

مطالعه ساختارهای زمین شناسی پهنه تونل RG1 سد گلورد و تاثیر بولت و شاتکریت بر پایداری آن

حسن علیزاده^{۱*}، سعید شعرا^۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

چکیده

تونل RG1 در جناح راست بدنه سد گلورد واقع در استان مازندران شهر نکا برای دسترسی به تاج سد به طول تقریبی ۶۰۰ متر طراحی شده است. برای بررسی پایداری تونل RG1 مطالعات زمین شناسی عمومی، زمین شناسی مهندسی و مطالعات مکانیک سنگ، براساس پارامترهای مقاومت سنگ و توده های سنگی در سه مقطع انجام شده است. این مطالعات شامل بررسی ویژگی های زمین شناسی، طبقه بندی توده سنگ، پارامترهای مقاومت توده سنگ، ظرفیت باربری، سیستم های طبقه بندی RMR و Q است. در این راستا تفسیر نتایج، تجزیه و تحلیل ها، سیستم های نگهداری موقت سنگ مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه و تحلیل عددی از بخش تونل RG1 در کلاس های مختلف سنگ با استفاده از نرم افزار Phase2 ارائه شده است. همچنین سیستم های نگهداری موقت سنگ برای مدل های مختلف مدل سازی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای هر از سه مقطع مورد بررسی در تونل RG1 بر اساس ویژگی های زمین شناسی و مکانیک سنگ، تعداد و روند تزریق بولت و نیز شاتکریت تعیین شده است.

کلید واژه ها: سد گلورد، مکانیک سنگ، حفاری، بولت، شاتکریت.

۱. دانشیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران، h_alizadehs@pnu.ac.ir

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران.

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

برای شروع حفاری با دستگاه‌های مربوطه و کیسینگ‌گذاری، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک پهنه تونل لازم می‌باشد، لذا برداشت‌های ژئوتکنیکی از جمله مغزه‌گیری و آزمایشات تست سختی‌سنجی منجر به تحصیل پارامترهای پایداری مد نظر می‌شود. در این بین مطالعه درونی و بیرونی ساختارهای زمین‌شناسی می‌تواند در انتخاب روش‌ها سرعت حفاری، انتخاب محل مناسب برای برداشت‌ها و انجام آزمایشات و حتی حذف خیلی از آزمایشات در وقت و هزینه به میزان بسیار زیادی صرفه جویی کند. امروزه شاتکریت به عنوان جزئی از سیستم‌های پایدارسازی گودبرداریها و شیب‌ها، کاربرد گسترده‌ای در فعالیت‌های مهندسی عمران و معدن دارد (خوش و همکاران، ۱۳۹۹). شاتکریت (Shotcrete) یا بتن پاشیده (Concrete Sparyed) ملاتی است که با کمک هوای فشرده و با سرعت بالا، بر روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شود (Bhawani and Rajnish, 2006). شاتکریت بعد از معرفی کاربردهای متنوعی را در فعالیت‌های مهندسی ژئومکانیک پیدا کرد. از جمله این کاربردها می‌توان به بکارگیری آن در سازه‌های زیرزمینی از جمله انواع تونل‌ها، مغار نیروگاه‌های برق-آبی، ایستگاه‌های مترو، چاه‌ها و همچنین در سازه‌های سطحی از جمله دیواره‌های شیب‌دار، گودبرداری‌ها، محوطه‌سازی و غیره اشاره کرد. در دهه‌های اخیر، محققین تلاش‌های زیادی برای افزایش کیفیت شاتکریت و رفع معایب آن انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به کاربرد مواد افزودنی مختلف و همچنین اصلاح و ارتقاء تجهیزات اجرایی شاتکریت اشاره کرد (Thomas, 2008). از معایب شاتکریت معمولی می‌توان به پایین بودن مقاومت کششی و همچنین رفتار شکننده و شکست ناگهانی آن اشاره کرد (مدنی، ۱۳۹۳). به همین دلیل مشاهده ترک‌های زیاد و متعدد در شاتکریت در اثر حرکت توده سنگ، غیرمعمول و دور از انتظار نیست (اورعی، ۱۳۸۷). در راستای بهبود خواص شاتکریت، تقویت شاتکریت با توری فلزی به عنوان یک روش اساسی و پرکاربرد در راستای رفع این عیب

به کار گرفته شد. در واقع این شاتکریت از تلفیق شاتکریت معمولی با توری فلزی ایجاد می‌شود که به طور گسترده در معادن و فضا‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (الهی، ۱۳۹۳). در مورد سنگ‌های سست که چسبندگی شاتکریت به سطح سنگ ضعیف است، استفاده از توری فلزی، حتی بدون شاتکریت نیز باعث تقویت توده سنگ در حد قابل توجهی می‌شود (Hoek et al., 2000). توری فلزی و شاتکریت مکمل یکدیگر هستند؛ به طوری که شاتکریت از توری فلزی در مقابل خوردگی محافظت می‌کند و توری فلزی هم جهت افزایش مقاومت شاتکریت استفاده می‌شود؛ بنابراین برای پایدارسازی فضا‌های زیرزمینی و ایجاد نیروی نگهدارنده اضافی، استفاده از شاتکریت با توری فلزی ثمربخش بوده است (الهی، ۱۳۹۳). با استفاده از سیستم شاتکریت تقویت شده با الیاف، انعطاف‌پذیری و همگرایی سیستم نگهداری قابل کنترل است. همچنین استفاده از الیاف در ترکیب شاتکریت تاثیر قابل توجهی بر توزیع ترک‌های ایجاد شده و جلوگیری از باز شدگی آنها دارد (Kuesel et al., 2012).

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

سد گلورد در استان مازندران و در نزدیکی شهر نکا واقع شده است. نقطه مرزی آن ۳۶.۵۹ و ۵۳.۶۱ درجه شرقی است. RG1 تونلی است که در سمت راست محور سد با طول حدود ۶۱۰ متر حفر شده است. ارتفاع ورودی RG1 739 متر و ارتفاع نقطه انتهایی آن ۷۳۵ متر و شیب تونل ۱٪ است. شکل این تونل نعل اسبی (D شکل اصلاح شده) و ارتفاع تونل: ۳.۶۰ m و عرض تونل: ۳.۶۰ m است. شکل ۱ (فایل پیوست) مقطعی از تونل RG1 را نشان می‌دهد.

۳. روش تحقیق

داده‌های اساسی برای تهیه این گزارش، نقشه‌های زمین‌شناختی دقیق و نقشه توپوگرافی RG1 است که با توجه

آزمایشگاهی شامل تست‌های شاخص، اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک، آزمون تراکم محصور نشده، آزمایش بارگذاری نقطه‌ای، آزمون تراکم سه محوره و تست‌های برش مستقیم می‌باشد.

۴. زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه

تونل RG1 در داخل سنگ آهک (واحد LW حفاری شده است. سنگ آهک در هر دو دامنه دره و در محور سد گلودر رخنمون دارد. این سنگ آهک شامل آهک سفید، سنگ آهک، سنگ آهک کریستاله و سنگ آهک متراکم است که به طور متوسط تا مقاومت فشاری بالا و هوازدگی بالا است. این واحد به لحاظ تاثیرات مختلف زمین‌شناسی، هوا، رنگ، رویداد کارست، خرده سنگ، درزه‌ها و شکاف کاملاً متفاوت هستند.

با توجه به جزئیات نقشه‌برداری زمین‌شناسی در تونل RG1 چند ناحیه خرد شده و گسل شناسایی شده که در طول مسیر تونل هیچ رخنمونی ندارند (جدول‌های ۱ و ۲).

به روش پیشنهادی ISRM بر مبنای تئوری الاستیسیته استوار است. تمام توده‌های سنگی که در این تونل‌ها دیده می‌شود، با استفاده از سیستم‌های دسته‌بندی مهندسی شناخته شده مانند RMR، GSI و Q طبقه‌بندی شدند. در آخرین مرحله طراحی پایداری از سنگ برای گالری RG1 در پروژه گلودر، مدل‌سازی عددی گالری برای تحلیل تنش پس از حفاری و نیز پس از نصب سیستم پایداری سنگ با استفاده از نرم‌افزار مبتنی بر عنصر محدود به نام Phase2 ver 0.7 انجام شد. بر طبق جزئیات نقشه‌برداری زمین‌شناسی تونل، برای طبقه‌بندی توده سنگ پارامترهای مورد نیاز مانند RQD، مشخصات مشترک، شرایط آب و غیره مورد بررسی قرار گرفته است. در این مورد از داده‌های شرکت کاوان، ۲۰۰۶، شرکت خاک آزما، ۲۰۰۹، شرکت ایران خاک، ۲۰۰۹ استفاده شده است. تمام توده‌های سنگی که در این تونل‌ها دیده می‌شود، با استفاده از سیستم‌های دسته‌بندی مهندسی شناخته شده مانند RMR، GSI و Q طبقه‌بندی شدند.

تعداد زیادی آزمایش در آزمایشگاه مکانیک سنگ بر روی نمونه‌های سنگی انجام شده و ناپیوستگی‌ها از مغزه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی تعیین شده است. این تست‌های

جدول ۱. ویژگی‌های سازه از مسیر تونل (از CH. 0+150 تا CH. 0+610)

Range(meters)	Type	Thickness(cm)	Slope, slope angle
0+155	Fault	-	065/75
0+168	Fault	-	040/88
0+172	Fault	-	270/75
0+168 - 0+172	Fault range	400	-
0+172 - 0+176	Shredded range	400	-
0+291 - 0+294	Range has fallen	300	-
0+313 - 0+320	Shredded range	700	-
0+323 - 0+327	Range has fallen	۴۰۰	-
0+329 - 0+335	Shredded range	۶۰۰	-
0+369 - 0+371	Shredded range	۲۰۰	-
0+377 - 0+380	Shredded range	۳۰۰	-
0+404 - 0+407	Shredded range	۳۰۰	-
0+413 - 0+417	Shredded range	۴۰۰	-
0+430 - 0+446	The range is crushed and fallen	۱۶۰۰	-
0+550 - 0+573	Shredded range	۲۳۰۰	-
0+576 - 0+578	Shredded range	۱۰۰	-
0+586 - 0+610	Shredded range	۲۶۰۰	-

جدول ۲. خواص ناپیوستگی در طول مسیر تونل RG1 (از Ch. 030 تا Ch. 150) (اقتباس از: Barton, 2007).

Slope, slope angle	Type	Space (mm)	length (m)	hole (mm)	Gender	Roughness		weather	Humidity
						Type	JRC		
320/80	J1A	60-80	>5	>5	calcite-Clay	Ro	12-14	A little cloudy	Wet
120/80	J1B	60-80	>5	1-5	calcite-Clay	Ro	12-14	A little cloudy	Wet
100/85	J2A	70-100	>5	>5	calcite-Clay	Ro	12-14	A little cloudy	Wet
280/85	J2B	70-100	>5	1-5	calcite-Clay	Ro	12-14	A little cloudy	Wet
030/86	J3A	100-130	>5	>5	calcite-Clay	Ro	12-14	A little cloudy	Wet
210/80	J3B	100-130	>5	1-5	calcite-Clay	Ro	12-14	A little cloudy	Wet
190/05	layout	100-150	>10	1-5	calcite-Clay	Pl	10-12	A little cloudy	Wet

۵. بحث

تراکم (γ)، نسبت پواسون (ν) مقاومت فشاری نامحدود (UCS)، مدول الاستیسیته (E) و ثابت هوک-براون (mi) در کنار تونل RG1 نمایش داده شده است:

در جدول ۳ پارامترهای طراحی سنگ‌های بکر و عدم انسجام قطعات سنگ آهک در تونل RG1 را نشان می‌دهد. در این جدول ارزش پارامترهای طراحی سنگ‌های بکری شامل

جدول ۳. پارامترهای طراحی سنگ خالص از واحدهای سنگ آهک در امتداد تونل RG1

Type of laboratory test	Parameter description	the unit	Water condition	Stone unit
				LW
Index tests	Density	cm ³ /gr	Dry	2.66
	Porosity	%	-	2.04
	Water absorption	%	-	0.78
	Humidity	%	-	0.19
	Longitudinal wave velocity	s/m	Dry	6278
	Transverse wave velocity	s/m	Dry	3527
Ultrasonic wave velocity measurement	Poisson ratio	-	Dry	0.27
	Elastic dynamic modulus	GPa	Dry	86
	Dynamic modulus of mass	GPa	Dry	62
	Dynamic modulus of hardness	GPa	Dry	34
Unbound pressure	Unrestrained compressive strength	MPa	Dry	55-60
	Static modulus of elasticity	GPa	juicy	45-50
Point load test	Point load resistance	MPa	Dry	23-26
	Uniaxial compressive strength	MPa	juicy	22-25
axis -Three pressure test	Brown constant -Hook value	-	-	2.29
			juicy	62
			juicy	10

در جدول ۴ پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی (Φ و C) ، زاویه اصطکاک درزه‌ها شامل زاویه اصطکاک پایه (Φ_b) و زبری درزه (i) برای دیواره سمت راست و چپ واحد سنگ آهک در امتداد گالری RG1 نمایش داده شده است:

جدول ۴. پارامترهای مقاومت برشی برشی از ناپیوستگی واحد سنگ آهک در دیواره سمت راست در داخل گالری RG1 (اقتباس از: Hoek, 2007).

Stone unit	Type Discontinuity	number of samples	Number exams	Calculation of discontinuity shear strength parameters		Proposing discontinuity shear strength parameters	
				[kPa]C	$ \Phi ^\circ$	[kPa]C	$ \Phi ^\circ$
Lw	Saw cut	2	7	0	33	0	30+3 ($\Phi_b + i$)

استفاده شد. علاوه بر این، سیستم طبقه‌بندی GSI برای ارائه مقاومت و تغییر شکل توده سنگ با توجه به پارامترهای ضریب شکست هوک-براون، از نرم افزار Roclab استفاده شد (جدول ۵).

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۵ پیشنهادات RMR، GSI و Q برای زنجیره‌های مختلف گالری RG1 در جدول ۶ نمایش داده شده است.

۶. توزیع مقاومت و پارامترهای توده سنگ

طبقه‌بندی توده‌های سنگی سایت پروژه گلورد بر اساس سیستم RMR89 و GSI ارائه شده است. سیستم‌های طبقه‌بندی تجربی توده‌های سنگی مطابق با مطالعات و با توجه به نتایج نقشه‌های گالری RG1، مورد استفاده قرار گرفته است که شامل روش‌های طبقه‌بندی RMR89، GSI و Q است. سیستم‌های طبقه‌بندی RMR89 و Q برای تعیین سیستم پیشنهادی موقت سنگ در زنجیره‌های مختلف گالری RG1

جدول ۵. خلاصه نتایج سیستم‌های طبقه‌بندی RMR، GSI، Q در گالری RG1 (اقتباس از: Hoek, et al., 2006).

Rock mass class	RMR89	Proposal RMR89	.adj-RMR89	Proposal .adj-RMR89	RMR'	Proposal RMR' 89	-GSI RMR'89	Proposal GSI	Q	Proposal Q
I Class	51-57	50-65	46-52	45-60	56-58	55-60	50-51	50-55	2.145- 2.48	>2
II Class	40-48	40-49	35-43	35-44	47-53	41-54	42-48	41-49	0.99 – 1.815	0.9-2
III Class	32-37	30-39	27-32	25-34	40-45	40-45	35-40	35-40	0.008 – 0.0094	<0.1

جدول ۶. خلاصه نتایج و مقادیر پیشنهادی سیستم‌های طبقه‌بندی RMR، GSI و Q برای زنجیره‌های مختلف گالری RG1 (اقتباس از: Hoek, et al., 2006).

Number	Range (m)		The length (m)	RMR89	adj-RMR89	RMR Groundwater level 89 (15=)	5-RMR89	Q	Rock mass class
	From	Until the							
1	15	30	15	41	36	49	44	1.155	II
2	30	45	15	41	36	49	44	1.485	II
3	45	60	15	43	38	48	43	1.155	II
4	60	75	15	40	35	48	43	1.155	II
5	75	90	15	45	40	50	45	1.65	II
6	90	105	15	48	43	53	48	1.815	II
7	105	120	15	45	40	50	45	1.155	II
8	120	135	15	43	38	48	43	1.155	II
9	135	150	15	45	40	50	45	1.485	II
10	150	165	15	51	46	56	51	2.31	I
11	165	168	3	41	36	47	42	0.99	II
12	168	172	4	32	27	40	35	0.00078	III
13	172	180	8	41	36	47	42	0.99	II
14	180	195	15	56	51	56	51	2.145	I
15	195	210	15	45	40	50	45	1.155	II
16	210	225	15	43	38	49	44	1.485	II
17	225	240	15	56	51	56	51	2.31	I
18	240	250	10	56	51	56	51	2.31	I
19	250	265	15	40	35	48	43	1.155	II
20	265	280	15	41	36	49	44	1.485	II
21	280	291	11	48	43	53	48	1.815	II
22	291	294	3	32	27	40	35	0.00781	III
23	294	310	16	53	48	56	51	2.13	I
24	310	232	78-	41	36	47	42	0.99	II

25	232	327	95	32	27	40	35	0.00781	III
26	327	340	13	41	36	47	42	0.99	II
27	340	355	15	44	39	49	44	1.485	II
28	355	370	15	48	43	53	48	1.815	II
29	370	385	15	40	35	48	43	1.32	II
30	385	400	15	48	43	53	48	1.815	II
31	400	415	15	40	35	48	43	1.155	II
32	415	430	15	40	35	48	43	1.155	II
33	430	445	15	37	32	45	40	0.00938	III
34	445	460	15	40	35	48	43	0.99	II
35	460	475	15	45	40	50	45	1.4.85	I
36	475	490	15	48	43	53	48	1.815	II
37	490	505	15	52	47	55	50	2.145	I
38	505	520	15	53	48	56	51	2.475	I
39	520	535	15	53	48	56	51	2.475	I
40	535	550	15	46	41	51	46	1.815	II
41	550	610	50	32	27	40	35	0.007813	III

به مقادیر Q در زنجیره‌های مختلف RG1 گالری در جدول ۶ و حمایت سنگ اولیه از گالری RG1 در گروه ۴، ۵، ۶ و ۸ طبقه‌بندی شده است. جدول ۷ سیستم‌های پایداری اولیه سنگ برای گالری RG1 با توجه به سیستم طبقه‌بندی Q نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، کلاس I با $GSI=50-55$ شامل طول ۱۲۱ متر از گالری RG1 می‌شود. کلاس II با $GSI=41-50$ شامل طول ۳۹۳ متر و کلاس III با $GSI=35-40$ شامل طول ۸۶ متر از گالری RG1 است. بنابراین برای مطالعات و تحلیل‌های آینده، سه طبقه ذکر شده از توده سنگی مطابق جدول ۵ در نظر گرفته می‌شود. با توجه

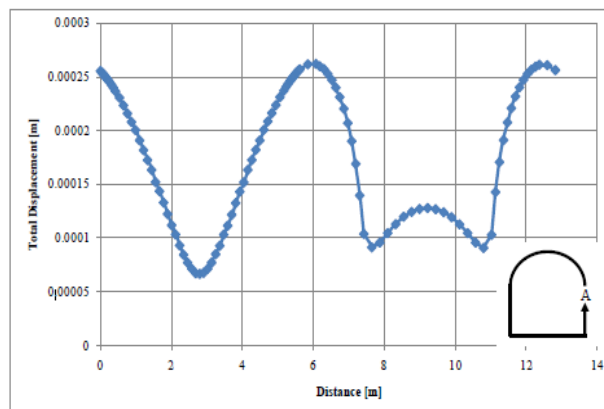
(اقتباس از: Hoek, Kaiser, and Bawden, 2000).

Rock mass class	Q	Maintenance class	Temporary stone holder		
			Injectable rock (Φ20mm)bolt	Shotcrete	Metal frame
I Class	>2	4: B(+S)	L=2m, @2.0×2.0m	Unreinforced shotcrete t=4-5cm	-
II Class	0.01-2	4,5: (Sfr+B)	L=2m, @1.5×1.5m	Reinforced shotcrete t=5-12cm	-
III Class	>0.01	6,7,8:Sfr+RRS+B	L=2m, @1.0×1.0m	reinforced shotcrete -Fiber t>15cm	Reinforced frame

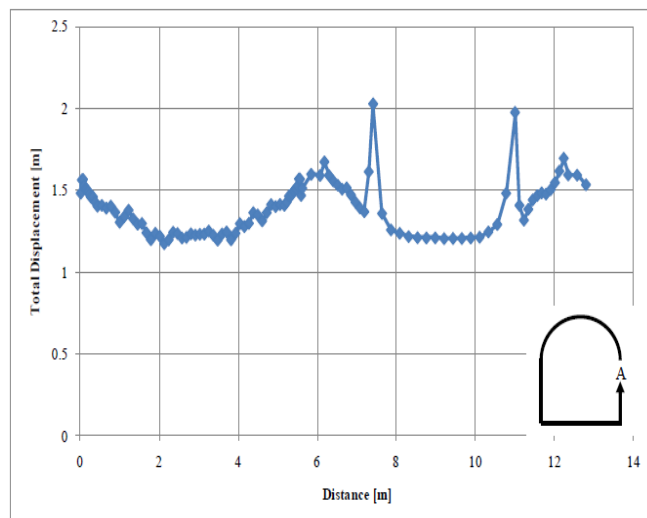
۶-۱. تجزیه و تحلیل بخش ۱، کلاس I توده سنگ در LW واحد

گالری RG1 در کلاس I توده های سنگی در واحد LW با $GSI = 51-60$ ، مطابق با پارامترهای ژئوتکنیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پس از آن بهترین حالت های سیستم پایداری سنگ برای گالری انتخاب شدند. شکل ۲ (فایل پیوست) خطوط مربوط به توزیع مجدد σ_1 (تنش عمده اصلی) و σ_3 (تنش اصلی جزئی) را به عنوان نتیجه حفاری نشان می دهد. همچنین شکل ۳ تا ۶ (فایل پیوست) به ترتیب مجموع جابجایی، فاکتور مقاومت و منطقه پلاستیکی (محدوده تسلیم از توده سنگی اطراف منطقه حفاری را نشان می دهد).

همان طور که در شکل ۷ و شکل ۴ (فایل پیوست) مشاهده می شود، حداکثر جابجایی گالری RG1 برابر با ۰.۲۶ میلی متر است و براساس شکل های ۶ (فایل پیوست) و ۸ عوامل مقاومت توده سنگ در اطراف گالری بین ۱.۰ تا ۲.۰ است که در منطقه محدود شده و پس از آن منطقه توده سنگ با عامل مقاومت بیش از ۱.۵ ارائه شده است.



شکل ۷. جابجایی کل گالری RG1 (واحد کلاس I - LW)



شکل ۸. ضریب مقاومت گالری RG1 (کلاس I - واحد LW)

کلاس I، واحد LW امن است و به سیستم پایداری جدی نیاز ندارد. اما برای رسیدن به عوامل ایمنی بیشتر یک لایه شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر توصیه می شود (جدول ۸).

همان طور که از شکل ۵ (فایل پیوست) دیده می شود، منطقه پلاستیکی (محدوده تسلیم) رخ نمی دهد (یا فقط در مناطق بسیار کوچک)، بنابراین، گالری RG1 پس از حفاری در

جدول ۸. سیستم پایداری سنگ مورد نیاز برای گالری RG1 در کلاس I توده های سنگی بر اساس تجزیه و تحلیل عددی

Location	Number and process of bolt injection	Shotcrete
Class rock mass :Section 1	Does not need	50 mm thick shotcrete

(فایل پیوست) مجموع جابجایی، فاکتور مقاومت و منطقه پلاستیکی با توجه به تجزیه و تحلیل حساسیت (محدوده تسلیم) توده سنگی اطراف منطقه حفاری را به ترتیب نشان می دهد.

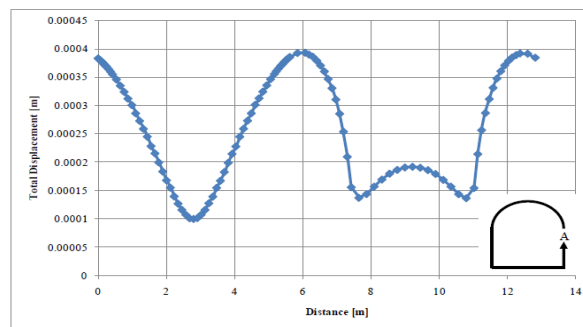
همان طور که در شکل ۱۱ (فایل پیوست) و شکل ۱۴ مشاهده می شود، حداکثر جابجایی گالری RG1 برابر با ۰.۰۴ میلی متر است و براساس شکل های ۱۲ (فایل پیوست) و ۱۵ عوامل مقاومت توده سنگ در اطراف گالری بین ۱.۰ تا ۲.۰

۶-۲. تجزیه و تحلیل بخش ۲، طبقه دوم توده سنگ در واحد

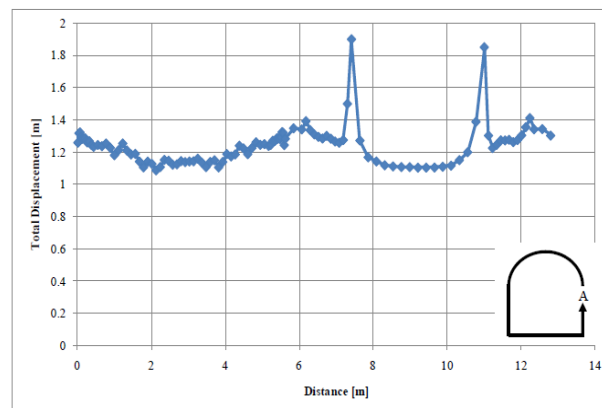
LW

گالری RG1 در کلاس II توده سنگ در واحد LW با $GSI=41-49$ ، مطابق با پارامترهای ژئوتکنیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پس از آن بهترین حالت های سیستم پایداری سنگ برای گالری انتخاب شدند. شکل ۹ (فایل پیوست) خطوط مربوط به توزیع مجدد σ_1 (تنش عمده اصلی) و σ_3 (تنش اصلی جزئی) را به عنوان نتیجه حفاری نشان می دهد. همچنین شکل های ۱۰ تا ۱۳

است که در منطقه محدود شده و پس از آن منطقه توده سنگ با عامل مقاومت بیش از ۱.۵ ارائه شده است.



شکل ۱۴. جابجایی کل گالری RG1 (واحد کلاس II - LW)



شکل ۱۵. فاکتور مقاومت گالری RG1 (کلاس واحد LW-II)

جدی نیاز ندارد. اما برای رسیدن به عوامل ایمنی بیشتر یک لایه شاکریت با ضخامت ۵ سانتی متر توصیه می شود (جدول ۹).

مطابق شکل ۱۳ (فایل پیوست)، منطقه پلاستیکی (محدوده تسلیم) فقط در محدوده بسیار کوچک با ۳۰ تا ۶۰ درصد از عملکرد رخ می دهد. بنابراین، گالری RG1 پس از حفاری در کلاس II، واحد LW امن است و به سیستم پایداری

جدول ۹. سیستم پایداری سنگ مورد نیاز برای گالری RG1 در کلاس II توده های سنگی بر اساس تجزیه و تحلیل عددی

Location	Number and process of bolt injection	Shotcrete
Class rock mass :Section 2		
کلاس II	Does not need	mm thick 100 to 50 shotcrete

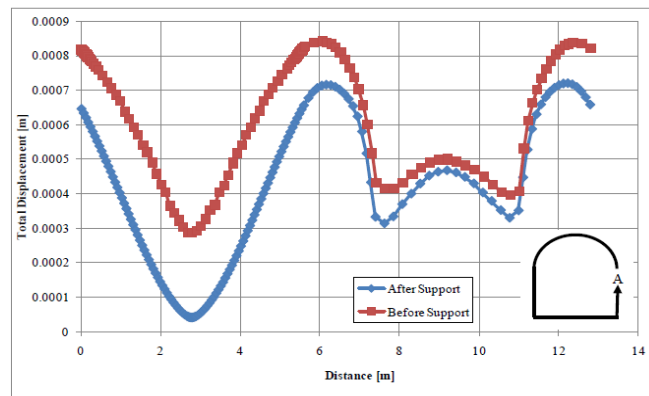
گالری RG1 در کلاس III سنگ توده در ناحیه گسلی با $GSI=35-40$. مطابق با پارامترهای ژئوتکنیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پس از آن بهترین حالت های

۶-۳. تجزیه و تحلیل بخش ۳، کلاس III توده سنگ (ناحیه گسلی)

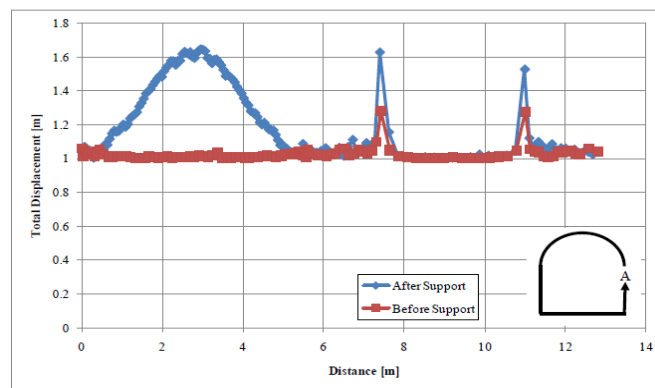
نیروهای محوری، نیروهای برشی در سیستم پایداری (شاتکریت) با مقادیر حداقل و حداکثر در شکل ۲۶ (فایل پیوست) نشان داده شد و نمودار ظرفیت پایداری در شکل ۲۷ (فایل پیوست) ارائه شده است.

همان طور که در شکل ۲۸ مشاهده می شود، حداکثر جابجایی در گالری RG1 برابر ۸.۵ میلی متر قبل از نصب سیستم پایداری است و پس از آن حداکثر جابجایی به ۷.۱ میلی متر کاهش می یابد. بر اساس شکل ۲۹ عوامل مقاومت سنگین توده سنگ در اطراف گالری بین ۱.۰ و ۱.۳ است که در منطقه قابل توجهی در اطراف گالری گسترش یافته است.

سیستم پایداری سنگ برای گالری انتخاب شدند. شکل های ۱۶ و ۱۷ (فایل پیوست) خطوط مربوط به توزیع مجدد σ_1 (تنش اصلی) و σ_3 (تنش اصلی جزئی) را به عنوان نتیجه حفاری قبل از نصب سیستم پایداری سنگ، شکل های ۱۸ تا ۲۰ (فایل پیوست) مجموع جابجایی، فاکتور مقاومت و منطقه پلاستیکی (محدوده تسلیم) در توده سنگی اطراف منطقه حفاری، شکل های ۲۱ و ۲۲ (فایل پیوست) خطوط مربوط به توزیع مجدد σ_1 (تنش عمده اصلی) و σ_3 (تنش اصلی جزئی) به عنوان نتیجه حفاری پس از نصب سیستم پایداری سنگ و همچنین شکل های ۲۳ تا ۲۵ (فایل پیوست) مجموع جابجایی، فاکتور مقاومت و منطقه پلاستیکی (محدوده تسلیم توده سنگی) اطراف منطقه حفاری را نشان می دهند.



شکل ۲۸. جابجایی کل گالری گالری RG1 قبل و بعد از نصب سیستم پایداری



شکل ۲۹. فاکتور مقاومت گالری RG1 قبل و بعد از نصب سیستم پایداری (کلاس III - منطقه گسل)

بنابراین سیستم پایداری سنگ شامل شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر (سیم مش) و همچنین پانچ راک بولت‌ها به طور کلی در تاج و دیوارهای گالری توصیه می‌شود (جدول ۱۰).

به دلیل تمرکز تنش در داخل منطقه، حداکثر منطقه پلاستیکی گالری در محدوده وسیعی پس از حفاری و قبل از نصب سیستم پایداری سنگ در داخل دیوارهای گالری قرار دارد. در طراحی سیستم پایداری سنگ از گالری RG1 در توده‌های سنگی کلاس III (بخش گسلی)، راک بولت‌ها به طور کامل و با شاتکریت تقویت شده مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۱۰. سیستم پایداری سنگ مورد نیاز برای گالری RG1 در توده‌های سنگی کلاس III (منطقه گسل) بر اساس تجزیه و تحلیل عددی

Location	Number and process of bolt injection	Shotcrete
Section 3: Class III rock mass (fault zone)	5 full bolts on the walls and crown Φ 22 @ 2 Φ 2m L = 2m	100-150 mm thick shotcrete with mesh wire 100x100x8mm

- اگر چه پارامترهای مقاومت برشی ناپیوستگی که در این پژوهش اندازه‌گیری شده‌اند، برای تجزیه و تحلیل گوه زیرزمینی آن محافظه کارانه است ولی هیچ مقاومت منسجم در امتداد ناپیوستگی عمده وجود ندارد، و همچنین تنها زاویه اصطکاک اولیه با توجه به اثر انفجار در توده سنگ اطراف گالری در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای واحد L_w فرض شده است که پارامترهای مقاومت برشی برابر با $C=0\text{kPa}$ و $\Phi=33^\circ$ است.
- با این حال برای انتخاب بهترین سیستم‌های پایداری سنگ برای گالری RG1، تجزیه و تحلیل عددی نقش مهمی را به دلیل دقیق بودن مدل‌سازی شرایط توده سنگ، حفاری تونل و همچنین نصب نگهدارنده سنگ می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

- این مطالعه با هدف بررسی پایداری تونل دسترسی RG1 در سد گلورد و تأثیر سیستم‌های نگهداری شاتکریت و بولت انجام شد.
- بر اساس طبقه بندی توده سنگ با روشهای RMR، GSI، Q-System و سه کلاس اصلی شناسایی شد: کلاس I (سنگ سالم)، کلاس II (سنگ هوازده)، و کلاس III (مناطق گسلی). نتایج مدل سازی عددی با نرم افزار Phase2 نشان داد که در کلاس I، استفاده از شاتکریت ۵۰ میلیمتری برای افزایش ایمنی کافی است، در حالی در کلاس III، ترکیب شاتکریت ۱۵۰ میلی متری تقویت شده با توری فلزی و بولت های $\Phi 22$ با فاصله 1×1 متر، جابجایی ها را از ۸٫۵ به ۷٫۱ میلیمتر کاهش داد.

منابع

- الهی، ا.، ۱۳۹۳. کنترل زمین و نگهداری در معادن، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی واحد مازندران.
- اورعی، ک.، ۱۳۸۷. نگهداری در معادن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- خوش، ب.، عطاپور، ه.، عباسپور، م.، ۱۳۹۹. اثرالیاف بازیافتی از تایلر فرسوده بر مشخصات مقاومتی و تغییر شکل پذیری شاتکریت. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، زمستان ۹۹۱۱، جلد سیزدهم، شماره ۴، صفحه ۷۵ تا ۹۳.

- شرکت گلابار، شرکت خاک آزما، ۲۰۰۶. گزارشات آزمایشات آزمایشگاهی مکانیک سنگ بر روی نمونه های پروژه سد گلورد.
- شرکت گلابار، رساب کاوان، ۲۰۰۹. گزارشات آزمایشات آزمایشگاهی مکانیک سنگ بر روی نمونه های پروژه سد گلورد.
- شرکت ایران خاک، ۲۰۰۹. گزارشات آزمایشات آزمایشگاهی مکانیک سنگ بر روی نمونه های پروژه سد گلورد.
- مدنی، ح، ۱۳۹۳. طراحی و اجرای سیستم نگهداری. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Barton, N., 2007. Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy .

Bhawani, S., and Rajnish., K.G., 2006. Tunneling in Weak Rocks, El-Sever, London.

Hoek, E., 2007. Rock Engineering, Course Notes.

Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 2000. Support of Underground Excavations in Hard Rock .CRC Press.

Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Int .J. Rock Mech .Min .Sci., Vol.43, pp .203-215 .Empirical Estimation of Rock Mass Modulus.

Kuesel, T.R., King, E.H., Bickel, J.O., 2012 .Tunnel Engineering Handbook .Springer Science & Business Media.

ISRM Suggested Methods., 1981 .Suggested Methods for Determining Shear Strength, Part 2, Suggested Method for Laboratory Determination of Direct Shear Strength, Rock Characterization for Testing and Monitoring, Dimitrios Kolymbas, pp .135-137,)1981.(

Thomas, A., 2008 .Sprayed Concrete Lined Tunnels .CRC Press.