



مطالعه شیب دیواره معدن روباز با استفاده از روش های طبقه بندی توده سنگ مطالعه موردی معدن گل بینی ۷ بوکسیت جاجرم

بیژن شیردل*^۱، سید ابوالفضل کهنه^۲، پیمان آذری اصل^۳، علی رسولی^۴

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۰

چکیده

پایداری شیب یکی از پارامترهای اصلی در اقتصاد و ایمنی معادن روباز است. یکی از الزامات تحلیل پایداری شیب، طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش تجربی است. هدف از این مقاله انتخاب شیب بهینه تک پله و انتخاب شیب دیواره نهایی معدن گل بینی ۷ جاجرم با استفاده از روش‌های تجربی است. بنابراین چهار خط برداشت به طول ۲۳۰ متر در سازند شمشک و شش خط برداشت به طول ۲۰۲ متر در سازند الیکا انجام گرفت. در ادامه با کمک نرم افزار Dips و روش تحلیل سینماتیک شیب تک پله بهینه معدن گل‌بینی ۷ برای سازند شمشک معادل متوسط ۶۵ درجه و برای سازند الیکا برابر ۴۷ درجه تعیین گردید. در نهایت با مقایسه شیب نهایی حاصل از روش‌های تجربی MRMR، RMR و Q-Slope مقدار شیب نهایی معدن به روش تجربی به ترتیب برای دیواره‌های شمشک ۴۷ درجه و الیکا ۴۹ درجه پیشنهاد گردید. بر اساس نتایج طبقه‌بندی‌ها و مقایسه با طراحی موجود معدن، شیب‌های پایدار برای ارتفاع‌های کمتر از ۱۰۰ متر قابل قبول تشخیص داده شد. به طور قطع برای تعیین شیب نهایی معدن بخصوص در معادن عمیق بایستی علاوه بر تحلیل تجربی از روش‌های تحلیل تعادل حدی و عددی نیز استفاده گردد.

کلید واژه‌ها: درزه نگاری، طراحی شیب، سینماتیک، تحلیل پایداری، طبقه‌بندی توده‌سنگ

۱. کانون کارشناسان رسمی دادگستری، خراسان شمالی b.shirdel@nkhioe.ir

۲. کانون کارشناسان رسمی دادگستری، خراسان رضوی

۳. شرکت آلومینای ایران، خراسان شمالی

۴. دانشجوی دکتری عمران ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

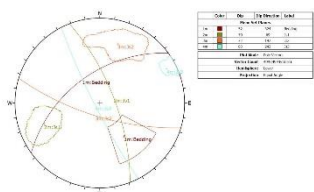
یافت. شاخص RMR به منظور طراحی و ساخت حفریات سنگی نظیر تونل‌ها، معادن، شیب‌ها و پی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) یک توصیف زمین‌شناسی دقیق از توده‌سنگ‌ها در پروژه‌های مهندسی است. ارزش GSI مبتنی بر ارزیابی دو عامل اساسی یعنی ساختار و شرایط ناپیوستگی‌ها در توده سنگ می‌باشد. سیستم Q توسط بارتن و همکاران (Barton et al., 2002) توسعه یافته است. این سیستم، بر اساس خواص مرتبط با هندسه بلوک‌های بکر در توده سنگ، مقاومت برشی در امتداد ناپیوستگی‌ها و وضعیت تنش در بلوک‌های بکر و ناپیوستگی‌های اطراف حفریه زیرزمینی، کیفیت توده سنگ را به صورت یک مقدار عددی (مقدار Q) بیان می‌کند. Q-slope روشی است که به منظور طبقه‌بندی توده سنگ و مهندسی شیب‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش توسط بار و همکاران (Bar et al., 2018) توسعه یافته است و کیفیت سنگ از نظر پایداری شیب را با استفاده از مقدار Q-slope بیان می‌کند. رده‌بندی توده سنگ معدنکاری (MRMR) توسط لابسچر (Laubscher, 2000) توسعه یافته است. این روش تعدیل یافته روش RMR برای تعیین شیب معادن روباز می‌باشد. رده‌بندی توده شیب (SMR) توسط رومانا (Romana, 2015) و به منظور بیان مقاومت یک رخنمون یا شیب سنگی توسعه داده شده است. هدف از این مقاله، طبقه‌بندی کیفیت توده‌سنگ بر اساس برداشت‌های زمین‌شناسی مهندسی موجود و ارائه شیب پایدار تک پله و شیب نهایی معدن با روش‌های تجربی مختلف می‌باشد.

۲. معرفی محدوده مطالعاتی

معدن گلپینی ۷ یکی از معادن هشت‌گانه گلپینی در مجموعه معدنی جاجرم است. مجموعه معدن گلپینی بوکسیت جاجرم عمدتاً در یک پهنه شرقی - غربی قرار

پایداری شیب در معادن روباز یکی از مشکلات جدی و همواره یکی از موارد خطر آفرین در معادن به حساب می‌آید، علاوه بر آن برنامه تولید معدن نیز دچار اختلال می‌شود. تحلیل پایداری شیب در معادن روباز به روش‌های تجربی، تعادل حدی و تحلیل عددی انجام می‌شود. روش‌های تجربی آسان‌ترین روش تحلیل پایداری هستند اما احتمال خطا در این روش‌ها بالا می‌باشد. بطور معمول در مراحل ابتدایی مطالعات و بررسی‌های اولیه که میزان داده‌های مطالعاتی در حد زیادی نیست می‌توان از روش‌های تجربی به خوبی استفاده نمود. همچنین، در معادن کم عمق با طول عمر کوتاه، تحلیل پایداری به روش تجربی برای هر لیتولوژی و ساختاری و برای هر فاز معدنکاری مناسب است و در معادن عمیق (بیش از ۱۵۰ متر) با هر وضعیت زمین‌شناسی، تحلیل پایداری با استفاده از روش‌های دقیق‌تر (تعادل حدی - تحلیل حدی عددی) انجام می‌شود. روش‌های تجربی عمدتاً بر اساس تجارب پیشین و بصورت گراف‌های مفهومی و یا عددی استوار هستند. توصیف صفات سنگ را می‌توان با قرار دادن ویژگی‌های توده‌سنگ در طبقات مشخص آسان‌تر و قابل فهم‌تر نمود. بطور کل از نتیجه حاصل از فرایند توصیف ویژگی‌های سنگ، در تعیین کیفیت توده‌سنگ، بر اساس یک سری از سیستم‌های از پیش تعریف شده استفاده می‌شود، که به این کار طبقه‌بندی توده سنگ اطلاق می‌گردد. روش‌های طراحی تجربی شیب بر مبنای روش‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ می‌باشد، ارائه وضعیت زمین‌شناسی مهندسی دیواره‌های معدن با تکیه بر مطالعات تکمیلی مورد نیاز به‌ویژه درزه‌نگاری و برداشت ناپیوستگی‌ها برای شناخت سیستم ناپیوستگی‌ها و طبقه‌بندی واحدهای سنگی انجام می‌گردد. سیستم رده‌بندی توده‌سنگ در بین سال‌های ۱۹۷۲ تا ۱۹۷۳ توسط بینیاوسکی (Bieniawski, 1973) توسعه

در انتخاب خط‌های برداشت، وضعیت سازندهای موجود و توالی‌های سنگی لحاظ شده است تا محدوده برداشت شده پنجره‌ای از کل محدوده معدنی باشد. بدیهی است با تعداد برداشت بیشتر اطلاعات دقیق‌تری به دست خواهد آمد. در برداشت‌های درزه‌نگاری بر اساس شرایط و نیازهای طراح ویژگی‌هایی از قبیل: RQD، مقاومت فشاری (چکش اشمیت)، نوع ناپیوستگی (درزه، گسل، لایه بندی ...)، اندازه و جهت شیب ناپیوستگی، تداوم، فاصله‌داری (روی خط برداشت و نرمال)، وضعیت شروع و انتهای ناپیوستگی، JRC، شکل سطح، توصیف زبری، هوازدهی، بازدهی، نوع پرکننده، مقاومت پرکننده، وضعیت نشت آب، درصد حجمی سنگ ضعیف به سنگ قوی، شکل بلوک‌های تشکیل شده از برخورد ناپیوستگی‌ها، وضعیت آتشکاری (۳ پارامتر خاص طبقه‌بندی MRMR)، پارامترهای O-factor، J^* ، SRF-Slope (۳ پارامتر خاص طبقه‌بندی Q-Slope) برداشت شد. پس از ویرایش برداشت‌های درزه‌نگاری با استفاده از نرم‌افزار Dips دسته‌بندی درزه‌ها انجام گرفت. محدوده سازند شمشک (دیواره شامل ماسه‌سنگ، سیلت و شیل) شامل ۴ دسته درزه اصلی و محدوده سازند الیکا (دیواره دولومیتی) شامل ۴ دسته درزه اصلی می‌باشد. به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) مشخصات سیستم ناپیوستگی‌های دیواره شمشک و دیواره الیکا و در جدول‌های (۱) و (۲) نتایج آماری خواص ناپیوستگی‌های نشان داده شده است.



شکل ۳. استریوگرافی و مشخصات شیب و جهت شیب

ناپیوستگی‌های دیواره شمشک معدن گلپینی ۷

گرفته که گسترش طولی پهنه اصلی در حدود ۷/۴ کیلومتر است. موقعیت معدن گلپینی هفت بر روی تصویر هوایی اخذ شده از گوگل ارث به صورت مارک شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

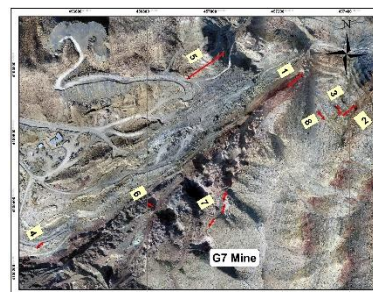


شکل ۱. موقعیت معدن گلپینی هفت بر روی پهنه معدن بوکسیت جاجرم

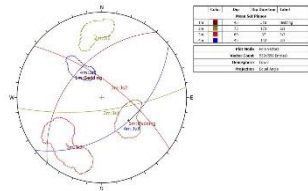
۳. خواص توده سنگ در محدوده مطالعاتی

۱-۳. وضعیت ناپیوستگی‌ها

تعیین ویژگی‌های توده‌سنگ شامل توصیف و کمی کردن پارامترهایی است که در رفتار توده‌سنگ موثر می‌باشند. که می‌تواند به صورت ویژگی‌های سنگ سالم، ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها و چگالی و الگوی ناپیوستگی‌ها بیان شود. ثبت پارامترهای مربوط به توده‌سنگ با در نظر داشت شرایط محیطی معادن جاجرم و اهداف طرح انجام شد. توده‌سنگ‌های در برگیرنده معدن گلپینی هفت از دو سازند الیکا (کمر پایین ماده معدنی) و شمشک (کمر بالای ماده معدنی) تشکیل شده‌اند. به فراخور ضرورت و شرایط ۱۰ خط برداشت در ۸ بخش به طول ۴۳۲ متر مطابق شکل (۲) انجام گرفت.



شکل ۲. موقعیت خط‌های برداشت معدن گلپینی هفت



شکل ۴. استریوگرافی و مشخصات شیب و جهت شیب

ناپیوستگی‌های دیواره الیکا معدن گلپینی ۷

جدول ۲. نتایج آماری خواص ناپیوستگی‌های دیواره الیکا

معدن گلپینی ۷				
Js3	Js2	Js1	Bed	Joint Sets
142	39	173	310	Dip Direction
45	69	73	45	Dip
	6			<0.06 m
	30			0.06-0.2 m
	60			0.2-0.6 m
	4			0.6-2 m
	0			>2 m
	61			>20 m
	4			20_10 m
	4			10_3 m
	31			3_1 m
	0			<1 m
	68			Planar
	26			Stepped
	6			Undulating
	0			V. Rough
	35			Rough
	12			Sm. Rough
	51			Smooth
	2			Slickenside
	Slight			Joint Alteration
	5			>5 mm
	3			5_1 mm
	29			1_0.1 mm
	52			0.1> mm
	11			Close
	0			Soft>5mm
	23			Soft<5mm
	17			Hard>5mm
	0			Hard<5mm
	60			Clean
	Dry			Groundwater

جدول ۱. نتایج آماری خواص ناپیوستگی‌های دیواره

شمشک معدن گلپینی ۷

Js3	Js2	Js1	Bed	Joint Sets
243	197	69	324	Dip Direction
83	72	70	52	Dip
	9			<0.06 m
	19			0.06-0.2 m
	66			0.2-0.6 m
	6			0.6-2 m
	0			>2 m
	18			>20 m
	0			20_10 m
	44			10_3 m
	38			3_1 m
	0			<1 m
	75			Planar
	14			Stepped
	11			Undulating
	0			V. Rough
	30			Rough
	5			Sm. Rough
	61			Smooth
	4			Slickenside
	Slight			Joint Alteration
	4			>5 mm
	3			5_1 mm
	29			1_0.1 mm
	59			0.1> mm
	5			Close
	0			Soft>5mm
	21			Soft<5mm
	10			Hard>5mm
	0			Hard<5mm
	69			Clean
	Dry			Groundwater

۲-۳. طبقه‌بندی توده سنگ

برای ارزیابی کیفیت توده سنگ معدن گلپینی ۷ از سه سیستم طبقه‌بندی RMR، MRMR و Q-Slope استفاده شد. محاسبات به تفکیک سازندهای الیکا و شمشک انجام گردید و نتایج در جدول ها و شکل های این بخش ارائه شده است.

جدول ۴. پارامترهای طراحی و خصوصیات مهندسی

توده سنگ (RMR)

RMR (rock class)					Parameter
Very poor	Poor	Fair	Good	Very good	Classification of rock mass
<40	45	55	65	>70	Safe cut (°) Slope

(Waltham, T., 2002.)

جدول ۵. جدول محاسبات و امتیازدهی RMR برای

دیوارهای معدن گلپینی ۷

SHEMS H	ELIKA	Parameter	
50.7	69	UCS	Strength (MPa)
5.6	6.9	Ratting	
70	71	RQD	RQD
14.54	14.79	Ratting	
38	28	Spacing (cm)	Spacing
11.51	10.14	Ratting	
1-3m	3-10m	Persistence (m)	Persistence
3.16	2.65	Ratting	
1mm	1mm	Fill Width (mm)	Fill Width
4.8	4.85	Ratting	
Smooth	Sm. Rough	Roughness	Roughness
1.83	3.32	Ratting	
Hard<5m	Hard<5m	Fill Strength	Fill Strength
2.69	3.23	Ratting	
Slight	Slight	Weathering	Weathering
5	5	Ratting	
Dry	Dry	Groundwater	Groundwater
15	15	Ratting	
64.18	65.88	RMRbasic	
59.18	60.88	RMR89	

۱-۲-۳. رده‌بندی ژئومکانیکی RMR

مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) با استفاده از آزمون چکش اشمیت در صحرا برآورد و بر اساس روابط تجربی (2007) ISRM به UCS تبدیل شد. نتایج آمار توصیفی در جدول (۳) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین UCS در سازند الیکا بالاتر از شمشک بوده که در امتیازدهی نهایی سیستم‌های RMR و MRMR لحاظ گردید.

جدول ۳. نتایج آماری آزمایش چکش اشمیت

Coefficient of Variation (%)	Standard Deviation (MPa)	Maximum (MPa)	Minimum (MPa)	Average (MPa)	Number of Samples (n)	Formulation
3.24	2.22	72	65	68.6	7	ELI
3.75	1.89	53	47	50.3	10	SHE

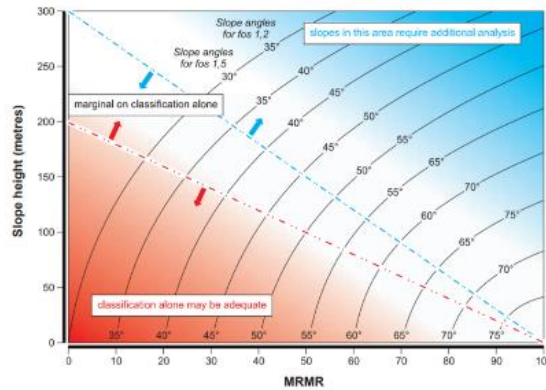
پس از محاسبه RMRbasic و اعمال اصلاحات جهت یافتگی درزه‌ها، مقدار نهایی RMR89 تعیین شد که بر اساس آن شیب پایدار دیواره معدن به روش RMR در جدول (۴) پیشنهاد می‌گردد. نتایج محاسبات در جدول (۵) نشان داده شده است.

۲-۲-۳. رده‌بندی توده سنگ معدنکاری MRMR

اندیس MRMR با استفاده از داده‌های درزه‌نگاری و خصوصیات ژئومکانیکی محاسبه شد. نتایج در جدول (۶)

مطالعات تکمیلی را نشان می‌دهد. با این حال، برای ارتفاع پله‌های کمتر از ۱۰۰ متر، محدوده شیب قابل قبول است.

ارائه گردیده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با توجه به ارتفاع دیواره نهایی (۲۹۰ متر)، مقادیر MRMR در محدوده‌ای قرار گرفته‌اند که لزوم انجام



شکل ۵. تعیین شیب دیواره نهایی معدن بر اساس ارتفاع دیواره (Laubscher 2000)

۳-۲-۳. شاخص کیفی توده سنگ Q-Slope

پارامترهای Q-Slope برای خطوط برداشت محاسبه و نتایج در جدول (۷) آورده شده است. بر اساس روابط تجربی این سیستم، مقادیر شیب مجاز برای دیواره‌ها برآورد شد که در محدوده ۴۷ تا ۷۰ درجه قرار می‌گیرد. این نتایج مبنای مقایسه با سایر سیستم‌های طبقه‌بندی قرار گرفته است. همچنین بر اساس فرمول‌های زیر β^* معادل شیب پیشنهادی می‌باشد که طبق احتمال شکست (PoF) قابل قبول برای دیواره معدن، مقدار شیب پایدار معدن پیشنهاد می‌گردد.

زاویه شیب ایمن β^*

$$\text{PoF } 1\% : \beta = 20 \log_{10} \text{Q-Slope} + 65^\circ$$

$$\text{PoF } 15\% : \beta = 20 \log_{10} \text{Q-Slope} + 67.5^\circ$$

$$\text{PoF } 30\% : \beta = 20 \log_{10} \text{Q-Slope} + 70.5^\circ$$

$$\text{PoF } 50\% : \beta = 20 \log_{10} \text{Q-Slope} + 73.5^\circ$$

جدول ۶. جدول محاسبات و امتیازدهی MRMR

برای دیواره‌های معدن گلیبنی ۷

Parameter	ELIKA	HEMESHAK
UCS	74.22	56.1
		25
UCS weaker/UCS Strong %		44.56
Weaker Rock (as % of total Volume)		3
Equivalent IRS		0.97
IRS	74.22	54.4
Vein	2	1
	3	2
Frequency/Hardness	0.67	0.37
Abs	0.97	0.92
RBS	57.03	40.32
RBS Rating	17.22	14.32
No. Open Jset	3	3
Spacing	0.36	0.44
Raw Rating	13.35	14.75
JS Rating	13.35	14.75
JC Rating	23.72	23.48
IRMIR	54.3	49.99
No. block faces inclined from vertical	0.84	0.89
Adjustment factors for the effect of blasting	0.94	0.94
MRMR	43.02	41.59

جدول ۷. محاسبات Q-Slope برای دیواره‌های معدن

گلیبنی ۷

Parameter	ELIKA	SHEMSHAK	Parameter
RQD	71	70	
Jn	Three main joint sets and random joints	Three main joint sets and random joints	Jn
Rating	9.2	9.33	
Jr	Smooth to slightly rough and planar	Smooth to slightly rough and planar	Jr
Rating	1.38	1.14	
Ja	Slightly weathered with non-clay filling	Slightly weathered with clay filling	Ja
Rating	1.54	1.73	
O-factor	Unfavorable	Unfavorable	O-factor
Rating	0.85	0.95	
J ^a wice	Dry environment, strong structure and material	Dry, weak structure and strong material	J ^a wice
Rating	0.89	0.98	
SRF-Slope	Crushed rock without displacement	Crushed rock without displacement	SRF-Slope
Rating	5	5	
Q-Slope	1.3	1.17	

۴. تعیین شیب پله بر اساس تحلیل سینماتیک

مهم ترین ساختارهای اصلی موثر در مسائل مرتبط با پایداری در مقیاس پله‌های معدنی، سطوح ناپیوستگی‌های مربوط به لایه‌بندی، دسته درزه‌ها و گاه‌آ گسل‌ها و بخش‌های برشی هستند. بطور معمول، در تحلیل پایداری پله‌های معدنی، آنالیزهای سینماتیک و سینتیک دسته درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا سیستم شکستگی داری محدوده ساختگاه با استفاده از برداشت‌های سیستماتیک میدانی (خط برداشت و یا پنجره برداشت) تعیین شده و سپس، با استفاده از تلفیق نتایج

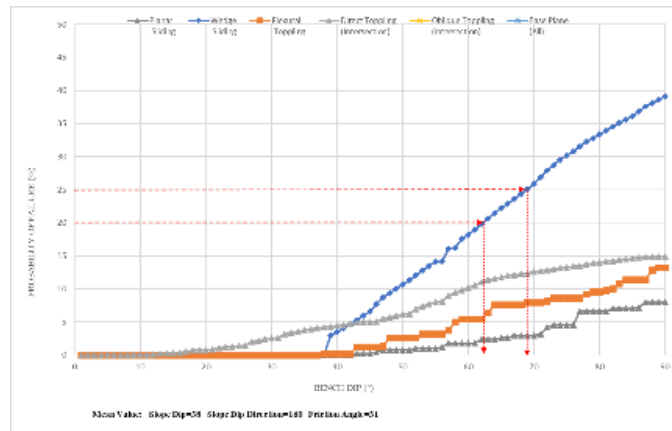
آزمون‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های شاخص میدانی، خواص مقاومتی سطوح ناپیوستگی تعیین می‌شود. در نهایت، تحلیل‌های سینماتیک و سینتیک با استفاده از ابزارهای قابل دسترس انجام می‌شود. بنابراین، ابتدا باید مکانیسم‌های ناپایداری ناشی از ناپیوستگی‌ها مورد تحلیل قرار گیرد. مهم ترین مکانیسم‌های ناپایداری در مقیاس تک پله شامل ریزش‌های صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی می‌شوند. نرم افزار Dips7 امکان نمایش تصویری ناپیوستگی‌ها بر روی شبکه‌های استریونت، تعیین امکان‌سنجی سینماتیک توده‌سنگ و تحلیل آماری خصوصیات ناپیوستگی‌ها را فراهم می‌کند. مطابق با آنچه پیشتر توضیح داده شد، در محدوده مطالعاتی و دیواره‌های معدن گلیبنی ۷، ده خط برداشت از سیستم درزه داری و لایه بندی انجام شد. همچنین تحلیل سینماتیک داده‌های مربوط به هندسه و خواص مقاومتی برای تحلیل سینماتیک انواع Dips ناپیوستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

جهت تعیین شیب بهینه تک پله بر مبنای احتمال شکست از روش آنالیز حساسیت سینماتیکی استفاده گردید. آنالیز حساسیت روشی است که با استفاده از آن می‌توان به‌صورت اصولی و قانونمند تأثیر تغییرات کمیت‌ها را روی پایداری شیب ارزیابی کرد. جدول مختلفی وجود دارند که مقادیر ضریب ایمنی و احتمال شکست را برای انواع شیب بیان کرده‌اند. بنابراین بر اساس نوع پیامدهای ریزش هر معدن و حساسیت شیب، احتمال شکست مناسب انتخاب می‌گردد. بر اساس پیشنهادات و جدول‌ها مربوطه و شرایط معدن گلیبنی هفت حداکثر احتمال شکست قابل قبول در مقیاس تک پله برای این معدن ۲۰ درصد می‌باشد.

مطابق شکل (۶) روی سطوح پله دیواره شمالی (سازند شمشک) معدن گلیبنی ۷ ریزش صفحه‌ای غیرمجاز نخواهد داشت (مگر روی سطوح ضعیف خاص از قبیل گسل و ...) و احتمال ریزش واژگونی آن کمتر از ۱۵ درصد خواهد بود. بنابراین در سطوح پله‌های روی دیواره شمشک معدن

شکست استاندارد شیب تک پله مناسب برای دیواره شمشک معدن به روش سینماتیکی بین ۶۰ تا ۷۰ درجه پیشنهاد می شود.

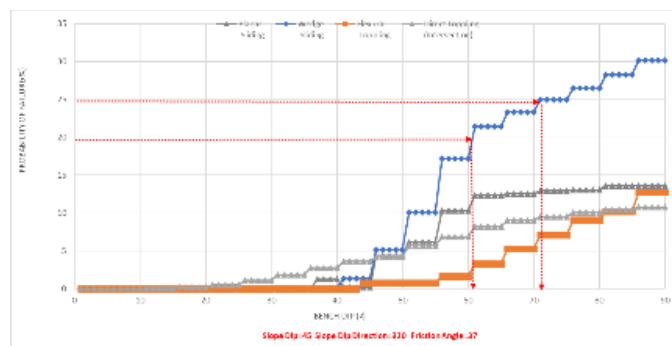
عمدتاً ریزش های گوه ای رخ می دهد و اغلب لبه پله ایمنی دچار ریزش گوه ای می شود. لذا بستگی به حساسیت و مقیاس ریزش های گوه ای و بر اساس مقادیر احتمال



شکل ۶. تحلیل حساسیت احتمال ریزش به روش سینماتیکی بر اساس شیب تک پله برای دیواره شمالی (سازند شمشک)

لذا در صورت تصمیم گیری مبنی بر ایجاد تک پله روی دیواره دولومیت این معدن، در فاز بعدی گزارش نیاز به تحلیل های بیشتر به روش های سینماتیکی با نرم افزارهای Rocplane و Swedge و در صورت نیاز ارزیابی ریسک جهت تعیین شیب تک پله می باشد.

مطابق شکل (۷) و با توجه به شیب لایه بندی ۴۵ درجه روی دیواره دولومیت معدن گلپینی ۷، احتمال ریزش های در مقیاس تک پله به روش سینماتیکی برای شیب های بیشتر از شیب لایه بندی در محدوده غیر مجاز قرار می گیرد. بطوریکه وابسته به تعیین احتمال شکست مناسب برای پله های این معدن (۲۵ تا ۵۰ درصد) شیب تک پله پیشنهادی به روش سینماتیکی در محدوده ۴۵ تا ۵۳ درجه می باشد.



شکل ۷. تحلیل حساسیت احتمال ریزش به روش سینماتیکی بر اساس شیب تک پله برای دیواره جنوبی (سازند الیکا)

۵. تعیین شیب نهایی معدن بر اساس روش‌های تجربی

همانطور که گفته شد سیستم‌های رده‌بندی متفاوتی برای بررسی و کمی‌سازی شرایط سنگ بکر و توده‌سنگ ارائه شده است. کاربرد عمده این سیستم‌های طبقه‌بندی در طراحی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی است. در سال‌های اخیر با انجام تغییرات در برخی از سیستم‌های رایج امکان طراحی شیب‌های سنگی به روش‌های تجربی فراهم شده است. در این مقاله سیستم‌های RMR، MRMR و Q-Slope برای بررسی پایداری شیب معدن گلبینی ۷ جاجرم استفاده شدند. با توجه به پیشنهاد نشریه ۵۳۸، روش MRMR به عنوان روش اصلی برای تعیین شیب نهایی دیواره معدن انتخاب شد. با این حال، به منظور افزایش دقت و اطمینان از نتایج، از سایر روش‌های طبقه‌بندی شامل RMR و Q-Slope نیز استفاده گردید. این امر امکان مقایسه و اعتبارسنجی داده‌ها را فراهم کرده و با در نظرگیری شرایط ویژه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی، کاهش عدم قطعیت در طراحی را ممکن می‌سازد. همچنین، تلفیق روش‌های مختلف، تصمیم‌گیری جامع‌تر در تعیین شیب بهینه را میسر نموده است.

بطور کلی در معدن گلبینی ۷، چهار خط برداشت زمین‌شناسی مهندسی روی دیواره شمالی (سازند شمشک) به طول ۲۳۰ متر و شش خط برداشت روی دیواره جنوبی (سازند الیکا) به طول ۲۰۳ متر انجام شده است. توسط روش سینماتیکی حدود شیب پیشنهادی برای هر پله به تفکیک هر خط برداشت در جدول (۸) ارائه شده است. سپس طبقه‌بندی توده‌سنگ و تعیین شیب نهایی پیشنهادی به تفکیک هر دیواره ارائه گردیده است.

جدول ۸. نتایج شیب دیواره‌های معدن گلبینی ۷ با روش‌های تجربی و مقادیر شیب تک پله با روش

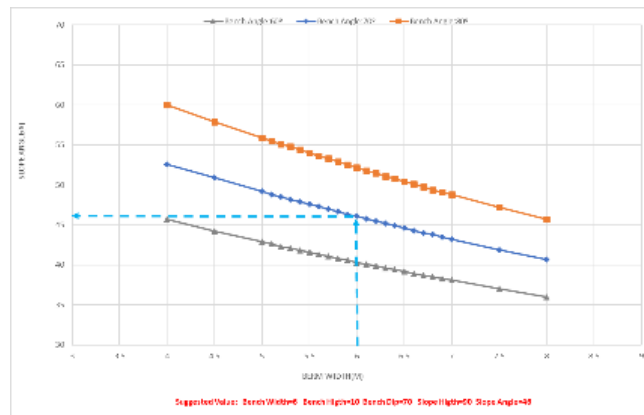
سینماتیک		
Elika	Shemshak	Method
47°	65°	Kinematic (Bench Slope)
55	55	RMR
49	47	MRMR (H=100 m, FOS=1.5)
45-50	40-45	MRMR (H=150 m, FOS=1.5)
70°	69°	Q-Slope (PoF=15%)

با مقایسه نتایج به دست آمده و پیشنهاد نشریه ۵۳۸، استفاده از امتیاز MRMR جهت تعیین شیب نهایی معدن مطلوب‌تر می‌باشد. با استناد به سیستم طبقه‌بندی MRMR (Laubscher, 2000) و توصیه‌های نشریه ۵۳۸، ضریب ایمنی ۱,۵ به دلایل زیر اعمال شد:

۱. ارتفاع قابل توجه دیواره‌ها (تا ۱۰۰ متر) و زوایای حساس شیب ($> 45^\circ$) که موجب افزایش تنش‌های برشی و اثرات مقیاس می‌شوند.
۲. وجود عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی شامل ناپیوستگی‌های فراوان، هوازدگی و اثرات آب زیرزمینی که کاهش مقاومت توده سنگ را در پی دارند.
۳. پوشش خط‌های احتمالی در روش‌های تجربی و اطمینان از پایداری بلندمدت با در نظرگیری شرایط محافظه‌کارانه.

همچنین شیب نهایی معدن با در نظر گرفتن عرض پله ایمنی و به کارگیری روش سینماتیک مطابق شکل (۸) تعیین می شود.

این ضریب ضمن همخوانی با استانداردهای بین المللی، تعادل بهینه بین ایمنی و بهره‌وری را فراهم می کند. بر این مبنای شیب پیشنهادی مطلوب برای دیواره شمالی (سازند شمشک) ۴۷ درجه و برای دیواره جنوبی (سازند الیکا) ۴۹ درجه با در نظر داشت این ضریب ایمنی پیشنهاد می گردد.



شکل ۸. تعیین شیب نهایی معدن گلبینی هفت وابسته به عرض پله ایمنی، زاویه شیب پله و ارتفاع پله

این مقایسه نشان می دهد که مطالعه حاضر با اتکا بر روش های سیستماتیک و استانداردهای روز (نشریه ۵۳۸ و سیستم Laubscher)، طراحی ایمن تر و علمی تری را ارائه می کند. استفاده از ضریب ایمنی ۱٫۵ برای پوشش عدم قطعیت های زمین شناسی، از جمله مزیت های کلیدی این مطالعه است.

۶. نتایج

در معدن گلبینی ۷، مطالعات جامع زمین شناسی مهندسی با انجام چهار خط برداشت به طول ۲۳۰ متر روی دیواره شمالی (سازند شمشک) و شش خط برداشت به طول ۲۰۳ متر روی دیواره جنوبی (سازند الیکا) صورت گرفت. داده های کمی لازم برای مدلسازی شیب و تعیین کلاس های مختلف سنگ با استفاده از روش های طبقه بندی معتبر RMR، MRMR و Q-Slope استخراج گردید. با مقایسه نتایج و در نظرگیری توصیه های نشریه ۵۳۸، روش

۱-۵. مقایسه با مطالعات قبلی و تبیین رویکرد حاضر
پیش از ارائه نتایج نهایی، مقایسه ای با مطالعات طراحی اولیه معدن انجام شد. در سازند شمشک، مطالعه حاضر برای ارتفاع ۱۰۰ متر، شیب نهایی ۴۷ درجه را پیشنهاد می دهد، در حالی که در مطالعات قبلی برای ارتفاع بسیار بیشتر (۲۶۰ متر)، شیب نهایی ۳۹ درجه و شیب تک پله ۶۶ درجه در نظر گرفته شده بود. این اختلاف عمدتاً ناشی از اثر مقیاس است، که طراحی برای ارتفاعات بلندتر را نیازمند شیب های بازتر و محافظه کارانه تر می کند.

در سازند الیکا، رویکرد مطالعات قبلی مبتنی بر پیروی از شیب لایه بندی طبیعی (حدود ۵۰ درجه) و بدون اعمال اصول پله بندی ایمن بود. در مقابل، مطالعه حاضر با به کارگیری برداشت های دقیق زمین شناسی مهندسی و تحلیل های سینماتیک و تجربی (MRMR, Q-Slope)، شیب نهایی پایدار ۴۹ درجه را با رعایت کامل ملاحظات ایمنی پیشنهاد می دهد.

MRMR و اعمال ضریب ایمنی ۱,۵ که با توجه به شرایط حاشیه‌ای شیب‌های مرتفع و عوامل نامشخص زمین‌شناسی (نظیر درزه‌ها، هوازدگی و اثرات آب زیرزمینی) انتخاب گردید، شیب نهایی پایدار برای دیواره‌های معدن در سازند شمشک ۴۷ درجه و در سازند الیکا ۴۹ درجه پیشنهاد می‌شود. این نتایج نه تنها پایه‌ای علمی برای طراحی ایمن معدن فراهم می‌کند، بلکه اهمیت تلفیق روش‌های تجربی با ملاحظات خاص سایت را در دستیابی به تعادلی بهینه بین ایمنی و بهره‌وری در معدنکاری روباز نشان می‌دهد.

MRMR به‌عنوان روشی مطلوب‌تر برای تعیین شیب نهایی معدن انتخاب شد. این روش اگرچه برای معادن کم‌عمق نتایج قابل اطمینانی ارائه می‌دهد، اما برای معادن عمیق از دقت کافی برخوردار نبوده و برای معادن متوسط‌مقیاس، شیب را در قالب یک بازه پیشنهاد می‌کند. نتایج حاصل از تحلیل سینماتیک با در نظرگیری احتمال شکست ۲۰ درصد، شیب بهینه تک‌پله‌ها را برای سازند شمشک ۶۵ درجه و برای سازند الیکا ۴۷ درجه نشان داد. این مقادیر بیانگر رفتار متفاوت سنگ‌های دو سازند در برابر ناپایداری هستند. از سوی دیگر، با تمرکز بر روش

منابع

وزارت صنایع و معادن. ۱۳۸۹. برنامه تهیه ضوابط و معیارهای معدن دستورالعمل تحلیل پایداری و پایدارسازی شیب‌ها در معادن روباز. تهران: سازمان نظام مهندسی معدن، امور انتشارات.

Zavodni, Z.M., 2000. Time-dependent movements in open pit slopes. *In: Hustrulid, W.A., McCarter, M.K., Van Zyl, D.J.A. (Eds.), Slope Stability in Surface Mining. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Littleton, pp. 81-78.*

Celada, B., Bieniawski, Z.T., 2020. Ground Characterization and Structural Analyses for Tunnel Design. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 473p.

Hoek, E., Brown, E.T., 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3): 445-463.

Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2): 185–216.

Bar, N., Barton, N., 2018. Rock Slope Design using Q-slope and Geophysical Survey Data. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4): 893–900.

Laubscher, D.H., Jakubec, J., 2000. The IRMR/MRMR Rock Mass Classification System for Jointed Rock Masses. *In: Hustrulid, W.A., McCarter, M.K., Van Zyl, D.J.A. (Eds.), Slope Stability in Surface Mining. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Littleton, pp. 47–56.*

Romana, M., Tomás, R., Serón, J.B., 2015. Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. *Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics*, Montreal, Canada, Paper No. ISRM-13CONGRESS-2015-974.

Waltham, T., 2002. Foundations of Engineering Geology. 2nd Edition. Spon Press, London, New York, 92p.

Read, J., Stacey, P. (Eds.), 2009. Guidelines for Open Pit Slope Design. CSIRO Publishing, Collingwood, 506p.