هشت مقطع تعیین شدند؛ اما از آنجا که امکان تشریح همه مقاطع در این مقاله نیست، به تحلیل کامل مقطع G-G بسنده شد و فقط در انتها، نتیجه تحلیل بقیه مقاطع بیان می شود. مراحل تحلیل در این مقطع که در شکل (۲) نشان داده شده است، به شرح زیر

پس در این حالت شکل مقطع عوض می شود که باید مانند قبل تحلیل مرحله ای انجام گیرد:

مرحله اول: در این مرحله دیواره ای به ارتفاع ۱۰۵ متر و شیب ۴۵ درجه تحلیل می شود. در این مرحله مطابق شکل (۳-۳) و ضریب ایمنی برابر ۲/۴ است. پس زاویه به ۵۵ درجه افزایش داده می شود. مطابق شکل (۳-۳) ضریب ایمنی برابر ۱/۹ خواهد شد. علت بالا بودن ضریب ایمنی در این حالت این است که با عقب زدن دیواره در این قسمت، دیواره در سنگ محکم قرار خواهد گرفت. با توجه به محدودیت های عملیاتی معدن، امکان افزایش بیشتر زاویه شیب نیست.

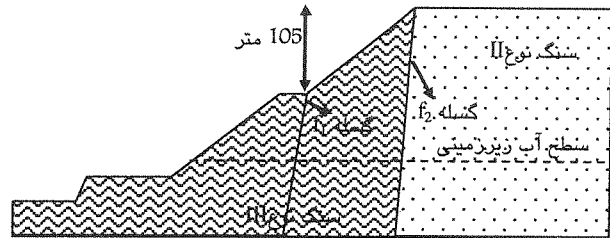
مرحله دوم: در این مرحله، کل شیروانی در حالی تحلیل می شود که زاویه دیواره بالای رمپ، ۵۵ درجه و دیواره پایینی ۴۰ درجه است. در این صورت مطابق شکل (۳-۳) ضریب ایمنی برابر با ۱/۳۲ خواهد شد که مناسب است.

در نتیجه، در صورتی که دیواره پیت را در تراز ۱۴۵۰ به عقب برانیم، انتخاب زاویه شیب ۵۵ درجه در بالای رمپ و ۴۰ درجه در پایین رمپ مناسب است.

۵-۳- تعیین زاویه شیب با استفاده از مدل سازی عددی

در این قسمت، از نرم افزار PLAXIS 7.2 [۱۴] برای تحلیل پایداری نهایی مقاطع به دست آمده از نرم افزار CLARA استفاده شد. پلاکسیس یک برنامه اجزای محدود است که به طور ویژه برای تحلیل تغییر شکل و پایداری در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. فرآیند ساده وارد نمودن داده های گرافیکی در این نرم افزار کاربر را قادر می سازد تا مدل های پیچیده اجزای محدود را به سرعت بسازد. همچنین می توان انواع مختلف خروجی ها را از مدل تحلیل شده گرفت. این ویژگی باعث می شود انواع نتایج مربوط به محاسبات انجام گرفته با نرم افزار بتواند به نمایش درآید. مجموعه عوامل فوق از یک طرف و عدم دسترسی به نرم افزارهای دیگر مثل FLAC در زمان اجرای این پروژه، باعث شد تا از نرم افزار پلاکسیس برای تحلیل پایداری استفاده شود.

روش کار در این نرم افزار بدین صورت است که ابتدا کل یک مقطع زمین شناسی بدون این که حفاری صورت گرفته باشد، مدل می شود. سپس در مدل شرایط آب منفذی و تنش اولیه ایجاد می گردد. در مرحله دوم، حفاری صورت گرفته و شیروانی ایجاد شده، تحلیل می شود.



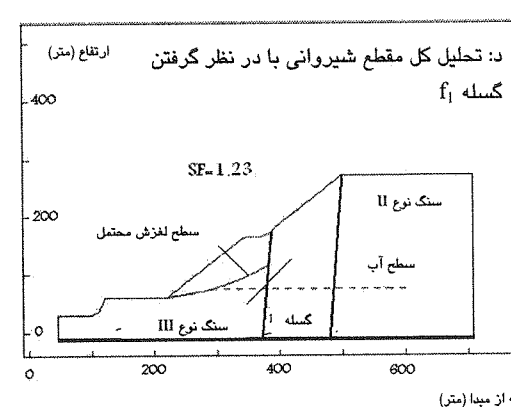
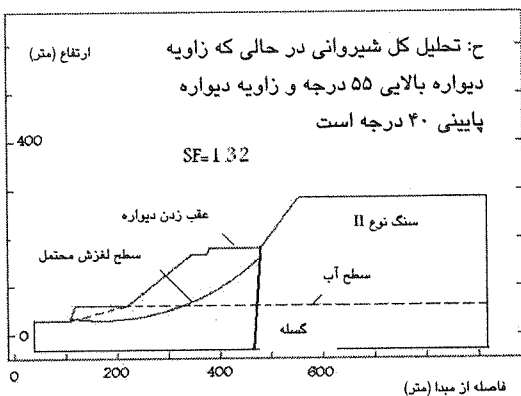
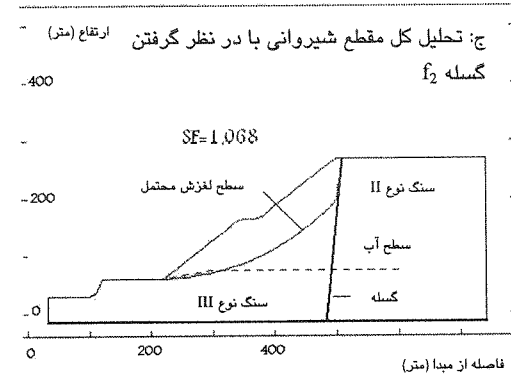
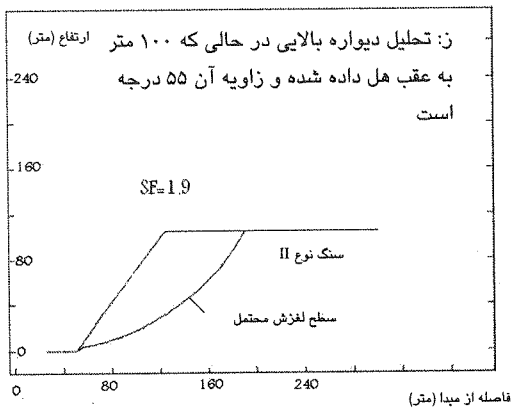
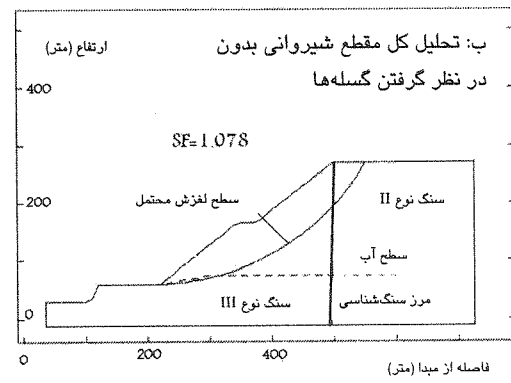
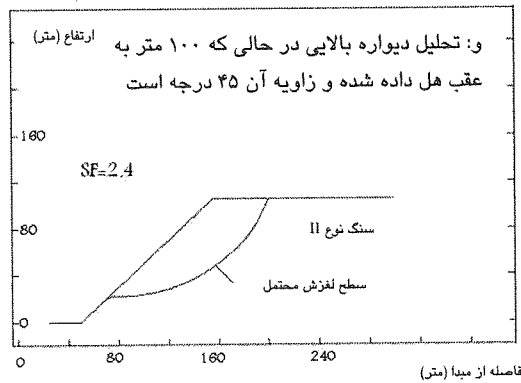
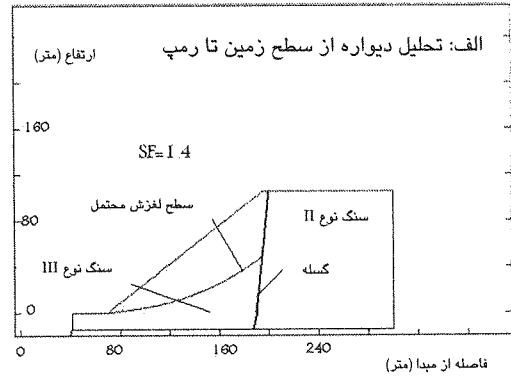
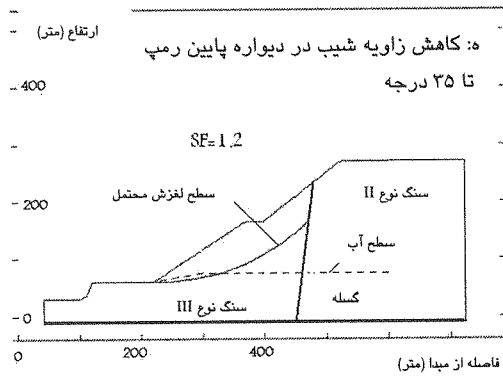
شکل (۲): نمای از مقطع G-G در معدن چادرملو

مرحله اول: در این مرحله، شیروانی از سطح زمین تا محل رمپ به ارتفاع ۱۰۵ متر؛ که در سنگ نوع III حفر شده است، تحلیل می شود. با فرض زاویه شیب ۴۰ درجه (با توجه به جدول ۵) مقدار ضریب ایمنی برابر ۱/۴ خواهد شد که قابل قبول است (شکل ۳-الف).

مرحله دوم: در این مرحله، کل شیروانی تحلیل می شود. زاویه دیواره در قسمت بالای رمپ برابر ۴۰ درجه و پایین آن نیز طبق جدول (۵) برابر ۴۰ درجه فرض می شود. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، دو گسله f_1 و f_2 در محدوده دیواره معدن قرار دارد. تاثیر گسله در پایداری شیب در نرم افزار CLARA به صورت صفحات ضعیفی در نظر گرفته می شود که قسمتی از آنها سطح لغزش دایره ای را قطع کرده است؛ لذا سطح لغزش نهایی یک سطح لغزش مرکب است که یک قسمت آن دایره ای و قسمت دیگر آن؛ که منطبق بر صفحه گسله است، مسطح می باشد. تاثیر این دو گسله در پایداری به صورت جداگانه در نظر گرفته می شود. شکل (۳-ب) نتیجه تحلیل پایداری شیروانی را بدون در نظر گرفتن گسله ها نشان می دهد. ضریب ایمنی در این حالت $SF=1/0.78$ است. شکل (۳-ج) نتیجه تحلیل پایداری شیروانی با در نظر گرفتن گسله f_2 است که در این حالت ضریب ایمنی ۱/۰۶۸ خواهد بود و شکل (۳-د) نتیجه تحلیل را با در نظر گرفتن فقط گسله f_1 نشان می دهد. در این حالت ضریب ایمنی برابر ۱/۲۳ است؛ لذا گسله f_2 عامل ریزش است. با توجه به مقدار ضریب ایمنی کم با حداقل مقدار ۱/۰۶۸ دو راه حل وجود دارد:

الف) کاهش زاویه شیب: در این قسمت ابتدا زاویه شیب دیواره زیر رمپ تا ۳۵ درجه کاهش داده می شود. همان طور که از شکل (۳-ه) پیدا است، گسله f_2 محدود کننده سطح ریزش با $SF=1/2$ می باشد. این مقدار ضریب ایمنی رضایت بخش نیست. از طرف دیگر نمی توان شیب را بیشتر کاهش داد؛ زیرا به باطله برداری بیش از حد، منجر می شود.

ب) راه حل دوم این است که در تراز ۱۴۵۰ دیواره پیت ۱۰۰ متر به عقب جابه جا شود تا دیواره از محدوده گسله عبور کند.



شکل (۳): نحوه تعیین زاویه شیب در مقطع G-G در معدن چادر ملو

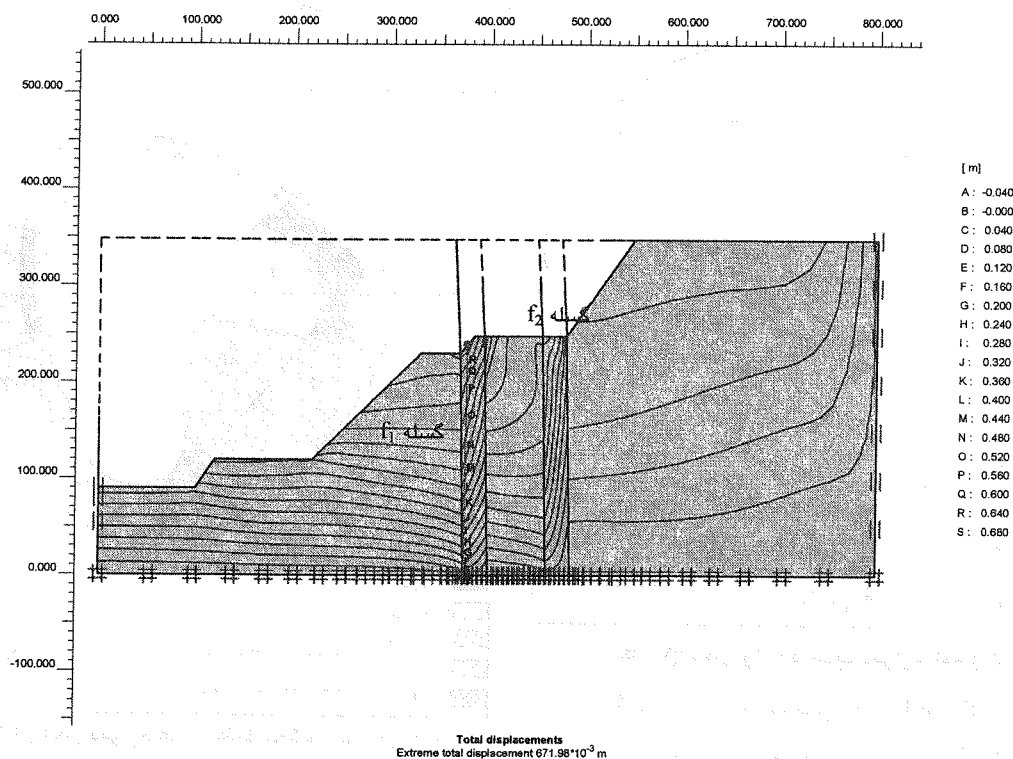
شیروانی به اندازه ۲۰ متر به سمت داخل پیت جابه جا شود در حالی که دیواره بالای رمپ ثابت بماند. در این حالت نتایج تحلیل مطابق شکل (۵) است.

همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است حداکثر جابه جایی در لبه دیواره‌ای است که در پایین رمپ می‌باشد. مقدار این جابه جایی ۳۸ سانتی متر است که در محدوده جابه جایی مجاز می‌باشد. این مقدار جابه جایی نیز به خاطر وجود گسله در آن منطقه است. برای پایداری این ناحیه نیز پیشنهاد می‌شود از دیوار حایل استفاده شود؛ زیرا جابه‌جا نمودن بیشتر دیواره، از نظر اقتصادی به صرفه نیست و باعث از دست رفتن مقداری کانسنگ می‌شود.

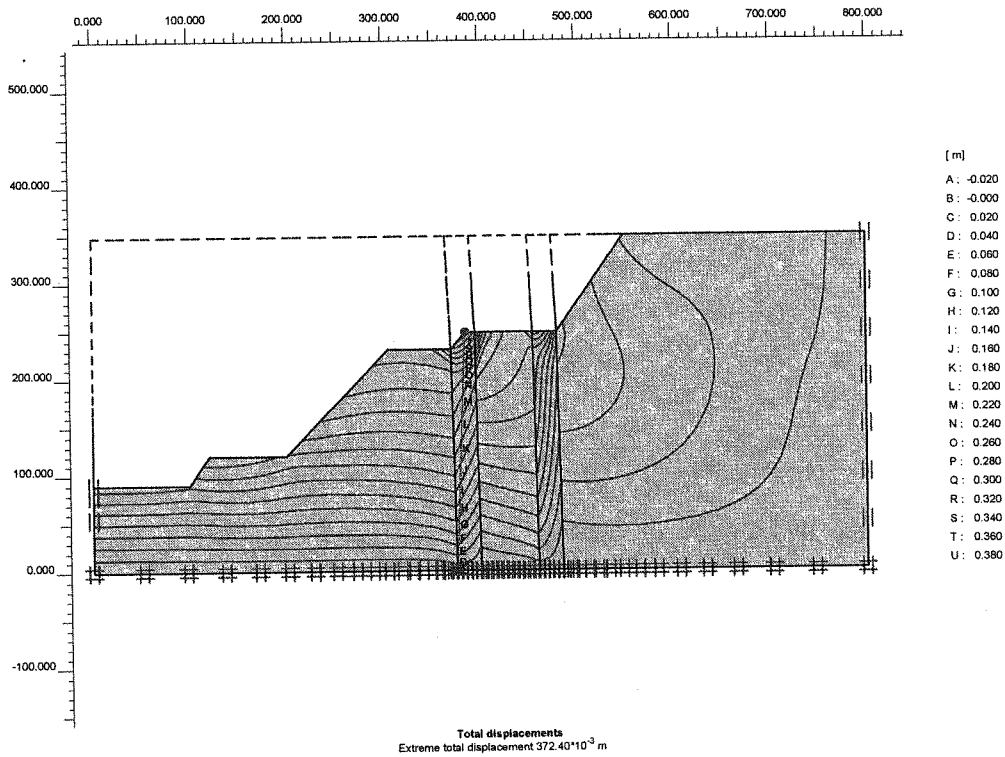
شیب ایمن دیواره‌ها در نقاط مختلف پیت؛ که از نرم افزار PLAXIS به دست آمده است، در شکل (۶) و محل جدید لبه و کف پیت در شکل (۷) نشان داده شده است.

نتایج حاصل از این نرم افزار، ارائه مقدار جابه جایی ایجاد شده در اثر حفاری در هر نقطه از مدل است. در این قسمت نیز فقط به تحلیل کامل مقطع G-G بسنده می‌شود:

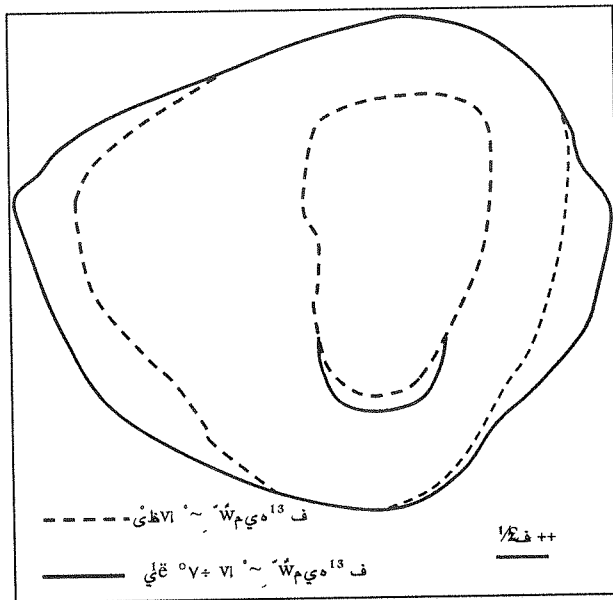
زاویه شیب اولیه در این مقطع در دیواره بالایی رمپ ۵۵ درجه و در دیواره پایینی ۴۰ درجه است. در ضمن، گسله‌ها به صورت دو لایه با خواص مربوط به خود (سنگ نوع IV) مدل شدند؛ پس محیط یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست حداکثر جابه جایی ۶۸ سانتی متر در لبه دیواره زیر رمپ دیده می‌شود. این مقدار بیشتر از جابه جایی حد مجاز (۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متر) است. علی‌رغم این که دیواره بالایی شیروانی در سنگ محکم نوع II حفر شده، به علت جابه جایی زیاد در دیواره پایینی (که در سنگ نوع III حفر شده)، دیواره بالایی نیز دچار جابه جایی نسبتاً زیادی شده است. از طرف دیگر، این جابه جایی، به تخریب رمپ منجر می‌شود. گزینه انتخاب شده برای پایداری این دیواره این است که پاشنه



شکل (۴): تحلیل پایداری دیواره قبل از جابه جا کردن پاشنه شیروانی

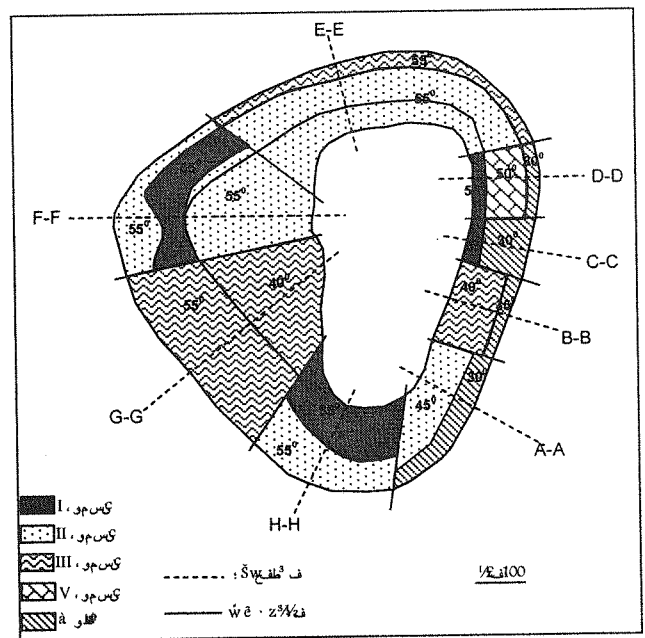


شکل (۵): تحلیل پایداری دیواره بعد از جابه جا کردن پاشنه شیروانی



شکل (۷): محل اولیه و جدید دیواره، لبه و کف پیت

دیواره بین رمپی و همچنین در مناطقی که ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس مثل گسله‌ها کنترل کننده ریزش هستند، از دقت این روش کاسته می‌شود. از طرف دیگر در مناطقی که سنگ خرد شده و مقدار GSI کمتر از ۶۰-۵۰ است تطابق خیلی خوبی بین نتایج به دست آمده از CLARA و PLAXIS وجود دارد به طوری که در بعضی مناطق سطح لغزش احتمالی تقریباً بر هم منطبق هستند. این تطابق در شکل (۸) که همان مقطع B-B است،



شکل (۶): زوایای ایمن دیواره ها در نقاط مختلف پیت بر حسب درجه در معدن چادرملو

۶- بحث و بررسی نتایج تحلیل ها

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که زوایای به دست آمده از طبقه بندی MRMR فقط می‌تواند یک نقطه شروع برای تحلیل پایداری دیواره سرتاسری باشد؛ لیکن در تعیین زاویه شیب

بنابراین ممکن است در مواردی حجم محتمل برای لغزش، نسبت به حالتی که گسله در نظر گرفته نشده کاسته شده و ضریب ایمنی افزایش می‌یابد. مطابق مطالعات انجام گرفته، زوایای شیب دیواره‌های بین رمپی؛ که در طرح اولیه ۵۵ درجه در نظر گرفته شده بود، زیاد است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که زاویه شیب ایمن بسته به نوع سنگ و وضعیت ساختمانی آن، باید بین ۳۰ تا ۵۵ درجه باشد. همچنین به منظور کاهش زاویه دیواره سرتاسری در نقاط مختلف معدن بسته به شرایط زمین شناسی، عقب زدن دیواره یا جلو کشیدن پاشنه دیواره به سمت داخل پیت پیشنهاد شده است.

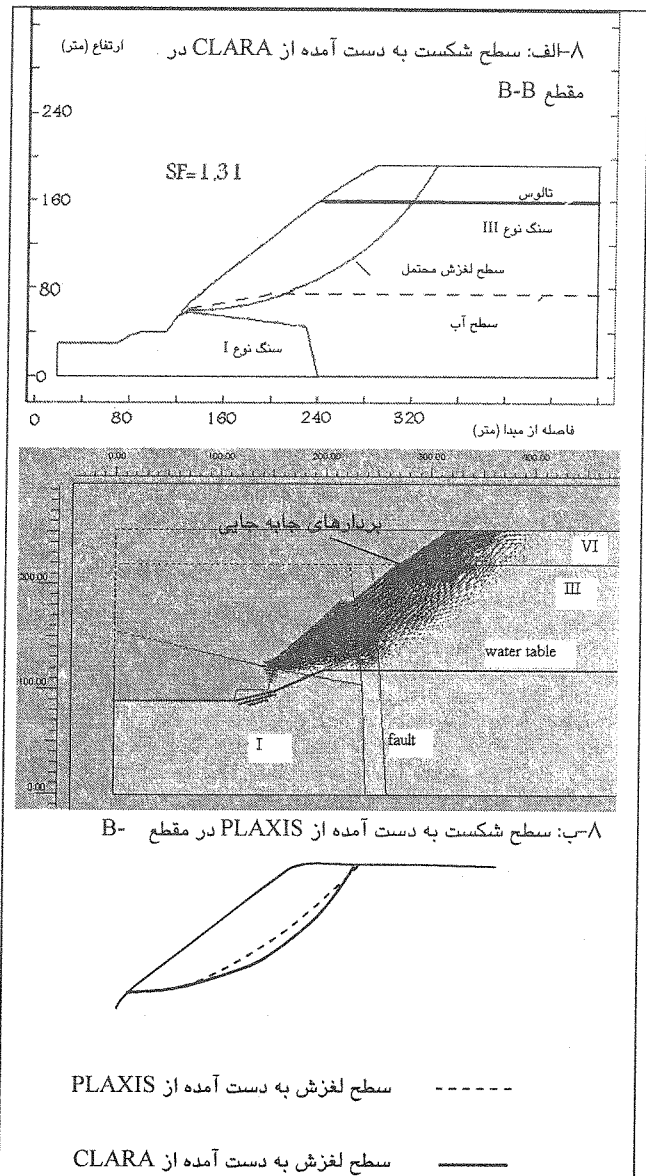
به منظور طراحی دقیق شیب دیواره بایستی طراحی شیب و طراحی پیت مرتبط با هم و به طور پیوسته انجام شود، یعنی از زوایای به دست آمده از تحلیل در این مرحله، در طراحی پیت بهینه استفاده کرده و زوایای دیواره پیت بهینه به دست آمده در این مرحله دوباره تحلیل شود. این چرخه را باید آنقدر ادامه داد تا پیت به یک وضعیت هندسی ثابتی برسد.

عمیق بودن پیت در معدن چادرمو باعث می‌شود که حتی در صورت کاهش یک درجه از زاویه شیب دیواره سرتاسری، حجم عظیمی از باطله برداری به معدن تحمیل شود. از طرف دیگر می‌دانیم که نتایج تحلیل دو بعدی، محافظه کارانه تر از نتایج تحلیل سه بعدی است؛ پس باید در تحلیل‌های بعدی از نرم‌افزارهای سه بعدی برای تحلیل پایداری استفاده کرد تا مقدار دقیق زاویه به دست آید. همچنین در این حالت، زاویه انحنای پیت در قسمت جنوبی و شرقی پیت نیز می‌تواند در نظر گرفته شود.

زوایای پیشنهادی در سنگ‌های مختلف در واقع زوایای سرتاسری نهایی است. زوایای دیواره‌ها در پیت‌های کاری می‌توانند بیشتر در نظر گرفته شوند. برای تعیین زاویه دیواره در پیت‌های کاری باید بر اساس برنامه‌ریزی تولید معدن، موقعیت پیت در هر سال تعیین و مقاطع مربوطه تحلیل شوند. با توجه به مطالب ذکر شده در بخش‌های قبل، در آخرین مرحله از آتشباری که دیواره نهایی تشکیل می‌شود، باید از آتشباری کنترل شده استفاده کرد؛ زیرا استفاده از آتشباری کنترل شده باعث کاهش خسارت وارده به دیواره نهایی می‌شود.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق نحوه تعیین زاویه شیب پایدار در معدن سنگ آهن چادرمو بحث و بررسی شده است. در این تحلیل به ترتیب از سه روش تجربی، تحلیلی و عددی برای به دست آوردن زوایای شیب پایدار استفاده شد. نتایج به دست آمده از هر کدام



شکل (۸): تطابق موجود در نتایج به دست آمده از نرم افزار CLARA (الف) و PLAXIS (ب)

به خوبی پیدا است؛ اما در مقاطعی که سنگ دیواره مقاوم بوده یا دیواره در مجاورت گسله‌های منطقه وجود دارد اختلاف بارزی بین نتایج به دست آمده از این دو نرم افزار دیده می‌شود. علت این است که روش بیشاب؛ که در نرم افزار CLARA از آن استفاده شده است، بیشتر در مصالح خاکی و همگن و همچنین در مصالحی که رفتارشان مشابه رفتار خاک است کاربرد دارد.

در بعضی از مقاطع مثل مقطع G-G دیده شد که ضریب ایمنی با در نظر گرفتن گسله کمتر از حالتی است که مقطع بدون در نظر گرفتن گسله با استفاده از نرم‌افزار CLARA تحلیل شده است. علت این امر، ضعف این نرم‌افزار به خاطر در نظر گرفتن صفحات ناپیوستگی است. چون در این تحلیل دوایر لغزش طوری رسم می‌شوند که حتماً گسله را قطع کنند؛

۹- مراجع

Bieniawski Z.T.; *Engineering Rock Mass Classification*, 1st Edition, John Wiley and Sons, 1989.

EBE Consulting Group (report); *Design of Chadormalu Iron Ore Mine*, 1990

Hoek E.; Bray J.W.; *Rock Slope Engineering*, 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, England, 1981.

Hoek, E.; "Strength of Rock and Masses", ISRM, News Journal, 2(2), p.p.4-16 1994.

Hoek E.; Brown E.T.; *Underground excavation of hard rock*, London, Inst. Min. Metall. Stephen Austin Sons, 1980.

Hoek E.; Carranza-Torres C.; Corkum B.; "Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition", Rocscience Inc, Toronto, 2002. www.rocscience.com

Hoek E.; Kaiser P.K.; Bawden W.F.; *Support of Underground Excavation in Hard Rock*, Rotterdam: A.A. Balkema Publications, 1995.

Hoek E.; Marinos P.; "Predicting Tunnel Squeezing", Tunnels and Tunneling International. Part 1, November 2000 part 2, December, 2000.

Hoek E.; Marinos P.; Benissi M., "Applicability of the Geotechnical Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Shear Rock Masses, The Case of the Athens Schist Formation". Bull. Eng. Geo. Eng. 57(2), PP.151-160, 1998.

Hoek E.; Wood D.; Shah S.; "A Modified Hoek-Brown Criterion for Jointed Rock Masses". Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock'92 (ed. J.A. Hudson), 209-214. London, Brit. Geotech. Soc, 1992.

Hunger O.; CLARA; "Slope Stability Analysis in Two and Three Dimensions", Vancouver, 1992.

Laubscher D.H.; "A Geomechanics Classification System for the Rating of Rock Mass in Mine Design". J. South Afr. Inst. Min. Metals. 90(10) 257-273, 1990

Marinos P.; Hoek E.; "GSI-A Geologically Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation", In: Geo Eng 2000 Proc. Int. Symp. Melbourne, Ervin MC (ed), CD, 2000.

Plaxis User Manual 7.2; "Finite Element Code for Soil and Rock Analysis", 2002.

Roclab Software; "Rocscience Software Products", Roclab, Rocscience Inc, Toronto, 2001. www.rocscience.com

Sonmez H.; Ulusay R.; "Modification to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 36 PP.743-760, 1999.

Sonmez H.; Ulusay R.; Gekceoglu C.; "A Practical Procedure for the Back Analysis of Slope Failures in Closely Jointed Rock Masses", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 2, PP. 219-233, 1998.

SRK/Kani Kavan Consulting Group, (report), "Chadormalu preliminary pit slope design", 2002.

از این روش‌ها با روش بعدی دوباره تحلیل شد. طبقه‌بندی MRMR برای تخمین اولیه شیب سرتاسری معدن مناسب است؛ لکن استفاده از آن در مناطقی که ریزش‌ها به وسیله گسله‌ها کنترل می‌شود، توصیه نمی‌شود. در چنین مناطقی مدل‌های عددی نتایج قابل اطمینانی می‌دهند. همچنین در مناطقی که مقدار شاخص GSI کمتر از ۵۰ است تطابق خوبی بین مدل‌های عددی و تحلیلی دیده شده است. تحلیل‌ها نشان داد که زاویه شیب ایمن در نقاط مختلف معدن؛ بسته به جنس سنگ، بین ۳۰ تا ۵۰ درجه است. علاوه بر تغییر زاویای سرتاسری، در بعضی از مناطق به منظور سست بودن سنگ دیواره می‌بایست دیواره را به جلو یا به عقب جابه‌جا کرد تا در ناحیه سست قرار نگیرد. به طور کلی فرآیند تعیین زاویه شیب یک فرآیند پویاست و باید همراه با پیشروی معدن و به‌روز شدن اطلاعات، دوباره انجام شود. علاوه بر آن می‌توان با توجه به برنامه‌ریزی تولید و وضعیت پیشروی‌ها در سال‌های اولیه از عمر معدن، زاویه شیب را زیاده‌تر در نظر گرفت تا با کاهش میزان باطله برداری در اوایل عمر معدن، ارزش خالص فعلی آن افزایش یابد.

۸- تقدیر و تشکر

در اینجا لازم است از همکاری صمیمانه معاونت محترم بهره برداری معدن چادرملو آقای مهندس ابریشمی و مسئولین محترم دفتر طراحی معدن، آقایان مهندس پاشایی و مهندس شاه جمالی تشکر و قدردانی شود. همچنین از همکاری شرکت کانی کاوان شرق به خصوص آقایان مهندس عامری، مهندس معظمی و مهندس زمانی، قدردانی می‌شود.