

## بررسی روش های پایدارسازی غار سنگ شکنان جهرم

حسین رهنما

دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز

### چکیده

غار سنگ شکنان دارای مساحت حدود ۲۰۰۰۰ مترمربع با طول تقریبی ۴۰۰ متر و عرض متغیر ۲۰ تا ۱۰۰ متر و با ارتفاع داخلی ۳/۵ متر می باشد. شکستگی ها، درزه ها و ترک های موجود در سقف و ستونهای داخل غار باعث تشکیل توده ها و بلوک های احتمالاً ناپایدار ریزشی شده است، هدف از این مقاله تعیین مطالعات ژئوتکنیکی، زمین شناسی و نقشه برداری مورد نیاز در کنترل پایداری غار است که به منظور گسترش جاذبه های توریستی منطقه مورد توجه قرار گرفته است. برنامه های اکتشافی ژئوتکنیک در غار، شامل حفاری ۲۰ گمانه به اعماق ۱۰ تا ۳۰ متر در سقف، ستون و کف می باشد. در این مقاله با بررسی مغزه های سنگی اخذ شده و انجام آزمایشهای مکانیک سنگ و بررسیهای میدانی نوع درزه ها و طبقه بندی سنگ و نقشه برداری مسطحاتی و توپوگرافی دقیق داخل، سقف، کف، محل ستونها و محل درزه های اصلی، مطالعات پایداری غار انجام گرفته است. بر اساس مطالعات انجام شده و همچنین بازدیدهای محلی مکرر و محاسبات به عمل آمده مناطق، پایدار، ناپایدار و دارای پتانسیل ناپایداری در سقف و ستونها مشخص گردیده و در نهایت با توجه به مشخصات توده سنگ نقاط دارای ریسک بالای ریزش و تخریب در سقف و ستونها و روشهای پایدار سازی اولیه آن بدست آمده است. با استفاده از روشهای تجربی موجود در رابطه با پایدارسازی حفریات زیرزمینی که شامل روش بنیوسکی و بارتن و همچنین مکانیسم سنگ بلوکی می باشد با در نظر گرفتن ویژگی های ساختگاه و مشخصات توده سنگ روش بهینه مقاوم سازی غار معرفی شده است.

**واژگان کلیدی:** مقاوم سازی، غار سنگ شکنان

### مقدمه

بررسیهای ژئوتکنیکی در ارزیابی پایداری و ناپایداری درمورد حفره های زیر زمینی، از جمله مهمترین پارامترهای مؤثر در طراحی این سازه ها است. مراحل و نحوه انجام این مطالعات در ارزیابی طراحی این سازه ها از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. روش های تجربی متعددی برای تحلیل پایداری حفره های زیرزمینی توسط محققین مختلف ارائه شده است [۹ و ۸]. به منظور استفاده از روشهای مذکور ضروری است مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی خاص برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگهای ساختگاه انجام پذیرد. همچنین شرایط عمومی و سازه ای ساختگاه مشخص و امکان استفاده از روشهای

جدول ۱- سابقه بکارگیری و ارائه روش Q

سال	شرح پیشرفت حاصل شده	نویسنده	شرح پژوهش انجام یافته
۱۹۷۴	معرفی سیستم Q	بارتن، لین، لاندی	طبقه بندی مهندسی سنگ
۱۹۷۷	تخمین سیستم نگهداری سنگ در دیوارهای تونل تخمین سیستم نگهدارنده موقت	بارتن، لین، لاندی	تخمین نیازهای نگهدارنده ها
۱۹۸۰	سیستم Q برای تخمین پارامترهای ورودی معیار گسیختگی هوک براون برای توده سنگی	هوک و براون	سنگ برداری فضاهای زیر زمینی
۱۹۹۰	سیستم نگهدارنده نواحی کوچک ضعیف سنگ	لاسیت	بکارگیری سیستم Q در تخمین ژئوتکنیک
۱۹۹۱	تخمین مقدار Q از سرعت های انعکاس لرزه ای	بارتن	طراحی ژئوتکنیکی
۱۹۹۲	کاربرد مستقیم Q در تونل سازی به روش نروژی	بارتن و همکاران	روش تونل سازی نروژی
۱۹۹۲	تخمین منجمد سازی به روش Q، به روز نمودن سیستم Q، با تصحیح مقادیر SRF، کاربرد روش های جدید نگهدارنده سنگ	بناوسکی	رابطه میان نگهدارنده های قابل مشاهده
۱۹۹۳	تخمین Q از سرعت های لرزه ای، تخمین مدول تغییر فرم توده های سنگی تصحیح نواحی باریک ضعیف شده	بارتن، جیم استات	به روز نمودن سیستم Q برای تونل سازی به روش نروژی
۱۹۹۵	مقدمه ای بر Q <sub>c</sub> و کاربرد آن در مقاومت فشاری	بارتن	اثر خواص درزه ها در مدل کردن درزه ها
۱۹۹۷	سیستم Q به کار رفته در هنگام سنگ برداری	لاسیت	کاربردهای عملی سیستم Q
۱۹۹۹	معرفی Q <sub>TBM</sub>	بارتن	تخمین عملکرد TBM در سنگ با استفاده از Q <sub>TBM</sub>
۲۰۰۱	سیستم Q به کار رفته در تخمین اثر تزریق	بارتن و همکاران	مقاوم سازی روش تزریق
۲۰۰۲	دیگر پیشرفت های سیستم Q	بارتن	برخی روابط مقادیر Q جدید برای کمک به خواص ساختگاه

تجربی در رده بندی مهندسی توده سنگ واحدهای ساختگاه باید مورد بررسی قرار گیرد.

### تاریخچه مطالعات گذشته

برای اینکه تحلیل پایداری با روش بهینه انجام پذیرد، باید علاوه بر رعایت جنبه های اقتصادی، حتی المقدور از نظر کاربردی ساده بوده و نتایج آن نیز با رعایت ضریب اطمینان کافی از درجه اعتبار مناسب برخوردار باشد. به طور کلی با توجه به گزارش محققین در صورت وجود شرایط معین و با ترکیبی از یافته های مشاهده شده به همراه تجربه و فضاوت مهندسی می توان توده سنگ را طبقه بندی نمود و بدین ترتیب ارزیابی کمی از شرایط توده سنگ و میزان نگهداری لازم را فراهم آورد [5]. هر طبقه بندی در هر پروژه، کوششی برای ارزیابی توده سنگ بوده و از این رو گزینش پارامترهایی که بر مبنای آن طبقه بندی انجام می گیرد از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. در طبقه بندی مهندسی توده سنگ روش های RMR و Q رواج بیشتری دارد، که توسط بارتن و بناوسکی مطالعات پایداری و ناپایداری در این موارد صورت گرفته است. همچنین تاریخچه روش Q در جدول (۱) مشاهده می گردد [6].

### روش تحقیق

غارسنگ شکنان شهر جهرم (شکل ۱) در استان فارس و جزو نادرترین معادن سنگی است که در دو قرن اخیر توسط اهالی منطقه با استفاده از ابزارهای ساده دستی جهت استخراج سنگ آهک دولومیتی و بهره برداری از آن به عنوان مصالح ساختمانی حفاری گردیده است.

برای بررسی پایداری سقف غارسنگ شکنان جهرم مطالعات و بررسی هایی شامل بررسیهای صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفته و مشخصات مغزه های اخذ شده از گمانه ها مانند RQD، RC و میزان خردشدگی،



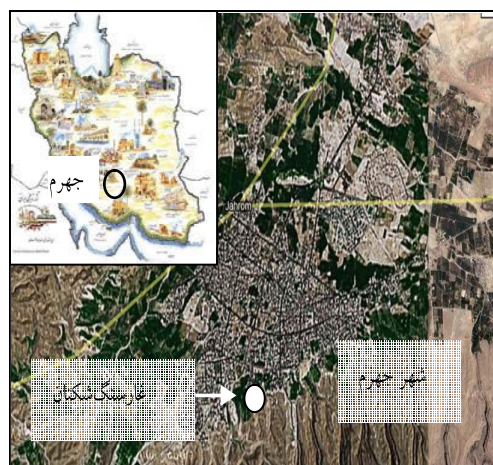
شکل ۱- نمایشی از داخل غار سنگ شکنان جهرم

جدول ۲- وزن مخصوص خشک توده سنگ در غار ( $\text{gr/cm}^3$ )

ناحیه	دامنه تغییرات	میانگین
A	۱/۷۱۳ تا ۲/۵۱۳	۲/۱۲۲
B	۱/۹۲ تا ۲/۷۴	۲/۳۳

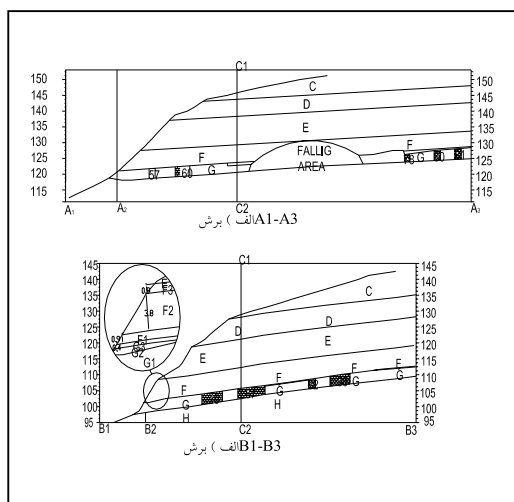
رنگ و مشخصات ظاهری دیگر سنگ در نمودارهای حفاری هر گمانه مشخص گردیده است. انجام نقشه‌برداری توپوگرافی و مسطحاتی کف، سقف، ستونهای غار، محل درزه‌ها و اندازه بلوکها، بر روی نقشه مشخص شده است. مطالعات زمین‌شناسی شامل برداشت ترکها، درزه‌ها، میزان شکستگی‌ها و خردشدگی‌های سنگ انجام گرفته است. بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها، آزمایشات چگالی، مقاومت فشاری تک‌محوری، سه‌محوری و مقاومت کششی به روش غیرمستقیم (برزیلین) و شاخص بار نقطه‌ای بدست‌آمده که در جدول (۲) و (۳) ارائه شده است. همچنین با توجه به پارامترهای مقاومتی، غار به دو ناحیه A, B تقسیم گردید که در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

آزمایش تعیین چگالی بر اساس روش استاندارد ISRM [9] و همچنین بدست آمدن پارامترهای مقاومتی با استفاده از آیین نام ASTM [8] به دست آمده، که به صورت خلاصه در جدول (۳) نشان داده شده است.



الف) موقعیت شهر جهرم و غار سنگ شکنان

امتداد سطوح این لایه‌بندی دارای شیب ۱۰ درجه و سمت شیب ۳۳۵ درجه و یا N65E است.



شکل ۳- پروفیل طولی غار (قرار گرفتن لایه های جدید بر روی لایه های قدیمی از پایین به بالا)

### طبقه‌بندی مهندسی سنگ در غار

نتایج آزمایش‌های XRD و XRF بر روی مغزه‌ها، جنس سنگ ساختگاه را آهک دولومیتی معرفی نمود که ترکیبات این سنگ در جدول (۵) نشان داده شده است. برای لیتولوژی‌های ملاحظه شده در گمانه پارامترهای مربوط به روش RMR بدست آمدند. که برای سنگ آهک دولومیتی جمع امتیازات پارامترهای مختلف در محدود غار در ناحیه A برابر ۵۳ و برای ناحیه B برابر ۶۲ بدست آمد، بنابراین سنگ در کلاس II, III طبقه‌بندی می‌شود. جدول مربوط به امتیاز RMR به همراه امتیازهای دخیل در محاسبه آن در جدول (۶) نشان داده شده است. همچنین جدول (۷) مربوط به توصیف رده‌های توده سنگ و مفاهیم علمی آن می‌باشد.

### سیستم درزه‌ها و لایه‌بندی طبقات غار

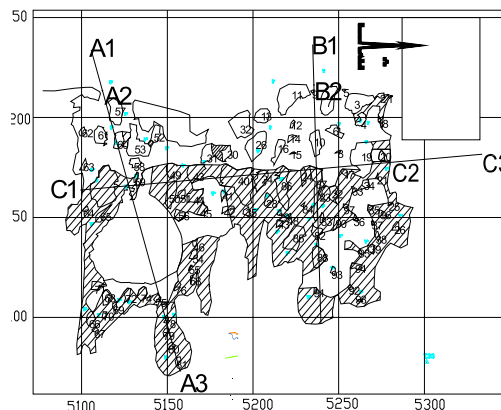
در غار سنگ شکنان جهرم لایه‌های سنگ آهک دولومیتی با شیب ملایمی نسبت به افق در محدوده غار گسترش یافته است. و در برداشته‌های اولیه دو دسته در جدول (۳) مشاهده می‌شود.

جدول ۳- خلاصه نتایج پارامترهای مقاومتی

نوع آزمایش	دامنه نتایج	میانگین نتایج	ناحیه A	ناحیه B
مقاومت تک محوری (MPa)	۲۸ - ۳۵/۶	۳۱/۸	۲۸	۳۲
مدول الاستیته ۵۰٪ (GPa)	۶/۸ - ۷/۸	۶/۹۴	۶/۹۸	۷/۰۸
نسبت پراسون	۰/۰۶ - ۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۱
مقاومت سه محوری	چسبندگی (Kg/cm <sup>2</sup> )	۹۳/۰۹	۵۵/۸۱	۱۲۰/۲۰
	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۲۶/۶ - ۵۱/۲۳	۳۸/۸۳	۵۴/۲
مقاومت کششی (Kg/cm <sup>2</sup> )	۳۰ - ۳۸	۳۴	۳۲	۳۶
شاخص بار نقطه‌ای (MPa)	۱/۴ - ۱/۱۲	۱/۲۷	۱/۱۲	۱/۴

جدول ۴- مشخصات درزه‌های غار

دسته درزه	شیب	امتداد
دسته درزه اول	۹۰	۱۷۰
دسته درزه دوم	۹۰	۸۰



شکل ۲- نقشه سقف غار سنگ شکنان جهرم (محل ستون ها به صورت منحنی‌های بسته و ناحیه A, B در شکل به صورت منطقه هاشور زده و غیر هاشور زده مشخص شده و مساحت بر حسب متر می‌باشد).

همچنین لایه‌های سقف و بام غار از جدید به قدیم به ترتیب به لایه‌های C, D, E, F, G, H تفکیک شده است این لایه‌ها در شکل (۳) دیده می‌شود.

جدول ۸- مقادیر محاسبه شده Q و عوامل مؤثر در آن

بخش	RQD	J <sub>n</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>a</sub>	J <sub>w</sub>	SRF	Q
ناحیه A	۵۵	۴	۲	۳	۱	۱	۹/۱۶
ناحیه B	۷۶	۴	۲	۳	۱	۱	۱۲/۶۷

### پایداری توده سنگی در زردار غار

با استفاده از روش اصلاح شده بنیواسکی و نمودار مربوطه [4] که در شکل (۵) نشان داده شده است، در رابطه با مقدار RMR و میزان فاصله دهانه‌ها و پایداری یا ناپایداری و مناطق دارای پتانسیل ناپایداری در مطالعات دفتری مشخص گردیدند، که بر روی شکل (۳) نشان داده شده است، سپس در محل غار و با توجه به مشخصات منطقه و بازدیدهای محلی؛ نقاط مختلف غار در سه گروه تحت عناوین دارای پتانسیل ناپایداری، ناپایدار و پایدار مشخص گردیدند. با در نظر گرفتن دو لایه‌ای بودن سقف غار، ارزیابی‌های صحرایی لایه اصلی کاملاً مطابق با مطالعات دفتری بود. سپس با کنترل کردن درزهای موجود در سقف غار، و مقادیر آن با نقشه‌های برداشت شده از مطالعات زمین شناسی محلهایی که ترکها در حال پیشروی بودند و همچنین ستونهایی که تحت تنش فشاری به مرحله گسیختگی رسیده بودن بر روی نقشه مشخص و به عنوان مناطق با ریسک ریزشی بالا معرفی گردیدند که فوریت مقاوم سازی آنها ضروری ارزیابی گردید. شکل (۲) نشان‌دهنده نتایج تلفیق ارزیابی دفتری و بازدید صحرایی می‌باشد. همچنین با استفاده از سیستم های طبقه بندی Q و RMR و روش سنگ بلوکی اطلاعات لازم برای طراحی پایدارسازی

جدول ۵- نمودار آزمایشات XRD (شناسایی نمونه‌ها)

نام ترکیب	فرمول شیمیایی	درصد ترکیب (%W/W)
Calcite, syn	CaCO <sub>3</sub>	40.1
Ankerite	Ca(Fe,Mg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	57.2
Quartz, syn	SiO <sub>2</sub>	0.8
Albite, disordered	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.9

جدول ۶- امتیاز RMR به همراه امتیازهای دخیل در آن

بخش	R (UCS)	R (RQD)	R (SD)	R (C)	R (GW)	R (OD)	RMR
ناحیه A	۴	۱۳	۳۰	۶	۱۰	۱۰	۵۳
ناحیه B	۴	۱۷	۳۰	۶	۱۰	۵	۶۲

در طبقه‌بندی به روش Q (سیستم NGI) پارامترهای مربوطه مد نظر قرار گرفتند و برای سنگ آهک دولومیتی عدد Q در ناحیه A برابر ۹/۱۶ و برای ناحیه B برابر ۱۲/۶۷ بدست آمد، لذا در رشته سنگ های متوسط و خوب طبقه‌بندی می‌شود. جدول (۸) مربوط به مقادیر محاسبه شده Q و عوامل مؤثر در محاسبه آن می‌باشد. برای بررسی همخوانی نتایج بدست آمده از دو روش، با اعمال اعداد فوق در رابطه پیشنهادی بنیواسکی سازگاری نسبی بر نتایج بدست آمده قابل مشاهده است.

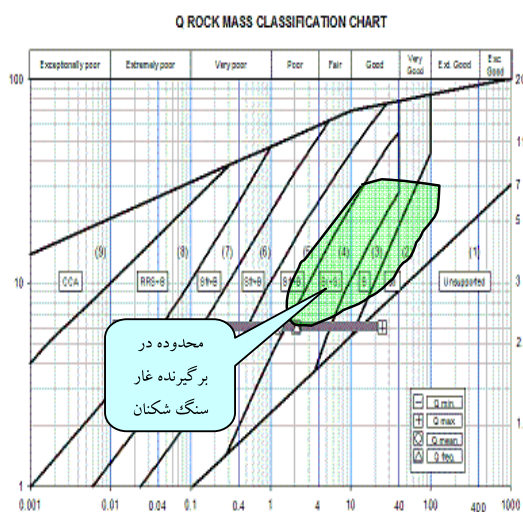
جدول ۷- توصیف داده‌های توده سنگی و مفاهیم علمی آن

توصیف رده و مفهوم علمی	ناحیه A	ناحیه B
امتیاز RMR	۵۳	۶۲
رده توده سنگی	III	II
شرح کیفی	قابل قبول	خوب
چسبندگی توده سنگ (کیلو پاسکال)	۲۰۰ تا ۳۰۰	۲۵۰ تا ۳۵۰
زاویه اصطکاک توده سنگ (درجه)	۲۵ تا ۳۵	۳۵ تا ۴۵

بلوکی استفاده گردید که ذیلاً به نتایج بدست آمده از هر روش اشاره می شود.

### روش RMR

با توجه به امتیاز بدست آمده از محاسبه RMR و مطابق جدول ارائه شده [۲] توسط بیناوسکی و با توجه به مشخصات غار سیستم نگهداری موقت مورد نیاز برای سقف غار، میله مهارهای با طول ۵/۴ متر و قطر ۲۰ میلیمتر و با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر به همراه ۵۰ میلیمتر شاتکریت مسلح با شبکه سیمی بدست می آید.



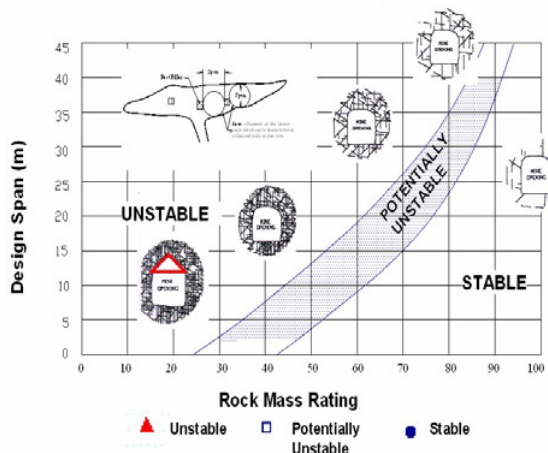
شکل ۵- نمودار روش اصلاح شده بارتن

### روش Q

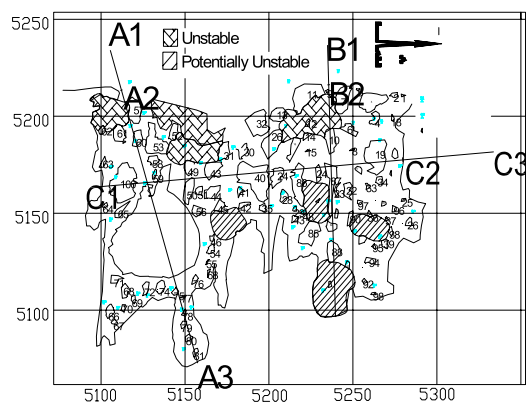
بر اساس مقدار بدست آمده Q در دو ناحیه A و B و مشخصات درزهای غار، به کمک روش بارتن و با استفاده از شکل (۵) سیستم نگهداری مورد نیاز به صورت میله مهارهای غیر کششی با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر و طول ۵/۴ متر و شاتکریت غیر مسلح به ضخامت ۲ تا ۳ سانتیمتر به دست می آید.

$$S = \sqrt{\frac{16}{6.8}} = 1.53$$

غار به کمک روش اصلاح شده بارتن و همکاران (۱۹۹۴) [6] فراهم گردید.



نمودار اصلاح شده بیناوسکی برای تعیین نواحی دارای ناپایداری



مناطق دارای پتانسیل ناپایداری، ناپایداری (هاشوردار) و پایداری (بقیه نقاط) و مسافت بر حسب متر است

شکل ۴- پلان محل سقف و ستونهای غار سنگ شکنان چهرم برای تعیین پتانسیل ناپایداری در غار براساس نمودار اصلاح شده بیناوسکی

### مقاوم سازی توده سنگی درزدار غار

به منظور طراحی سیستم نگهداری با استفاده از روش های تجربی به منظور نیل به اهداف تحقیق و با توجه به شرایط غار و از سه روش تجربی متداول طبقه بندی مهندسی توده سنگ یعنی Q, RMR و تئوری سنگ

### مکانیزم سنگ بلوکی

در این روش طراحی سیستم نگهداری سقف بر اساس بیشترین فشار وارده به سیستم نگهداری می‌باشد. این روش با توجه به بلوکی بودن سقف غار مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار فشار وارده به سقف در حالت‌های مختلف مورد بررسی ۱/۹۰ تن بر مترمکعب می‌باشد. با استفاده از روابط شماره (۱) و (۲) به ترتیب می‌توان تعداد و فاصله میله مهارها را بر اساس روش مکانیزم سنگ بلوکی محاسبه نمود. با توجه به اینکه از میله مهارهای فولادی با قطر ۲۲ میلیمتر با ظرفیت ۹ تن استفاده خواهد شد، و با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۲ فاصله میله مهارها در سقف برابر ۱/۵ متر خواهد بود.

$$N = \frac{W \cdot F_s}{c_b} \quad (1)$$

در رابطه فوق، N تعداد میله مهارها،  $F_s$  ضریب اطمینان، W وزن گوه ناپایدار و بر حسب تن،  $c_b$  ظرفیت باربری میله مهار می‌باشد و فاصله میل مهارها:

$$S = \sqrt{\frac{A}{N}} \quad (2)$$

در این رابطه، N تعداد میله مهارها، A سطح ایجاد شده گوه بر حسب متر مربع و S فاصله میله مهارها بر حسب متر می‌باشد. با در نظر گرفتن ابعاد بلوک برابر با ۴ x ۴ و ارتفاع ۰/۹ متر و وزن مخصوص ۲/۱۲۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب خواهیم داشت:

$$N = \frac{(4 \times 4 \times 0.9 \times 2.122) \times 2}{9} = 6.8$$

### طراحی تزریق در غار سنگ شکنان جهرم

هدف از انجام تزریق تحکیم لایه‌های سنگی برای جلوگیری از ریزش می‌باشد. تحکیم لایه‌های سنگی

توسط عملیات تزریق بایستی به گونه‌ای باشد که سقف غار آب را بند نموده و از ورود آبهای فرو رو جوی به درون شکافها و درزه‌ها جلوگیری نماید. رابطه وتیکه (۱۹۶۸) [10] جهت محاسبه فشار تزریق با توجه به ویژگیهای زمین‌شناسی منطقه طرح مناسب می‌باشد. طبق رابطه (۳) مقدار برد دوغاب برای تزریق در یک شکاف مسطح به شیبدار از درون یک گمانه قائم به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$R = \frac{r_0 + \frac{ap_i}{\tau_0}}{1 + \left(\frac{a}{r_0}\right)(\gamma_s / \gamma_w) \sin \alpha \cos \varphi} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\varphi$  = زاویه اصطکاک سنگ،  $\alpha$  = شیب زمین، a = نصف عرض شکاف (  $2a$  = عرض شکاف)،  $r_0$  = شعاع گمانه قائم،  $\gamma_s$  = وزن مخصوص دوغاب بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب،  $\tau_0$  = مقاومت آستانه حرکت دوغاب در شکاف ( $KP_a$ ) و  $p_i$  = فشار تزریق بر حسب کیلو پاسکال و  $R$  = مقدار برد دوغاب می‌باشد. با توجه به فرمول فوق مشاهده می‌شود که برای تزریق دوغاب بداخل شکافی به عرض  $\alpha = 0.2m$  و تا فاصله  $R = 5m$  فشار تزریق  $p_i = 800KP_a$  (۸ بار) ضروری است. بین فشار تزریق در قطعه تزریق و فشار مائومتر در سه گمانه، در حالتی که قطعه تزریق بالای سطح آب باشد. با در نظر گرفتن حداقل عمق گمانه ۱۶ متر، حداکثر عمق گمانه ۲۴ متر و وزن مخصوص دوغاب ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مقدار فشار تزریق برابر ۲۰ بار معادل ۲۰۰۰ کیلو پاسکال برای عملیات تزریق در محدوده طرح پیشنهاد می‌گردد. نتایج تزریق در جدول (۸) ارائه گردیده است.

قطر ۲۲ میلیمتر و به طول ۵/۴ متر به همراه تزریق کامل سقف می‌باشد

جدول ۹- نتایج بدست آمده از تزریق

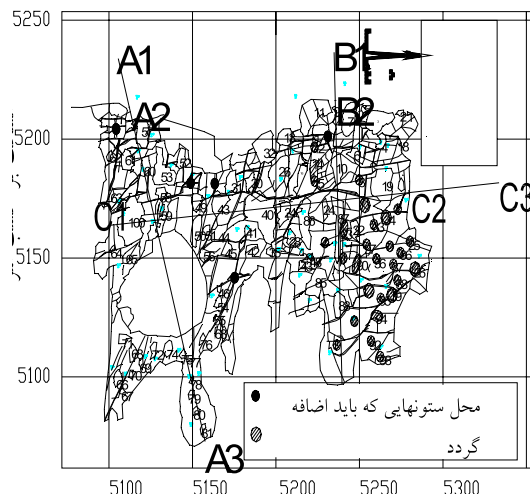
کمیت	$R$	$\varphi$	$\alpha$	$a$	$r_0$	$\tau_0$	$p_i$
مقدار	۵	۴۵	۱۰	۵	۰/۰۳	۰/۰۱۶	۸۰۰

### مقاوم‌سازی ستون‌های تحت تنش فشاری

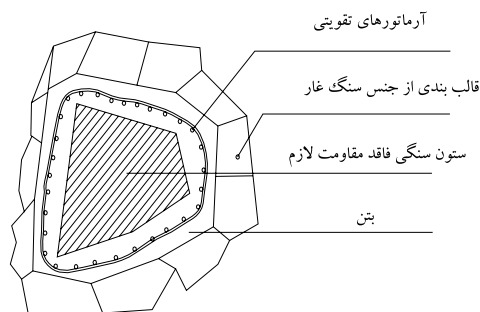
شکل (الف-۶) محل ستون‌های ناپایدار را در نقشه نشان می‌دهد. جهت ستون‌هایی که تحت تنش فشاری به مرحله شکست رسیده‌اند بایست اطراف ستون به وسیله آرماتوربندی محصور گردد و سپس جهت حفاظت نمای طبیعی غار با استفاده از قالب سنگی از نوع سنگ غار محصور گردد. در شکل (ب-۶) جزئیات اجرایی مقاوم‌سازی ستون‌های ضعیف به صورت کلی نشان داده شده‌است که برای هر ستون با توجه به سطح بارگذاری و میزان ضعف و نوع پارامترهای ژئومکانیکی سنگ طراحی خاص آن انجام لحاظ شده‌است.

### انتخاب گزینه برتر در طراحی سیستم نگهداری غار

همان گونه که در بندهای قبلی و در قسمت بررسی روش‌های مقاوم‌سازی توده‌های سنگی درزه دار غار سنگ شکنان ارائه گردید، غار در دو قسمت مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده آنها در جدول (۹) آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده فوق جهت طراحی سیستم نگهداری غار و با عنایت به رویکرد گردشگری و میراث فرهنگی استفاده از شاتکریت باعث از بین رفتن زیبایی خاص طبیعی غار خواهد شد، به همین دلیل جهت افزایش یکپارچگی سقف غار استفاده از تزریق پیشنهاد می‌گردد. بنابراین با توجه به شرایط ساختاری موجود، سیستم نگهداری مناسب برای تحکیم توده سنگ استفاده از میله مهارهای فولادی با فاصله ۱/۵ متر و با



الف) نقشه ستون‌های غار (شامل ستون‌های مقاوم و غیرمقاوم و ستون‌هایی که باید اضافه گردد و مسافت بر حسب متر است)



ب) مقطع ستون (جزئیات مقاوم‌سازی ستون‌های ضعیف غار)

شکل ۶- طرح مقاوم‌سازی ستون‌های غار سنگ‌شکنان

### نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام گرفته مقاوم‌سازی غار سنگ شکنان چهارم در دو مرحله ارائه شده است: مرحله اولیه شامل مناطق با ریسک ریزشی بالا و مرحله ثانویه شامل مناطق دارای پتانسیل ریزشی



سنگهای باقی مانده در غار، اطراف ستون بسته و ستونها با بتن و آرماتور تقویت گردد. با توجه به ویژگی‌های سه روش طراحی موقت و اجرایی بودن و بهینه بودن استفاده از میله مهارهای فولادی با فاصله ۱/۵ متر و با قطر ۲۲ میلیمتر و به طول ۵/۴ متر به همراه تزریق کامل پیشنهاد می‌گردد.

می‌باشد. در بعضی مناطق به دلیل ابعاد کم ستونها و میزان بار وارده بالا، ستون‌ها تحت تنش فشاری به مرحله شکست رسیده‌اند که می‌بایست ستون‌ها مقاوم‌سازی گردند. همچنین با توجه به دهنه‌های زیاد در بعضی مناطق و ریزشی بودن سقف در بعضی مکانها نیاز به احداث ستون می‌باشد. به دلیل نگهداشتن حالت طبیعی غار از نظر آثار فرهنگی باید سعی شود از تزریق جهت استحکام سقف استفاده گردد. برای مقاوم سازی ستونها از یک قالب سنگی از

جدول ۹- نتایج حاصل از روش RMR، Q و تئوری سنگ بلوکی

بخش	روش مورد استفاده	سیستم نگهداری
A	RMR	میله مهارهای بطول ۵/۴ متر و قطر ۲۰ میلیمتر و با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر به همراه ۵۰ میلیمتر شاتکریت مسلح با شبکه سیمی
	Q	میله مهارهای غیر کششی با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر و طول ۵/۴ متر و شاتکریت غیر مسلح به ضخامت ۲ تا ۳ سانتیمتر
	تئوری سنگ بلوکی	میله مهارهای فولادی با فاصله ۱/۵ متر با قطر ۲۲ میلیمتر و با طول ۵/۴ متر
B	RMR	میله مهارهای بطول ۵/۴ متر و قطر ۲۰ میلیمتر و با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر به همراه ۵۰ میلیمتر شاتکریت مسلح با شبکه سیمی
	Q	میله مهارهای غیر کششی با فاصله ۱/۵ تا ۲ متر و طول ۵/۴ متر و شاتکریت غیر مسلح به ضخامت ۲ تا ۳ سانتیمتر
	تئوری سنگ بلوکی	میله مهارهای فولادی با فاصله ۱/۵ متر با قطر ۲۲ میلیمتر و با طول ۵/۴ متر

## منابع

- طاهریان، ع، (۱۳۸۱). مهندسی سنگ کاربردی انتشارات دهخدا، ۲۷۰ ص.
- Andrea M. Oclahi and Rimas pakalnis, (2004). Update Span Design Carve for Weak Rock Masses.
- ASTM (1978). International Society for Rock Mechanics (ASTM) Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses,
- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Is (1978). (6) 319- 368.
- Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (1985). *Rock mechanics for underground mining*. London: Allen and Unwin.
- Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. Ed WILEY. New York, 252.
- Barton and Grimstad, (1994). the "Q-system" Geotechnical Desig Method was Updated in (1994).

7- Clegg, I.D. and Hanson, D.S., (1992). Ore Pass Design and Support at Falconbridge Limited. in Rock Support in Mining and Underground Construction, Proc. Int. Symp. on Rock Support, Sudbury, (eds P.K. Kaiser and D.R. Mc Creath), 219- 225 Rotterdam; Balkema.

8- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden. W. F. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock Rotterdam: Balkema, 352.

9- ISRM (1978). International Society for Rock Mechanics (ISRM) Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. (6), 319-368.

10- Milne, D., Hadjigeorgiou, J. and Pakalnis R., (1998). Rock Mass Characterization for Underground Hard Rock Mines, Tunneling and Underground Space Technology, Oct. vol. 13, no. 4, 383-391.