

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور با استفاده از روش‌های تجربی و عددی

مرتضی سازگار^۱، سیدرضا حسینی کینکی^{۲*}، غلامرضا لشکری پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، sazegarmorteza@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، r.hoseiny1369@yahoo.com

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، lashkaripour@um.ac.ir

چکیده

تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور با هدف تأمین آب شرب و صنعتی بروجن و حومه در حال اجرا است. مسیر تونل از ارتفاعات کلار جزء رشته کوه‌های زاگرس چین خورده عبور می‌کند. مسیر تونل در اثر گسل‌ها و ناپیوستگی‌های فراوان در توده سنگ‌های مسیر، متحمل شکستگی‌های فراوان شده است. در این مقاله جهت طبقه‌بندی توده سنگ‌های مسیر تونل از طبقه‌بندی‌های ژئومکانیکی، شاخص تونل‌سازی در سنگ و شاخص مقاومت زمین‌شناسی استفاده شده است. بر اساس این طبقه‌بندی‌ها سیستم نگهدارنده مناسب طراحی و پیشنهاد گردیده است. همچنین با استفاده از روش اجزای محدود، تونل مذکور تحلیل شده است. در این تحلیل مناطق دارای بیشترین و کمترین جابجایی و همچنین مقدار تنش‌ها در چهار قسمت از مقطع تونل مورد بررسی شده و بر اساس آن سیستم نگهدارنده تونل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد ناپایداری‌ترین قسمت، مقطع M (بیشترین جابجایی و تنش متوسط) با لیتولوژی شیل با ماسه‌سنگ و پایدارترین قسمت، مقطع C (کمترین جابجایی و تنش متوسط) با لیتولوژی سنگ آهک و مارن می‌باشد که با نتایج حاصل از روش میدانی اندازه‌گیری شده تقریباً نزدیک است.

واژه‌های کلیدی: تونل، سبزکوه، کلار، اجزای محدود، سیستم نگهدارنده، ژئومکانیکی.

۱- مقدمه

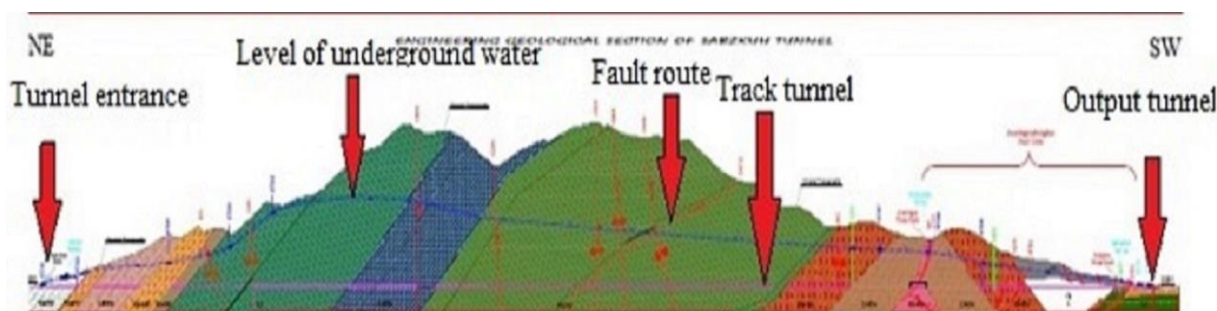
تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور با مقطع دایره‌ای شکل به طول ۱۰۷۶۰ متر با شیبی معادل ۱ در هزار و قطر داخلی ۳٫۶ متر، قطر خارجی ۴٫۵۲۵ دارای قابلیت انتقال آب با دبی ۷ مترمکعب بر ثانیه در حال احداث می‌باشد. این تونل با راستای تقریباً شمالی- جنوبی در فاصله‌ی ۶۵ کیلومتری جنوب شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. نقطه شروع حفاری تونل یا دهانه خروجی تونل با مختصات ۴۸۸۸۵٫۸۹ شرقی، ۳۵۲۹۷۱۶٫۱۹ شمالی با ارتفاع ۲۲۸۱ متر در فاصله‌ی ۴۰۰ متری جنوب تا جنوب غربی دریاچه چغاخور واقع شده است. انتهای تونل یا دهانه ورودی تونل دارای مختصات جغرافیایی ۴۸۸۵۶۴٫۹۵ شرقی، ۳۵۱۹۱۲۳٫۱۵ شمالی با ارتفاع ۲۲۹۱ متر در فاصله‌ی ۱۵۰ متری شمال رودخانه سبزکوه قرار دارد [1]. تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور در راستای شمال شرق - جنوب غرب از ارتفاعات کلار می‌گذرد و حجم زیادی از آب ارتفاعات سبزکوه را به منطقه چغاخور منتقل می‌کند. اجرای این طرح با هدف کمک به توسعه شهرستان بروجن در استان چهارمحال و بختیاری برنامه‌ریزی شده است.

توده سنگ‌های مسیر تونل عمدتاً از آهک، دولومیت، شیل، مارن، آهک مارنی، آهک دولومیتی، سیلت و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. مسیر تونل زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد، تکتونیزه‌ی فعال منطقه بخصوص گسل‌های که مقطع تونل را قطع کرده‌اند باعث ایجاد زون‌های خورد شده در بسیاری از تشکیلات مسیر تونل شده است. در این تحقیق طول مسیر تونل با توجه به تغییرات لیتولوژی به ۱۰ مقطع تقسیم شده است. مقطع شماره ۱۰ مربوط به رسوبات کواترنری می‌باشد (امکان

برداشت ناپیوستگی در این محدوده وجود ندارد). اطلاعات مربوط به ۹ مقطع دیگر در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین پروفیل مسیر تونل با توجه به وضعیت لیتولوژی، سطح آب زیرزمینی، متراژ مقاطع در مسیر تونل و وضعیت گسل‌های اصلی محدوده در شکل (۱) آورده شده است.

جدول ۱: جدول مشخصات مهندسی لیتولوژی های مسیر تونل

مقطع	لیتولوژی	γ_d (Kg/m ³)	C (Mpa)	درجه ϕ	Ground Elevation(m)	متراژ (m)
A	Sh-MI	۲.۴۸	۰.۲۵ - ۰.۳۰	۲۴ - ۲۶	۳۵	۵۲۰
B	Ma-MI	۲.۵۴	۰.۵ - ۰.۶	۲۸ - ۳۰	۴۴	۴۰۰
C	Li-Ma	۲.۵۸	۱.۰۴ - ۱.۱۶	۲۹ - ۳۲	۱۷۰	۴۸۰
D	Li	۲.۶۴	۳.۲۷ - ۳.۷۳	۴۵.۲ - ۴۶.۹۷	۴۰۰	۱۵۳۰
E	Li-Sh	۲.۶	۲.۵ - ۲.۶	۳۲ - ۳۴	۵۰۰	۸۴۰
F, H	M-Do	۲.۶۴	۲.۸۵ - ۲.۹۵	۳۳ - ۳۵	۳۵۰	۳۳۰۰
I, P	Br-Do	۲.۶۳	۱.۰۶ - ۱.۲۰	۳۱.۲ - ۳۳.۳	۲۵۰	۱۱۲۰
L, O	Li-Do	۲.۵۷	۱.۵ - ۱.۷۳	۴۲ - ۴۴	۲۰۰	۱۰۴۰
M	Sh-Sa	۲.۵	۰.۳۳ - ۰.۳۹	۱۶.۷ - ۱۸.۹	۲۳۰	۱۵۰
G, J, N, Q	زون های خورد شده					-
R	رسوبات کواترنری					۱۳۶۰



شکل (۱): پروفیل تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور (مهندسین مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۹)

۲- درزه‌نگاری منطقه‌ی مورد مطالعه

برداشت ناپیوستگی‌ها با توجه به تغییرات لیتولوژی در ۹ مقطع (A, B, C, D, E, (F,H), (I,P), (L, O), M) از ابتدای تونل تا انتها تونل برداشت گردید و درزه‌ها و لایه‌بندی‌ها بر اساس استاندارد ISRM (1981) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به طور معمول در هر ایستگاه بسته به میزان رخنمون و متراژ خط برداشت بین ۱۵۰ تا ۴۵۰ درزه برداشت شد. در طول مسیر تونل بین سه تا شش دسته درزه در محدوده هر مقطع شناسایی و تشخیص داده شد و اغلب درزه‌ها از کلسیت، رس و ترکیبات کلسیت رسی پر شده است [1]. اطلاعات مربوط به ناپیوستگی‌های غالب در ۹ مقطع در جدول (۲) آورده شده است

جدول ۲: اطلاعات مربوط به ناپیوستگی‌های غالب در کل مسیر تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور

مترای	DIP/DIP direction	نوع ناپیوستگی	نشانه درزه	موقعیت
-۱۲۳۰) و (۳۵۰ -۰) (۱۳۹۰)	۸۰/۳۰۴	درزه غالب	J1	مقطع A
	۳۸/۰۵۴	درزه غالب	J2	
	۴۹/۲۱۵	لایه بندی	J3	
) و (۳۵۰-۴۹۰) (۹۷۰-۱۲۳۰)	۵۱/۳۱۴	درزه غالب	J1	مقطع B
	۶۳/۰۳۱	درزه غالب	J2	
	۳۹/۳۱۵	لایه بندی	J3	
(۴۹۰-۹۷۰)	۸۵/۲۳۸	درزه غالب	J1	مقطع C
	۷۳/۱۲۳	درزه غالب	J2	
	۸۰/۰۹۱	درزه غالب	J3	
	۵۱/۰۰۲	درزه غالب	J4	
	۴۱/۲۰۱	لایه بندی	J5	
(۲۹۳۰-۱۳۹۰)	۵۸/۲۸۹	درزه غالب	J1	مقطع D
	۵۷/۰۸۹	درزه غالب	J2	
	۵۱/۳۰۸	لایه بندی	J3	
(۳۷۷۰-۲۹۳۰)	۷۶/۳۷۷	درزه غالب	J1	مقطع E
	۷۲/۱۰۴	درزه غالب	J2	
	۵۸/۲۰۳	لایه بندی	J3	
(۷۰۸۰-۳۷۷۰)	۷۵/۲۹۰	درزه غالب	J1	مقطع F, H
	۳۰/۳۲۴	درزه غالب	J2	
	۵۴/۰۵۹	درزه غالب	J3	
	۵۲/۲۰۸	لایه بندی	J4	
) و (۷۰۸۰-۷۷۲۰) (۸۹۲۰-۹۴۰۰)	۶۸/۲۳۳	درزه غالب	J1	مقطع I, P
	۶۹/۳۸۳	درزه غالب	J2	
	۵۷/۱۳۴	درزه غالب	J3	
	۷۱/۰۶۶	درزه غالب	J4	
	۶۵/۳۵۸	درزه غالب	J5	
	۳۱/۲۲۰	لایه بندی	J6	
(۷۷۲۰-۸۲۸۰) (۸۹۲۰-۸۴۳۰) و	۲۹/۳۱۷	درزه غالب	J1	مقطع L, O
	۷۲/۰۵۷	درزه غالب	J2	
	۵۱/۳۱۰	لایه بندی	J3	
(۸۴۳۰-۸۲۸۰)	۵۲/۱۵۰	درزه غالب	J1	مقطع M
	۴۸/۳۲۲	درزه غالب	J2	
	۷۰/۰۶۰	درزه غالب	J3	
	۵۰/۲۱۳	لایه بندی	J4	
-	زون خورد شده			مقطع G, J, N, Q
(۱۰۷۶۰-۹۴۰۰)	رسوبات کواترنری			مقطع R

۳- زون بندی مسیر تونل

در مهندسی سنگ، روش طبقه بندی توده سنگ‌ها خیلی مفید است [6]. توده سنگ‌های مسیر تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور بر اساس خصوصیات و تغییرات لیتولوژی و گسل‌ها (زون‌های خورد شده) به ۱۷ قسمت تقسیم شده و با بررسی اطلاعاتی مثل کیفیت توده سنگ‌ها (RQD)، خصوصیات و ویژگی‌های درزه‌ها موجود در توده سنگ‌های مسیر تونل، وضعیت تنش‌ها و وضعیت آب‌های زیرزمینی به طبقه بندی زمین شناسی مهندسی توده سنگ‌های مسیر تونل بر اساس سیستم RMR، Q و GSI پرداخته شده است (جدول ۳). و بر این اساس به ارزیابی پایداری اولیه ی توده سنگ‌های مسیر تونل در زمان حفاری و میزان پایداری توده سنگ‌ها در بهره برداری از تونل پرداخته شده است. کیفیت توده سنگ‌های در برگیرنده تونل انتقال آب، با استفاده از سیستم‌های طبقه بندی RMR (Bieniawski, 1989)، Q (Grimstad & Barton, 1993) و GSI (Hoek et al., 1998) مورد ارزیابی قرار گرفته است [5,7].

جدول ۳: طبقه‌بندی توده سنگ‌های مسیر تونل

مقطع	رخدادهای ساختاری	لیتولوژی	محدوده (m)
A	تغییر لیتولوژی	شیل با سنگ آهک مارنی	(۰ - ۳۵۰) و (۱۲۳۰ - ۱۴۰۰)
B	تغییر لیتولوژی	سنگ مارن و آهک مارنی	(۳۵۰ - ۴۹۰) و (۹۷۰ - ۱۲۳۰)
C	تغییر لیتولوژی	آهک با سنگ مارن	۹۷۰ - ۴۹۰
D	تغییر لیتولوژی	آهک	۲۹۳۰ - ۱۴۰۰
E	تغییر لیتولوژی	آهک با میان لایه شیل	۳۷۷۰ - ۲۹۳۰
F	قبل از گسل	دولومیت توده ای	۵۱۶۰ - ۳۷۷۰
G	محدوده گسل	دولومیت توده ای	۶۰۰۰ - ۵۱۶۰
H	بعد از گسل	دولومیت توده ای	۷۰۷۰ - ۶۰۰۰
I	قبل از گسل	دولومیت برشی	۷۶۰۰ - ۷۰۷۰
J	محدوده گسل	دولومیت برشی	۷۷۲۰ - ۷۶۰۰
L	تغییر لیتولوژی	آهک دولومیتی	۸۲۸۰ - ۷۷۲۰
M	لیتولوژی و گسل	شیل با ماسه سنگ	۸۴۳۰ - ۸۲۸۰
N	محدوده گسل	سنگ آهک دولومیتی	۸۶۸۰ - ۸۴۴۰
O	بعد از گسل	سنگ آهک دولومیتی	۸۹۳۰ - ۸۶۸۰
P	قبل از گسل	دولومیت برشی	۹۱۸۰ - ۸۹۳۰
Q	محدوده گسل	دولومیت برشی	۹۴۰۰ - ۹۱۸۰
R	تغییر لیتولوژی	رسوبات کواترنری	۱۰۷۶۰ - ۹۴۰۰

۴- طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)

طبقه‌بندی توده سنگ اگر با دقت انجام شود می‌تواند ابزاری دقیق در طراحی مهندسی باشد. در بسیاری از پروژه‌ها طبقه‌بندی پایه‌ی طراحی سازه است [11]. جهت رده‌بندی توده سنگ‌های مسیر تونل از سیستم طبقه‌بندی اصلاح‌شده RMR یا CSIR در سال ۱۹۸۹ استفاده گردیده است. جدول ۴ میزان RMR به‌دست‌آمده در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد. با داشتن میزان RMR در این قسمت توصیه‌های لازم جهت حفاری و نگهداری تونل تعیین شده و نتیجه در جدول ۵ ارائه شده است

جدول ۴ : نتایج طبقه‌بندی RMR برای مقاطع مختلف تونل

مقطع R	مقطع Q		مقطع P		مقطع O		مقطع N		مقطع M		مقطع L		مقطع I		مقطع H		مقطع G		مقطع F		مقطع E		مقطع D		مقطع C		مقطع B		مقطع A		مقیاس نظری تک‌محوری (MPa)								
	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف	مقدار	انحراف									
0	0.22-1.1	1	5.76-7.01	2	13.46-15.84	0	0.22-1.1	0	0.68-0.93	2	13.46-15.84	0	0.22-1.1	1	5.76-7.01	2	10.91-12.68	0	0.22-1.1	2	10.91-12.68	2	9.05-10.61	2	19.96-23.52	1	8.38-9.63	1	4.86-5.57	1	1.69-2.18	1	1.69-2.18	1	1.69-2.18				
3	20	8	42	8	45	3	20	3	20	8	45	3	20	8	42	13	55	3	20	13	55	13	57	13	57	13	65	8	47	8	37	8	37	8	37	8	37		
10	0.2-0.6	10	0.2-0.6	8	0.15-0.5	8	0.15-0.5	8	0.1-0.2	8	0.15-0.5	10	0.2-0.6	10	0.2-0.6	15	0.4-1.5	15	0.4-1.5	15	0.4-1.5	15	0.5-1.5	15	0.2-1.5	15	0.2-1.5	10	0.2-0.6	10	0.2-0.6	10	0.2-0.6	10	0.2-0.6	10	0.2-0.6	10	0.2-0.6
زمینک‌گرفتنی	0.4-1.5		0.4-1.5		0.4-2		0.4-2		0.5-1.5		1.0-3.5		0.4-1.5		0.4-1.5		1.0-5.0		1.0-5.0		1.0-5.0		1.0-10.0		1-2.10		2.0-5.0		1.0-5.0		0.5-3		0.5-3		0.5-3		0.5-3		0.5-3
	0.5-5		0.5-5		0.3-2.5		0.3-2.5		0.5-2.5		0.3-2.5		0.5-5		0.5-5		1.0-10		1.0-10		1.0-10		0.4-3		0.5-3		0.15-2		0.5-2.5		0.5-2		0.5-2		0.5-2		0.5-2		0.5-2
	R-S		Rough-Smooth		Moderately-Rough		Moderately-Rough		Rough-Smooth		Moderately-Rough		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough		Rough		Slightly-Rough		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth		Rough-Smooth
	MW		MW		MW		MW		MW		MW		MW		MW		MW		MW		MW		SW		MW		SW		SW		MW		MW		MW		MW		MW
10	D	10	D	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	D	10	D	10	Damp	10	D	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp	10	Damp
-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2		-2	
31		37		36		29		29		36		31		37		38		26		38		48		58		57		37		37		37		37		37		37	
	ضعیف		ضعیف		نیم‌تاز		ضعیف		ضعیف		نیم‌تاز		ضعیف		ضعیف		ضعیف		ضعیف		ضعیف		نیم‌تاز		نیم‌تاز		نیم‌تاز		ضعیف		ضعیف		ضعیف		ضعیف		ضعیف		

جدول ۵ : تمهیدات اجرایی برای حفاری و نگهداری برای مقاطع مختلف تونل، منطبق با سیستم RMR (Bieniawski, 1989).

مقطع	رده توده سنگ	حفاری	پیچ سنگ به قطر ۲۰ میلیمتر و کاملاً	شاتکریت	قاب فلزی
C, D, E	نسبتاً خوب	حفاری دو مرحله ای، ۱.۵-۳ متر پیشروی در مرحله اول در قسمت پیشانی، انجام نگهداری پس از آتش باری، نگهداری کامل ۱۰ متر از جبهه ی کار	بولت ها به طور منظم به طول ۴ متر و به فاصله ی ۱-۲ متر در تاج و دیواره ها به اضافه تور سیمی در تاج	میلیمتر در تاج (۵۰-۱۰۰)، و ۳۰ میلیمتر در اطراف	هیچ
A, B, F, H, J, L, M, N, O, P, Q, G	ضعیف	حفاری دو مرحله ای، ۱.۵-۳ متر پیشروی در مرحله اول در قسمت پیشانی، نصب ساپورت به طور همزمان با حفاری ۱۰ متر از جبهه ی کار	بولت ها به طور منظم به طول ۴ تا ۵ متر و به فاصله ی ۱-۱.۵ متر در تاج و دیواره ها به اضافه تور سیمی در تاج	میلیمتر در تاج (۱۰۰-۱۵۰)، و ۱۰۰ میلیمتر در اطراف	پایه های کناری سبک به فاصله ی ۱.۵ متر هر جا که احتیاج داشت
R	خیلی ضعیف	۰.۵ تا ۱.۵ متر پیشروی در مرحله ی اول در قسمت پیشانی، نصب ساپورت همزمان با حفاری، شاتکریت هر چه سریع تر بعد از آتشباری	بولت گذاری منظم به طول ۵ تا ۶ متر و به فاصله ی ۱ تا ۱.۵ متر در تاج و دیواره ها با توری سیمی، بولت وارونه	۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیمتر در تاج و ۵۰ میلیمتر در اطراف و ۵۰ میلیمتر در سینه کار	پایه های کناری متوسط تا سنگین به فاصله ی ۰.۷۵ متر با پشت بند فولادی، تقویت قبل از حفر در صورت لزوم، تسمه فولادی با قوس وارانه

۵- شاخص کیفی تونل زنی در سنگ (Q)

جهت رده‌بندی توده سنگ‌های مسیر تونل از سیستم طبقه‌بندی Q استفاده گردیده است. جدول ۶ میزان به‌دست‌آمده Q در بخش‌های مختلف را نشان می‌دهد [9]. برآورد نگهدارنده لازم بر اساس سیستم Q جهت تحلیل و توصیف سیستم‌های موردنیاز جهت پایداری تونل پس از حفاری نیاز به بعد معادل حفاری می‌باشد (جدول ۷) و بر این اساس میزان عددی Q را به نگهدارنده تونل مرتبط می‌سازد، این پارامتر با تقسیم دهانه (قطر و یا ارتفاع دیواره حفاری) بر کمیت نسبت نگهدارنده حفاری ESR به دست می‌آید [10].

جدول ۶: نتایج طبقه‌بندی Q برای مقاطع مختلف تونل

پارامترها	مقطع A	مقطع B	مقطع C	مقطع D	مقطع E	مقطع F	مقطع G	مقطع H	مقطع I	مقطع J	مقطع K	مقطع L	مقطع M	مقطع N	مقطع O	مقطع P	مقطع Q	مقطع R
ROQ	37	37	47	47	57	57	55	55	42	42	20	20	20	20	45	45	20	20
به دسته‌بندی	9P2	به دسته‌بندی	9	به دسته‌بندی	9	چهار دسته‌بندی	20	چهار دسته‌بندی	15	شش دسته‌بندی	20	شش دسته‌بندی	9	شش دسته‌بندی	20	شش دسته‌بندی	15	شش دسته‌بندی
Jr	1.5 Rough-Smooth	1.5 S-R	3 Rough	3 Rough	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth	2 Moderately-Rough	2 Moderately-Rough	2 Moderately-Rough	2 Moderately-Rough	2 Moderately-Rough	1.5 Rough-Smooth	1.5 Rough-Smooth
Ja	2 MW	2 SW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW	2 MW
Jw	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط	0.66 متوسط
SF	1 کمتر متوسط	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	2 کمتر زیاد	5
Q	1.01	1.28	2.14	3.13	1.56	0.9	0.1	0.91	0.1	0.69	0.1	1.65	0.1	0.132	1.65	0.69	0.1	
کلاس سنگ	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف	خیلی ضعیف

جدول ۷: تمهیدات سیستم نگهدارنده بر اساس سیستم Q

مقاطع	De	رده نگهدارنده	ضخامت شاتکریت (mm)		پیچ سنگ (m)
			مسلمح	غیر مسلمح	
A	۳.۵	۴	-	۴۸	۱.۷
B	۳.۵	۴	-	۴۵	۲
C	۳.۵	۴	-	۴۵	۲
D	۳.۵	۴	-	۴۰	۲
E	۳.۵	۴	-	۴۵	۲
F	۳.۵	۴	-	۴۸	۱.۷
G	۳.۵	۶	۱۱۰	-	۱.۳
H	۳.۵	۴	-	۴۸	۱.۷
I	۳.۵	۴	-	۴۵	۱.۷
J	۳.۵	۶	۱۱۰	-	۱.۳
L	۳.۵	۴	-	۴۵	۲
M	۳.۵	۶	۱۱۰	-	۱.۳
N	۳.۵	۵	۱۱۰	-	۱.۷
O	۳.۵	۴	-	۴۵	۲
P	۳.۵	۴	-	۴۵	۱.۷
Q	۳.۵	۶	۱۱۰	-	۱.۳
R	۳.۵	-	۱۲۰	-	-

۶- اندیس مقاومت زمین‌شناسی GSI

اندیس مقاومت زمین‌شناسی توسط هوک و همکارانش در طی سال‌های ۱۹۹۴، ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸ معرفی شده است. این سیستم روشی برای برآورد کاهش مقاومت توده سنگ در شرایط مختلف زمین‌شناسی بوده که مقدار آن با مشاهدات صحرایی تعیین می‌گردد [10]. همچنین تعیین اندیس مقاومت زمین‌شناختی بر اساس طبقه‌بندی‌های RMR و برای سنگ‌های در

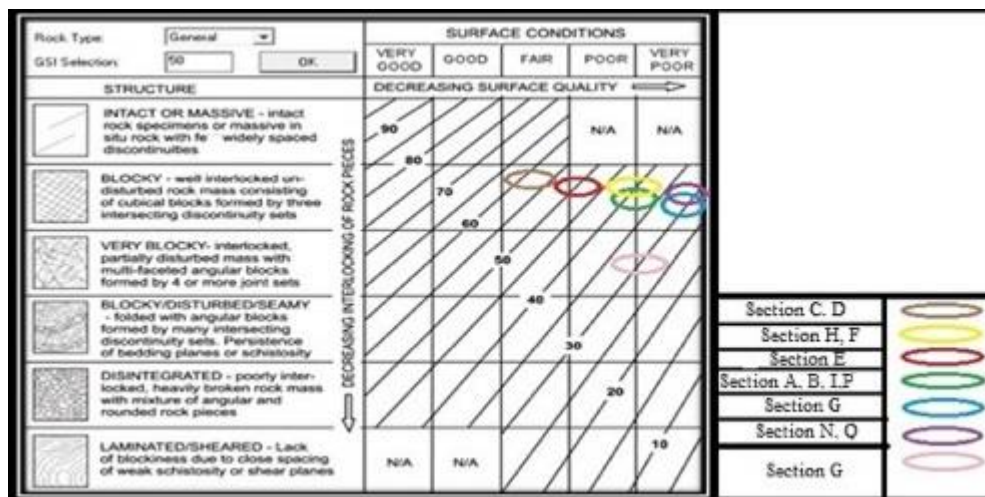
برگیرنده تونل انتقال آب سبزهکوه با توجه به این پارامترها که کل مسیر تونل در زیر سطح ایستایی قرار گرفته و میزان RMR محاسبه شده برای کلیه مقاطع بالاتر از ۱۸ می باشد از GSI 76 استفاده شده است [2]. این شاخص برای شرایط آب زیرزمینی امتیاز ۱۰ و برای پارامتر مربوط به جهت یافتگی درزهها امتیاز صفر را در نظر می گیرد (شکل ۲) بنابراین:

$$RMR = (GSI76) \quad RMR76 > 18$$

اطلاعات به دست آمده برای محاسبه ی GSI بر اساس RMR 76 در جدول ۸ قرار داده شده است.

جدول ۸ : مقادیر GSI محاسبه شده بر اساس RMR 76

مقطع	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R
GSI	۳۹	۳۹	۵۹	۶۰	۵۰	۴۰	۲۸	۴۰	۳۹	۳۳	۳۸	۳۱	۳۱	۳۸	۳۹	۳۳	-



شکل (۲): مقادیر GSI برای کلیه مقاطع تونل انتقال آب بر روی نمودار سیستم GSI (Hoch et al., 1998).

۷- تحلیل عددی با استفاده از روش اجزای محدود

یکی از پارامترهای اصلی بررسی توده سنگ های مسیر تونل با استفاده از روش اجزای محدود، وضعیت تنش ها و رفتار توده سنگ های مسیر قبل و بعد از حفاری است [8]. در این روش توده سنگ مورد مطالعه را به قطعات کوچک تری تقسیم می کنند که هر کدام به عنوان یک عنصر نام می گیرند. همچنین فرض می گردد که این عناصر دارای خواص مخصوص به خود بوده و در نقاط مشخصی که گره نامیده می شوند به یکدیگر متصل می شوند جابجایی ها در محل گره ها اتفاق می افتد، بنابراین در این روش توده سنگی که بی نهایت درجه آزادی دارد به جسمی شبیه سازی می شود که تنها ۲ تا ۳ برابر تعداد گره ها درجه آزادی دارد [3].

به طور کلی برای تحلیل و بررسی سازه های زیرزمینی محاسبه تنش های بر جا از ابتدایی ترین مراحل می باشد. مقدار عددی تنش عمودی σ_v را با در نظر گرفتن میزان روباره و همچنین وزن واحد حجم ذرات قابل محاسبه می باشد. تعیین تنش افقی σ_H به دلیل وجود تنش های حاصل از فرآیندهای تکتونیکی، زمین شناسی و تغییرات توپوگرافی بسیار مشکل می باشد. در توده سنگ های مسیر تونل جهت تخمین مقدار K_0 از تقسیم کردن تنش افقی به تنش قائم می توان به این نتیجه رسید که مقدار K_0 بین (۱,۷ تا ۱,۳) می باشد که نزدیک دهانه ی ورودی و خروجی تونل حدود ۱,۷ و در قسمت هایی که ارتفاع روباره تونل زیاد بوده (حدود ۱۰۰۰ متر)، ۱,۳ در نظر گرفته شده است. به طور کلی از ۱۷ مقطع در نظر گرفته شده برای تونل، ۴

مقطع مربوط به زون‌های خورد شده، یک مقطع هم رسوبات کواترنری و ۳ مقطع هم از نظر لیتولوژی با مقاطع قبلی یا بعدی تشابه دارند، در نتیجه ۹ مقطع از مسیر تونل تحت بررسی و تحلیل پایداری با استفاده از روش اجزای محدود قرار گرفته است.

۸- مدل سازی توده سنگ‌های دربرگیرنده تونل

جهت بررسی و مدل سازی تونل نیاز به پارامترهای مقاومتی توده سنگ از قبیل میزان مدول تغییر شکل پذیری، نسبت پواسان، ثابت‌های هوک-براون و غیره می‌باشد. با توجه به شرایط زمین‌شناسی توده سنگ و وجود ناپیوستگی‌ها میزان فاکتور تأثیر انفجار (رهایی تنش بر روی توده سنگ)، $D = (0.0 \& 0.5)$ برای توده سنگ‌های مقطع (A, B, C) صفر و برای بقیه‌ی مقاطع تونل ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود. داده‌های ورودی موردنیاز برای نرم‌افزار بالا جهت مدل سازی و تخمین میزان تنش‌ها و جابجایی‌ها در کلیه‌ی مقاطع تونل در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹: پارامترهای مؤثر در روش اجزای محدود

مقطع	A	B	C	D	E	F, H	I, P	L, O	M
وزن مخصوص (Kgm^3)	۲۴۸	۲۵۴	۲۵۸	۲۶۴	۲۶	۲۶۴	۲۶۳	۲۵۷	۲۵
سرباره (متر)	۱۵۰	۲۰۰	۲۴۰	۷۰۰	۸۷۰	۹۵۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۵۰
چسبندگی	۰.۲۶ - ۰.۳	۰.۵ - ۰.۶	۱.۰۴ - ۱.۱۶	۳.۲۷ - ۳.۳۷	۲.۵ - ۲.۶	۲.۸۵ - ۲.۹۵	۱.۰۶ - ۱.۲	۱.۵ - ۱.۷۳	۰.۳۳ - ۰.۳۹
اصطحکاک داخلی (درجه)	۲۴ - ۲۶	۲۸ - ۳۰	۲۹ - ۳۲	۴۵ - ۴۶	۳۲ - ۳۴	۳۳ - ۳۵	۳۱ - ۳۳	۴۲ - ۴۴	۱۶.۸ - ۱۸.۹
نسبت پواسن	۰.۳۴ - ۰.۳۶	۰.۳۳ - ۰.۳۵	۰.۳۸ - ۰.۳	۰.۲۲ - ۰.۲۳	۰.۲۵ - ۰.۲۸	۰.۲ - ۰.۲۲	۰.۲۵ - ۰.۲۷	۰.۲۲ - ۰.۲۵	۰.۳۴ - ۰.۳۶
مدول یانگ (Gpa)	۲.۴ - ۳.۵	۵.۲ - ۶.۷	۶.۷ - ۸.۷	۱۷ - ۱۹	۸.۳ - ۱۰.۷	۱۰.۲ - ۱۳.۸	۲.۶ - ۳.۷	۶.۹ - ۹.۱	۰.۸۲ - ۱.۱۴
K_0	۱.۶۵	۱.۶۴	۱.۷	۱.۴۲	۱.۳	۱.۲۹	۱.۵۶	۱.۶۵	۱.۷۴
m_b	۰.۸۴۳	۰.۹۴۹	۱.۴۴۱	۱.۳۵۳	۱.۸۷۵	۰.۴۱۲	۰.۳۹۲	۰.۴۷۵	۰.۳۴
a	۰.۵۱۴	۰.۵۱۴	۰.۵۰۵	۰.۵۰۳	۰.۵۰۹	۰.۵۱۸	۰.۵۲	۰.۵۱۵	۰.۵۲۴

۹- نتایج تحلیل عددی بر اساس روش اجزای محدود

با استفاده از روش اجزای محدود چگونگی توزیع تنش‌های اصلی در نقاط مختلف اطراف تونل محاسبه گردید (جدول ۱۰). همان‌طور که با بررسی جدول مشخص می‌گردد، بیشترین میزان تنش حداکثر در سقف مقطع (F,H) به میزان 73.5 MPa و کمترین میزان مربوط به دیواره‌های سمت چپ و راست در مقاطع (A, B, (L, N, O) به میزان صفر می‌باشد. ماکزیمم تنش حداقل در کف مقطع (F,H) به میزان 9 MPa کمترین میزان در دیواره سمت راست و چپ به میزان 1.95 MPa - می‌باشد. بیشترین میزان تنش میانگین در سقف مقطع (F,H) به میزان 29.6 MPa و کمترین میزان در دیواره سمت چپ و راست مقطع A به میزان (0.25 MPa) تخمین زده شد، به‌طورکلی میزان تنش در سقف و کف بیشتر از دیواره‌ها تخمین زده شده است.

با استفاده از روش اجزای محدود چگونگی جابجایی در نقاط مختلف اطراف تونل قابل ارزیابی است (جدول ۱۱). لازم به ذکر است که مهم‌ترین پارامتر در ناپایداری تونل میزان جابجایی در اطراف آن می‌باشد [4]. در جابجایی کل، حداکثر جابجایی مربوط به سقف، دیواره سمت راست و چپ تونل در مقطع M با ۸ سانتیمتر جابجایی و کمترین مربوط به کف تونل در مقاطع B و C با ۵.۶ میلی‌متر جابجایی می‌باشد. در جابجایی افقی، حداکثر جابجایی در دیواره سمت چپ مقطع M تونل به مقدار ۵.۶ سانتیمتر و کمترین جابجایی در دیواره سمت چپ مقطع B با (۴.۹) میلی‌متر جابجایی می‌باشد و در جابجایی قائم بیشترین میزان مربوط به سقف مقطع M با ۸ سانتیمتر جابجایی و کمترین مقدار به مقاطع B و C در کف و دیواره سمت راست با ۵.۶ میلی‌متر جابجایی می‌باشد

جدول ۱۰: میزان تنش‌های به‌دست آمده از روش اجزای محدود در مقاطع مختلف تونل

مقطع M	مقطع (L, O)	مقطع (I, P)	مقطع (F, H)	مقطع E	مقطع D	مقطع C	مقطع B	مقطع A	میزان تنش (Mpa)	
۳۲	۳۲	۳۶	۷۳.۵	۶۳	۵۷	۲۲.۵	۱۶.۱۵	۱۲	سقف	تنش حداکثر
۳۰	۳۲	۳۴	۷۰	۵۹.۵	۵۴	۲۲.۵	۱۶.۱۵	۱۲	کف	
۲	۰	۲	۳.۵	۳.۵	۳	۰	۰	۰	دیوار سمت راست	
۲	۰	۲	۳.۵	۳.۵	۳	۱.۵	۰	۰	دیوار سمت چپ	
۳.۵۵	۳.۴۵	۳.۱	۶	۶	۶.۱	۲	۲.۱	۱.۲	سقف	تنش حداقل
۴.۶۵	۴	۴.۳	۹	۷.۵	۷.۱	۲.۸	۲.۴	۱.۲	کف	
۱.۹۵	۰.۹۵	۱.۱	۱.۵	۱.۵	۰.۱	۱.۲	۰.۶	۰.۲	دیوار سمت راست	
۱.۹۵	۰.۹۵	۰.۵	۰	۰	۰.۱	۰.۸	۰.۶	۰.۲	دیوار سمت چپ	
۱۲.۶	۱۱.۷	۱۳.۷۵	۲۹.۶	۲۷	۲۲.۶۵	۸.۸	۶.۶۵	۴.۷۵	سقف	تنش میانگین
۱۲.۶	۱۱.۷	۱۳.۷۵	۲۸.۸	۲۷	۲۱.۹	۸.۸	۷	۴.۷۵	کف	
۰	۳.۲	۳.۳	۱۴.۴	۹.۹	۹.۱۵	۱.۲	۰.۳۵	۰.۲۵	دیوار سمت راست	
۰	۳.۲	۳.۳	۱۴.۴	۹.۹	۹.۱۵	۱.۲	۰.۳۵	۰.۲۵	دیوار سمت چپ	

جدول ۱۱: میزان جابجایی‌های به‌دست آمده از روش اجزای محدود در مقاطع مختلف تونل

مقطع M	مقطع (L, O)	مقطع (I, P)	مقطع (F, H)	مقطع E	مقطع D	مقطع C	مقطع B	مقطع A	مقدار کل جابجایی (m)	
۰.۰۸	۰.۰۱۲	۰.۰۳۶	۰.۰۲۲۵	۰.۰۲۲۵	۰.۰۱۰۵	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷	۰.۰۱	سقف	جابجایی کل
۰.۰۵۶	۰.۰۰۷۵	۰.۰۲۴	۰.۰۱۵	۰.۰۱۷۵	۰.۰۰۶	۰.۰۰۵۶	۰.۰۰۵۶	۰.۰۰۸	کف	
۰.۰۸	۰.۰۱۰۵	۰.۰۳۲	۰.۰۲	۰.۰۲۲۵	۰.۰۰۹	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷۷	۰.۰۱۱	دیوار سمت راست	
۰.۰۸	۰.۰۱۰۵	۰.۰۳۲	۰.۰۲	۰.۰۲۲۵	۰.۰۰۹	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷۷	۰.۰۱۱	دیوار سمت چپ	
۰	۰	۰.۰۰۱۵	۰	۰	۰	۰.۰۰۰۳	۰	۰.۰۰۰۵	سقف	جابجایی افقی
۰	۰	۰.۰۰۱۵	۰	۰	۰	۰.۰۰۰۳	۰	۰.۰۰۱۵۵	کف	
۰.۰۵۶	۰.۰۰۷۵	۰.۰۲۲۵	۰.۰۱	۰.۰۱۲۵	۰.۰۰۵	۰.۰۰۵۴	۰.۰۰۴۹	۰.۰۰۶۸	دیوار سمت راست	
۰.۰۵۶	۰.۰۰۷۵	۰.۰۲۲۵	۰.۰۱	۰.۰۱۲۵	۰.۰۰۵	۰.۰۰۴۸	۰.۰۰۴۹	۰.۰۰۶۸۵	دیوار سمت چپ	
۰.۰۸	۰.۰۱۲	۰.۰۳۶	۰.۰۲۲۵	۰.۰۲۲۵	۰.۰۱۰۵	۰.۰۰۸	۰.۰۰۷	۰.۰۱	سقف	جابجایی قائم
۰.۰۵۶	۰.۰۰۷۵	۰.۰۲۴	۰.۰۱۵	۰.۰۱۷۵	۰.۰۰۶	۰.۰۰۵۶	۰.۰۰۵۶	۰.۰۰۸	کف	
۰.۰۶۴	۰.۰۰۹	۰.۰۲۸	۰.۰۱۷۵	۰.۰۱۷۵	۰.۰۰۷۵	۰.۰۰۶۴	۰.۰۰۵۶	۰.۰۰۸	دیوار سمت راست	
۰.۰۶۴	۰.۰۰۹	۰.۰۲۸	۰.۰۱۷۵	۰.۰۱۷۵	۰.۰۰۷۵	۰.۰۰۶۴	۰.۰۰۵۶	۰.۰۰۸	دیوار سمت چپ	

۱۰- نتیجه‌گیری

با توجه به سیستم طبقه‌بندی RMR توده سنگ‌های مسیر تونل در دو رده‌ی ضعیف تا نسبتاً خوب قرار دارند، به‌طوری که در مقاطع (C, D, E, O, L) توده سنگ‌ها نسبتاً خوب و در بقیه مقاطع ضعیف می‌باشند.

در رده‌بندی Q، توده سنگ‌های مسیر تونل در دو رده‌ی ضعیف تا خیلی ضعیف تقسیم‌شده به‌طوری که مقاطع (F, G, H, I, J, M, N, P, Q) در رده‌ی سنگ‌های خیلی ضعیف و بقیه‌ی مقاطع در رده‌بندی ضعیف قرار دارند.

با توجه به مقایسه دو سیستم RMR و Q به خوبی متوجه این موضوع می‌شوید که در رده‌بندی Q تمهیدات بیشتری جهت پایداری تونل در نظر گرفته شده که این امر موجب بالا رفتن هزینه‌ها می‌شود.

با توجه به تحلیل‌های روش اجزای محدود بیشترین جابجایی مربوط به مقطع M با ۸ سانتیمتر و کمترین مربوط به مقطع B با ۵,۶ میلی‌متر جابجایی بوده است و با توجه به اینکه مهم‌ترین پارامتر در ناپایداری تونل میزان جابجایی در اطراف آن می‌باشد. ناپایدارترین مقطع M محسوب می‌شود و مقاطع E، (F,H)، (I,P,Q)، (L, N, O) نیز جزء مقاطع ناپایدار محسوب می‌گردد.

با توجه به بررسی نتایج روش‌های تحلیل پایداری شامل روش‌های تجربی (RMR, Q) و عددی (اجزای محدود)، مقاطع M، (F,H)، (I,P,Q) جزء ناپایدارترین و مقاطع B, C, D جزء پایدارترین مقاطع در مسیر تونل محسوب می‌گردد.

مراجع

- [1] مهندسين مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۹)، مطالعات تکمیلی زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب سبزکوه به چغاخور، جلد اول.
- [2] ابراهیم محمدی، ص، (۱۳۹۲): ارزیابی ژئومکانیکی سد خرسان سه و تونل انحراف آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، اصفهان.
- [3] اجل لوئیان، ر، دادخواه، ر، حسین میرزایی، ز، (۱۳۸۸)، کاربرد زمین‌شناسی مهندسی در تونل، فرهیختگان علوی،
- [4] اجل لوئیان، ر، دادخواه، ر، هاشمی، م، (۱۳۸۷)، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده تونل انحراف سد خرسان سه، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و چهارم، شماره ۱ (۳۷-۴۵).
- [5] طریق ازلی، ص، غفوری، م، لشکری پور، غ، (۱۳۸۷)، ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ‌های مسیر تونل انتقال سد درونگر جهت طراحی سیستم نگهدارنده، نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد اول، شماره ۲، تهران.
- [6] Ansarifar et al., (2015). Rock masses engineering classification of zarani dam site (south- east of iran), Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences ISSN, Vol.5 (S1), 3800-3804.
- [7] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- [8] Elsayed, A, (2011). Study of Rock-Lining Interaction for Circular Tunnels Using Finite Element Analysis. Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 5, No. 1, 50-64.
- [9] Grimstad, E. and Barton, N. (1993). Updating the Q-System for NMT. Proc. Int. Symp. On Sprayed Concrete - modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, (Eds Kompen, Opsahl and Berg). Oslo: Norwegian Concrete Assn.
- [10] Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Engg. Geol. Env. 57, 151-160.
- [11] Hedayati H, Lashkaripoor GR, Ghafoori M and Saba AA (2012). The analysis of engineering properties of the rock mass of Ghordanloo dam site, NE Iran. International Journal of Emergin Technology and Advanced Engineering 2(9) 17-27.