

طراحی ابعاد پایه‌های سنگی در معادن زیرزمینی به وسیله منحنی عکس العمل زمین

کامران گشتاسبی^۱، شبیر ارشدنژاد^۲

۱- دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

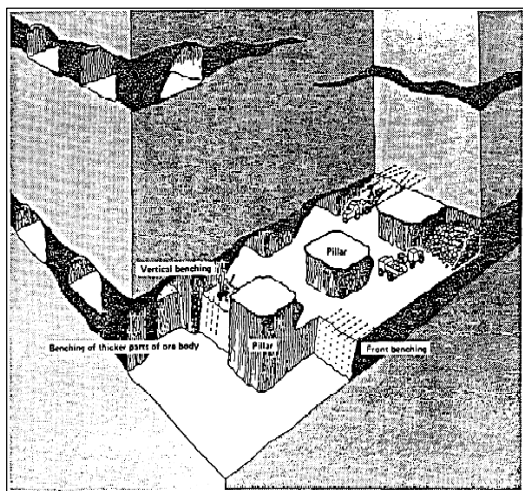
۲- دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

چکیده

روش‌های استخراج مواد معدنی بستگی زیادی به ساختار فیزیکی و هندسی ذخایر معدنی دارند. روش اتاق و پایه در میان روش‌های زیرزمینی دارای جایگاه ویژه‌ای است. علت آن، میزان بالای تولید، هزینه تمام شده نسبتاً پایین و سادگی اجرا می‌باشد. روش اتاق و پایه مجموعه‌ای از حفاریات متقاطع تونل در داخل لایه یا توده ماده معدنی است و برای پایداری این فضاها لازم است تا بخشی از ماده معدنی به صورت پایه به جای خود باقی بماند. روشن است که این بخش از ذخیره در زیر زمین باقی خواهد ماند که به آن افت ذخیره می‌گویند. تعیین ابعاد بهینه پایه‌های سنگی باعث به حداقل رسیدن افت ذخیره می‌گردد. بنابراین تاکنون روش‌های تجربی متعددی برای طراحی این پایه‌ها ارائه شده‌اند که هر کدام از این روش‌ها بر مبنای نتایج تعدادی تجارب خاص و محدود ارائه و توسعه داده شده‌اند. پس هر یک از آنها محدودیت‌های ویژه‌ای دارند که مانع از کاربرد فراگیر آنها در سایر معادن و شرایط مختلف می‌شود. در این مقاله یک روش جدید برای طراحی بهینه پایه‌های سنگی، به منظور کاهش محدودیت‌های فوق و قابل تعمیم بودن آن در شرایط گوناگون ارائه شده است. در این روش می‌توان کلیه خصوصیات هندسی و ژئومکانیکی توده سنگ را برای طراحی بهینه پایه‌ها در نظر گرفت. مبنای مورد استفاده در روش پیشنهادی، استفاده از منحنی عکس‌العمل زمین برای طراحی پایه سنگی است. برای تامین داده‌های اولیه جهت ترسیم منحنی، از مدلسازی عددی استفاده گردید. به این منظور ۱۸ مدل در اعماق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری با نسبت‌های گوناگون عرض به ارتفاع پایه ساخته شد. هر یک از منحنی‌های حاصله در قسمت خطی خود که نشان‌دهنده رفتار الاستیک توده سنگ می‌باشد، نسبت حداقل عرض به ارتفاع پایه مطلوب را تعیین کردند. جهت تعیین اعتبار روش پیشنهادی، یک مطالعه موردی از یک معدن نمک زیرزمینی (معدن نمک سلطان آباد) انتخاب گردید. نسبت عرض به ارتفاع پایه‌های اجرا شده پایدار در معدن سلطان آباد از ۱/۳ تا ۱/۶ می‌باشد. نتایج بدست آمده از منحنی‌های عکس‌العمل مقدار حداقل ۱/۳۷۵ را نشان می‌دهد که حاکی از تطابق مطلوب نتایج روش پیشنهادی با واقعیت است.

واژگان کلیدی: معدن زیرزمینی، پایه سنگی، منحنی عکس‌العمل زمین، مدلسازی عددی.

قرار گرفته است. ذخیره متشکل از چندین گنبد نمکی با ارتفاعی بین ۳۰ تا ۵۰ متر و با روباره اندکی از رس می‌باشد. هندسه دهانه تونل‌های معدن سلطان آباد عبارت است از، ۸ تا ۱۲ متر عرض، ۵ تا ۶ متر ارتفاع با سقف قوسی و پایه‌های سنگی با سطح مقطع مربع و به ابعاد ۵ در ۵ تا ۶ در ۶ متر.



شکل ۱- نمایی از یک معدن اتاق و پایه و ستون های سنگی

(Pillars) [۱]

روش تحقیق

یکی از مسائلی که ذهن یک مهندس معدن را در چنین شرایطی به خود مشغول می‌کند، کاهش ابعاد پایه‌ها برای بهره‌برداری بیشتر از ماده معدنی با توجه به تامین ایمنی لازم برای حفظ پایداری معدن می‌باشد. بنابراین به منظور طراحی ابعاد پایه‌ها تحقیقات مفصلی در طول ۱۰۰ سال گذشته انجام شده است. ولی غالب آنها بر روی ذخایر زغال سنگ و بر اساس بررسی‌های موردی بوده است. تعدادی از این روابط در زیر آورده شده‌اند. نکته مهمی که باید به آن توجه شود، محدودیت اعتبار هر یک از آنها بر مبنای داده‌های

تداوم استخراج مواد معدنی در روش‌های زیرزمینی استخراج، حجم فضای حفر شده و نواحی تضعیف شده در توده سنگ را گسترش می‌دهد. این امر خطر تخریب برخی از سازه‌های زیرزمینی اصلی موجود در شبکه معدن، نظیر تونل‌های باربری، تهویه و پذیرگاه‌ها را به دنبال دارد. بنابراین برای جلوگیری از آن، لازم است تا بخشی از مواد معدنی مجاور با تونل‌ها و یا چاه‌های اصلی، استخراج نشده و به جای خود باقی بمانند. این نواحی استخراج نشده به صورت ستون‌ها و یا دیوارهای سنگی با ابعاد گوناگون در تمام روش‌های استخراج زیرزمینی وجود دارند که به آنها پایه‌های سنگی (Pillar) می‌گویند. پایه‌های مذکور حتی می‌توانند به عنوان جداکننده بین دو تونل راه، راه‌آهن و یا مترو مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین طراحی بهینه ابعاد آنها برای تامین ایمنی سازه‌ها و کاهش حجم عملیات حفاری بسیار با اهمیت است.

در میان انواع روش‌های استخراج زیرزمینی، روش اتاق و پایه بیشترین بهره را از پایه‌های سنگی می‌برد. در این روش تعدادی تونل متقاطع به صورت منظم و گاهی نامنظم (روش کارگاه و پایه) بنابر خصوصیات هندسی و نحوه توزیع عیار در کانسار حفر می‌شوند. حد فاصل بین این تونل‌ها همان ماده معدنی استخراج نشده یا ستون سنگی است. شکل ۱ نمایی سه بعدی از یک معدن اتاق و پایه را نشان می‌دهد. ابعاد این پایه‌ها بستگی به شدت تنش‌های موثر در منطقه، میزان استحکام پایه و عرض تونل‌های مجاور آن دارد.

مطالعه موردی انتخاب شده در این مقاله معدن نمکی زیرزمینی به نام سلطان آباد است. این معدن در فاصله ۸۰ کیلومتری شهر مشهد در مسیر تربت حیدریه

و σ_c مقاومت فشاری سنگ بکر (نمونه سالم) و σ_p مقاومت فشاری پایه سنگی می‌باشند.

در این مقاله یک روش جدید بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری با روش عددی اجزا محدود، بر مبنای بررسی چگونگی عکس‌العمل توده سنگی در مقابل تغییرات نسبت عرض به ارتفاع پایه (W/h) ارائه می‌شود. برای اعتبار بخشی به روش پیشنهادی یکی از معادن نمک زیرزمینی در استان خراسان به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. مشخصات هندسی معدن شامل ابعاد تونل‌ها و پایه‌ها و همچنین خصوصیات ژئومکانیکی معدن نظیر مقادیر سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ RMR و Q به دقت تعیین شدند. در نهایت نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی با وضعیت موجود معدن مقایسه گردید.

بحث

بر مبنای نمونه برداری‌های انجام شده در معدن نمک سلطان آباد، مقاومت فشاری تک محوری متوسط سنگ بکر برابر (MPa) ۳۸/۶ برآورد گردید. با توجه به سایر خصوصیات اندازه‌گیری شده توده سنگ در تونل‌ها و اتاق‌های حفر شده در معدن، امتیازهای دو رده‌بندی Q و RMR_{89} و پارامترهای معیار شکست هوک و براون، موهر و کولمب به شرح جدول ۱ بدست آمدند. لازم به ذکر است که پارامترهای مذکور با استفاده از نرم افزار *Rock Data* برآورد شده اند.

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و امتیازهای Q و RMR_{89} برای معدن نمک سلطان آباد

RMR_{89}	Q	GSI	RQD	E_m (MPa)	C (MPa)	ϕ
63.24	33.26	58.24	99.79	7487.8	0.31	36.62
ν	$\delta(^{\circ})$	m_i	m_b	S	a	σ_{cm} (MPa)
0.26	6.23	13.75	1.882	0.0038	0.5032	2.337

آماری مورد استناد آنهاست. بنابراین لزوم ارائه رابطه یا روش جدیدی که دارای حداقل محدودیت‌های فیزیکی و ریاضی باشد، کاملاً احساس می‌شود.

الف- محاسبه مقاومت متوسط پایه برای پایه‌های زغال سنگی:

گرین والد و همکاران، ۱۹۳۹ [۲] و [۱۶]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-0.85} w^{0.50} \quad (1)$$

گدی، ۱۹۵۶، هالند، ۱۹۶۴ [۱]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-1.0} w^{0.50} \quad (2)$$

سالامون و مونرو، ۱۹۶۷ [۱]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-0.66} w^{0.46} \quad (3)$$

بنيواسکی، ۱۹۶۷ [۱]:

$$\sigma_p = \sigma_c \left(0.64 + 0.36 \left(\frac{w}{h} \right) \right) \quad (4)$$

بنيواسکی، ۱۹۶۸ [۲] و [۱۷]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-0.55} w^{0.16} \quad (5)$$

هالند، ۱۹۷۳ [۱]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-0.50} w^{0.50} \quad (6)$$

هوک و براون، ۱۹۸۰ [۲]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-0.70} w^{0.40} \quad (7)$$

مدن، ۱۹۸۸ [۱]:

$$\sigma_p = \sigma_c \frac{5^{0.5933}}{V^{0.0667}} \left[\frac{0.5933}{2.5} \left[\left(\frac{w}{5h} \right)^{2.5} - 1 \right] + 1 \right] \quad (8)$$

ب- محاسبه مقاومت متوسط پایه برای پایه‌های غیر زغال سنگی:

اوبرت و دوال، ۱۹۶۷ [۳]:

$$\sigma_p = \sigma_c [0.778 + 0.222(w/h)] \quad (9)$$

هدلی و گرانت، ۱۹۷۲ [۴] و [۵]:

$$\sigma_p = \sigma_c h^{-0.75} w^{0.50} \quad (10)$$

در تمام این روابط w عرض پایه، h ارتفاع پایه یا w/h به عنوان نسبت عرض به ارتفاع پایه، V حجم پایه

یکی از پارامترهایی که در مدلسازی عددی توده‌های سنگی در شرایط الاستو پلاستیک، مورد استفاده قرار می‌گیرد زاویه اتساع توده سنگ است. زاویه اتساع، زاویه بین خط حاصل از کرنش محوری (محور Xها) در مقابل کرنش حجمی (محور Yها) در مرحله تغییر شکل پلاستیک است. برای تعیین زاویه اتساع توده سنگ می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (ارشدنژاد و همکاران، ۱۳۸۵) [۱۰].

$$\begin{cases} \delta = -0.28\phi\left(\frac{GSI}{100}\right)^2 + 0.85\phi\left(\frac{GSI}{100}\right) - 0.23\phi & 30 < GSI < 75 \\ \delta = 0 & GSI \leq 30 \end{cases} \quad (14)$$

که در آن δ زاویه اتساع توده سنگ، ϕ زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ و GSI شاخص مقاومت زمین‌شناختی است. بنابر این مدل (رابطه ۱۱)، برای $GSI = 58/24$ و $\phi = 36/62^\circ$ ، δ برابر خواهد شد با $6/23^\circ$.

برای برآورد مقدار RMR از مقدار Q، تاکنون تلاش‌های زیادی شده است. در اینجا ابتدا مقادیر RMR و Q به طور مستقل تعیین و سپس بر اساس روابط پیشنهادی محققین کنترل شدند تا مشخص شود که کدام رابطه تناسب نزدیکتری با واقعیت در این مطالعه موردی دارد. روابط مورد بحث به ترتیب اولویت زمانی به شرح جدول ۲ هستند.

جدول ۲- برآورد مقدار RMR از مقدار Q براساس روابط تجربی [۹]

نام محققین و سال ارائه	فرمول های تجربی	برای $Q=33.26$
Rutledge, Preston, 1978	$RMR = 5.9 \ln Q + 43$	63.68
Moreno, 1980	$RMR = 5.4 \ln Q + 55.2$	74.12
Cameron, Clarke, Budavari, 1981	$RMR = 5 \ln Q + 60.8$	78.32
Abad, et al., 1984	$RMR = 10.5 \ln Q + 41.8$	78.60
Bieniawski, 1984	$RMR = 9 \ln Q + 44$	75.54
Asgari, 2001	$RMR = 4.2 \ln Q + 50.6$	65.32

برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ از رابطه (Trunk U. & Horisch, K. 1989) [۶] استفاده گردید:

$$\phi = \frac{RMR}{2} + 5 \quad (11)$$

برای تعیین RQD در این معدن از رابطه (Priest, S. D., Hudson, J. A. 1976) [۷] استفاده شده است.

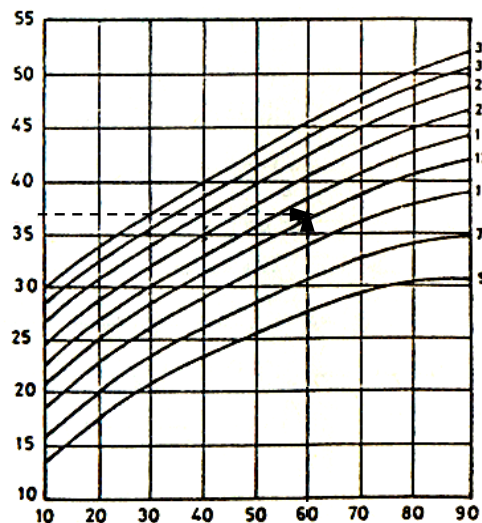
$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (12)$$

که در آن λ معکوس متوسط فاصله درزه‌ها می‌باشد. جهت تعیین مدول الاستیسیته توده سنگ از رابطه زیر (Hoek, et al, 2002) [۸] استفاده شده است.

$$\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \Rightarrow E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{[(GSI-10)/40]} \quad (13)$$

که در آن E_m مدول الاستیسیته توده سنگ (GPa)، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناختی، σ_{ci} مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)، D فاکتور اغتشاش محیط ناشی از آتشیاری (۰-۱). این فاکتور برای معدن نمک سلطان آباد به طور متوسط برابر ۰/۵ اختیار گردید.

m_i ثابت مربوط به ماده سنگ در معیار شکست هوک و براون است. این ثابت با استفاده از GSI و ϕ بر اساس نمودار، شکل ۲ [۹] برآورد می‌گردد. نقطه مورد نظر با علامت + روی نمودار مشخص شده است.



شکل ۲- نمودار تخمین m_i بر اساس GSI و ϕ [۹]

اگر $1,000 < N < 10,000$ ، حفر فوق العاده دشوار یا حفاری با آتشکاری
اگر $10,000 < N$ ، آتشکاری
بنابراین مقدار شاخص N برای معدن نمک سلطان آباد عبارت است از:

$$N = 38.6 \frac{99.79}{9} (1) \frac{3}{1} = 1283.96 \approx 1284$$

این مقدار نشانگر دشواری بسیار زیاد در حفر مکانیکی توده سنگ (مانند استفاده از لودر و بولدوزر) بوده و استفاده از تکنیک حفاری و انفجار را الزامی می‌کند. این نتیجه با توجه به روش اجرایی در معدن نمک سلطان‌آباد قابل استناد است. زیرا در این معدن از حفاری و انفجار البته به صورت سنتی برای استخراج استفاده می‌شود.

انتخاب دهانه تونل

انتخاب طول دهانه تونل‌ها در روش استخراج اتاق و پایه از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا طول دهانه تونل تعیین‌کننده میزان تنش موثر اعمالی به پایه‌های معدنی، ناشی از تمرکز تنش در آنهاست. بنابراین برای تعیین طول دهانه تونل‌ها از روش ارائه شده توسط بارتون و همکارانش در سال ۱۹۷۴، با نام تخمین بعد معادل برای تونل‌های بدون نگهدارنده استفاده می‌گردد. بعد معادل با شرط زیر (زمین غیر لهیده) تعیین می‌شود.

$$H < 350Q^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

$$D_e = 2Q^{0.4} \quad (17)$$

$$D_e = \frac{B}{ESR} \quad (18)$$

که در آنها H عمق تونل یا ارتفاع روباره (m) ، Q رده‌بندی کیفیت توده سنگ بارتون، D_e بعد معادل، B

با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که روابط ردیف ۱ و ۶ یعنی روابط راتلج و پرستون^۱ در سال ۱۹۷۸ (۶۳/۶۸) و عسگری در سال ۱۳۸۰ (۶۵/۳۲) نزدیکترین مقادیر به RMR برآورد شده در این مطالعه موردی (۶۳/۲۴) را تخمین می‌زنند.

قابلیت حفاری در توده سنگ

به منظور تعیین قابلیت حفاری در توده سنگی، یک روش تجربی با استفاده از برخی پارامترهای سیستم امتیازدهی Q ، توسط کریستن (Kirsten, 1982) [۶] به شرح زیر ارائه شده است:

$$N = M_S \frac{RQD}{J_n} J_S \frac{J_r}{J_a} \quad (15)$$

N شاخص قابلیت حفر در توده سنگی، M_S مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (MPa)، J_n و J_a پارامترهای سیستم Q و به ترتیب، امتیاز تعداد دسته درزه‌ها و امتیاز زبری درزه‌ها، J_S امتیاز ساختار نسبی زمین، که بیانگر جهت یافتگی بلوک‌های منفرد در راستای خط حفر در سنگ است. برای سنگ بکر $J_S = 1.0$ در نظر گرفته می‌شود.

طبقه‌بندی N برای تعیین نوع عملیات حفاری و پیشروی در توده سنگ به شرح زیر است:

اگر $1 < N < 10$ ، حفر آسان (گود برداری و شیار اندازی)

اگر $10 < N < 100$ ، حفر دشوار (شیار اندازی ((Ripping))

اگر $100 < N < 1,000$ ، حفر بسیار دشوار (شیار اندازی ((Ripping))

¹ - Ratlej & Perston

مقدار آستانه‌ای $J_a=1$ بوده و همچنین شرایط موجود در منطقه پایداری تونل‌ها را اثبات می‌کند، می‌توان مقدار J_a را در شرایط عمومی پذیرفت. شکل ۳ نشان می‌دهد که تونل‌های مورد بحث در معدن، بدون نگهداری پایدارند. نقطه مورد نظر بر مبنای D_e و Q و با علامت * در روی نمودار مشخص شده است.

منحنی عکس‌العمل و طراحی پایه‌های سنگی

منحنی عکس‌العمل زمین یا همان منحنی مشخصه، کمک می‌کند تا رفتار توده سنگ ناشی از حفر تونل تحلیل شود. در این روش مادامی که فشار سیستم نگهداری به جداره تونل از تنش برجا تا صفر کاهش می‌یابد، جابجایی‌های حاصله، مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدیهی است که هرچه فشار سیستم نگهداری- یا همان ظرفیت باربری سیستم نگهداری- کاهش می‌یابد، جابجایی افزایش می‌یابد. با بررسی منحنی حاصله که بخشی از قسمت ابتدایی آن خطی بوده (رفتار الاستیک توده‌سنگ) و بخش دیگر غیرخطی است (رفتار پلاستیک توده سنگ) می‌توان نسبت به انتخاب نوع و زمان نصب سیستم نگهداری تصمیم گرفت. شکل ۴ یک منحنی عکس‌العمل را نشان می‌دهد. هدف از تالیف این مقاله، ارائه روشی جدید بر مبنای تئوری منحنی عکس‌العمل زمین ولی با کاربردی جدید، به منظور طراحی پایه‌های سنگی است. همان‌طور که بحث شد در روش استخراج اتاق و پایه سعی بر این است که از سیستم نگهداری مصنوعی استفاده نشود و از خود توده سنگ یا همان ستون‌های سنگی برای نگهداری فضاهای زیرزمینی استفاده گردد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که به جای فشار نگهداری در محور قائم نمودار شکل ۴، از نسبت عرض به ارتفاع پایه (W/h) استفاده شود.

طول دهانه تونل (m)، ESR نسبت نگهداری حفاری می‌باشند. شرط غیر لهیده بودن زمین به ترتیب روبرو تامین می‌شود:

$$50 < [350(33.26)^{(1/3)}] = 1125.6$$

بعد معادل و در نهایت طول دهانه تونل بدون نگهداری به شرح زیر محاسبه می‌گردد. نسبت نگهداری حفاری برای تونل‌های معدنی دائمی بنابر پیشنهاد بارتون برابر $1/6$ می‌باشد.

$$B = 2Q^{0.4}.ESR = 2(33.26)^{(0.4)} \times 1.6 = 13 (m)$$

بنابراین تونل‌ها در این معدن می‌توانند دارای دهانه‌ای به طول ۱۳ متر باشند. این در حالی است که طول دهانه تونل‌های اجرا شده در معدن بین ۸ تا ۱۱ متر متغیر بوده و به طور متوسط ۱۰ متر می‌باشد. لازم به ذکر است که این ابعاد به تجربه و به صورت سعی و خطا توسط معدن کاران سنتی در منطقه در طی دهه‌ها سال بدست آمده است. اما علاوه بر محاسبات بالا شرایط عمومی و نیازمندی‌های مشروط دیگری نیز برای ایجاد تونل‌های بدون نگهداری لازم است. شرایط عمومی [۹] آن عبارت است از:

$$J_n < 9, J_r > 1, J_a < 1, J_w = 1, SRF < 2.5$$

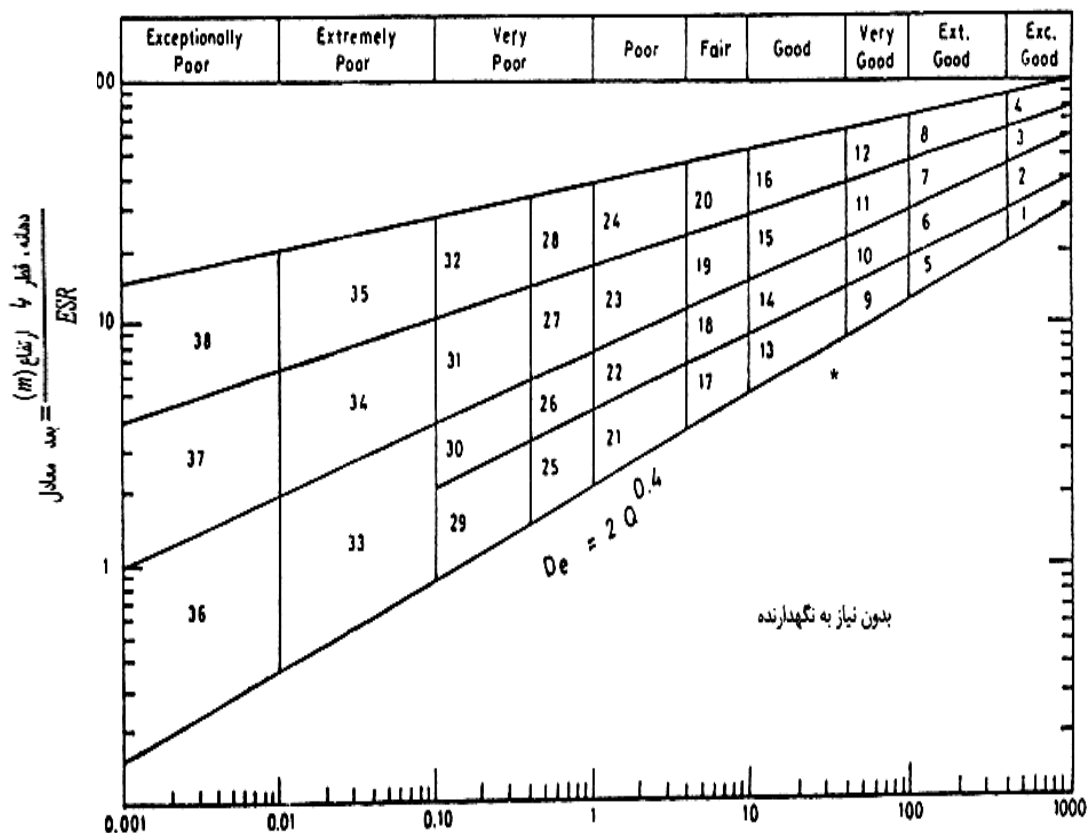
فاکتورهای مورد بحث در بالا، در منطقه عبارتند از:

$$J_n = 9, J_r = 3, J_a = 1, J_w = 1, SRF = 1$$

به غیر از پارامترهای J_n, J_a بقیه شرایط عمومی تامین شده است. پس این دو پارامتر باید در نیازمندی‌های مشروط [۹] کنترل شوند. اما در میان نیازمندی‌های مشروط تنها یک شرط لازم است تا کنترل شود:

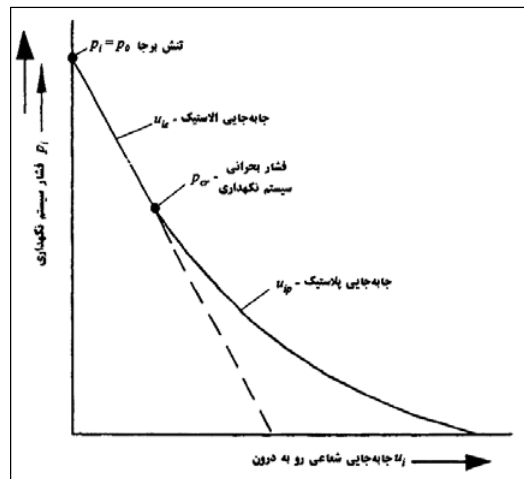
$$\text{اگر } J_n = 9 \text{ باشد، احتیاج به } J_r > 1.5 \text{ و } RQD > 90$$

می‌باشد [۹]. از آنجا که $J_r = 3$ و $RQD = 99.79$ ، این شرط تامین شده است. در مورد J_a نیز چون دارای



شکل ۳- طبقه بندی تونل ها برای تعیین نوع نگهداری بر مبنای Q و D_e [9]

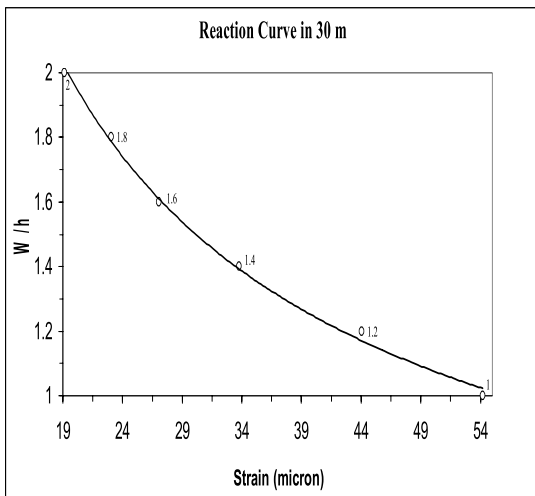
جانبی ایجاد شده تقسیم بر پهنای پایه به عنوان کرنش پایه (کرنش عرضی پایه) در نظر گرفته شد. برای تشریح روش پیشنهادی، از مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار Phase2 استفاده گردید. علت این انتخاب برای مدلسازی عددی بهره گیری از روش قدرتمند اجزای محدود (Finite Element) و همچنین مقبولیت این نرم افزار در جمع متخصصین مکانیک سنگ و سهولت در مدلسازی عددی می باشد. البته نرم افزارهای توانای دیگری نظیر FLAC (با روش عددی تفاضل محدود) و Plaxis (با روش عددی اجزا محدود) و UDEC (با روش عددی اجزای مجزا) نیز برای مدلسازی در شرایط مختلف توده سنگ (پیوسته و ناپیوسته) وجود دارند. لطفا توجه



شکل ۴- منحنی عکس العمل و نوع رفتار توده سنگ بر اساس ظرفیت باربری سیستم نگهداری [12]

با تغییر W/h های گوناگون، تغییر شکل پایه های سنگی در مقادیر مختلف و در حوضه رفتار الاستیک و یا پلاستیک ایجاد می شود. بنابراین تغییر شکل

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ منحنی‌های عکس‌العمل برای اعماق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری را نشان می‌دهند. محور افقی این نمودارها نشانگر کرنش جانبی پایه سنگی- حداکثر جابجایی جانبی تقسیم بر عرض پایه- بر حسب میکرون و محور قائم نشانگر نسبت عرض به ارتفاع پایه‌ها می‌باشد.



شکل ۵- منحنی عکس‌العمل زمین برای عمق ۳۰ متری با نسبت‌های مختلف W/h

جدول ۳- فهرست مقادیر کرنش پایه‌ها با نسبت W/h و اعماق گوناگون، با استفاده از مدل سازی عددی

Up (کرنش پایه‌های سنگی)، (میکرون)	W/h (نسبت عرض به ارتفاع پایه‌ها)	H (عمق) (m)
۵۴.۱۸	۱.۰	۳۰
۴۴.۰۵	۱.۲	۳۰
۳۳.۷۹	۱.۴	۳۰
۲۷.۰۶	۱.۶	۳۰
۲۳.۰۳	۱.۸	۳۰
۱۹.۱۴	۲.۰	۳۰
۶۰.۳۸	۱.۰	۴۰
۴۹.۳۱	۱.۲	۴۰
۳۷	۱.۴	۴۰

شود که هدف‌ازنگارش این مقاله پیشنهاد کاربردی‌جدید از منحنی‌عکس‌العمل زمین بوده و ازمدلسازی عددی فقط به‌عنوان یک‌ابزار ودر جهت تامین‌داده‌های موردنیاز در ترسیم‌منحنی استفاده شده است. بنابراین در مورد نرم‌افزار وقابلیت‌های آن در مدلسازی بحث نمی‌شود.

اعماق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری جهت تطابق مدلها با واقعیت، برای مدلسازی معدن نمک سلطان‌آباد انتخاب گردید و عرض پایه‌ها در مدلسازی از ۵ تا ۱۰ متر و یک متر به یک متر متغیر در نظر گرفته شد. بنابراین ۱۸ مدل با نسبت عرض به ارتفاع (W/h) ۱ تا ۲ شبیه‌سازی گردید که نتایج عددی حاصل از این مدل‌ها در جدول (۳ و ۴) ارائه شده است. علت انتخاب بازه ۱ تا ۲ برای W/h آن است که ارتفاع تونل‌ها در معدن ثابت و تقریباً برابر ۵ متر بوده و با افزایش عرض پایه سنگی تا $1/4$ برابر ارتفاع آن، رفتار الاستیک نمایان گردید. علاوه بر آن نسبت عرض به ارتفاع پایه در این معدن بین ۱ تا $1/6$ اجرا شده است. بنابراین نیازی به مدلسازی با W/h بیش از ۲ در این معدن احساس نشد.

لازم به ذکر است که برای تعیین نسبت تنش افقی برجا به تنش قائم برجا (k) از رابطه شئوری [۱۳] استفاده شده است. علت این انتخاب عدم دسترسی به داده‌های حاصل از آزمون‌های برجا در این معدن می‌باشد.

$$k = 0.25 + 7E_m \left[0.001 + \frac{1}{H} \right] \quad (19)$$

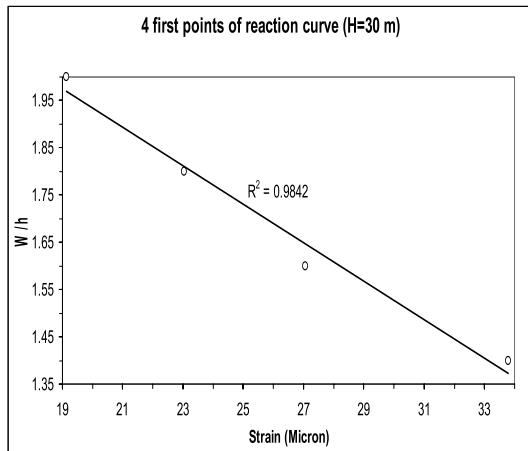
که در آن k نسبت تنش افقی به قائم، E_m مدول الاستیسیته توده سنگ در جهت افقی (GPa)، H عمق سازه (m).

جدول ۴- فهرست مقادیر کرنش پایه ها با نسبت W/h و

اعماق گوناگون، با استفاده از مدل سازی عددی

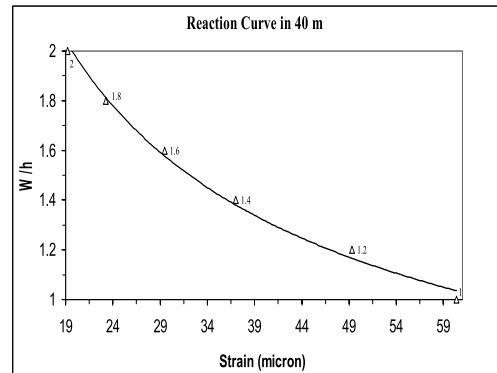
Up (کرنش پایه های سنگی)، (میکرون)	W/h (نسبت عرض به ارتفاع پایه ها)	H (عمق) (m)
۲۹.۴۷	۱.۶	۴۰
۲۳.۲۸	۱.۸	۴۰
۱۹.۲	۲.۰	۴۰
۶۸.۲۱	۱.۰	۵۰
۵۲.۴	۱.۲	۵۰
۳۸.۴	۱.۴	۵۰
۳۰.۴۳	۱.۶	۵۰
۲۳.۲	۱.۸	۵۰
۱۹	۲.۰	۵۰

اگر به منحنی شکل های ۵ تا ۷ دقت شود، مشخص می شود که می توان ۴ نقطه اول را با دقت مطلوبی با یک خط راست برازش داد که این امر بیانگر خطی بودن رفتار پایه های سنگی مورد بحث در چهار نقطه اول است. بنابراین محدوده رفتار الاستیک پایه های سنگی را نشان می دهند. نقطه چهارم یعنی آستانه رفتار الاستیک و پلاستیک توده سنگ نقطه مناسبی برای طراحی و انتخاب نسبت عرض به ارتفاع پایه است. شکل های ۸، ۹ و ۱۰ خطی بودن رفتار توده سنگ در این چهار نقطه را با ضریب همبستگی بالای ۰/۹۸ اثبات می کنند.



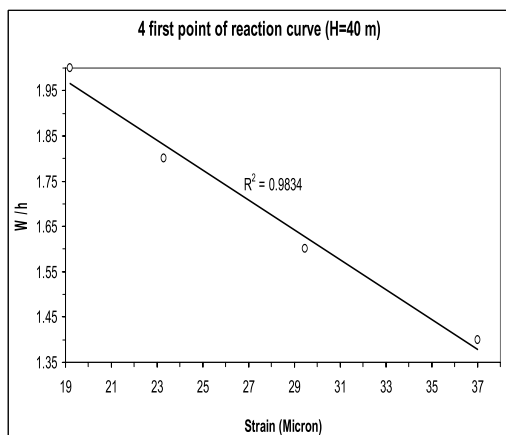
شکل ۸- چهار نقطه اول منحنی عکس العمل

زمین در عمق ۳۰ متری



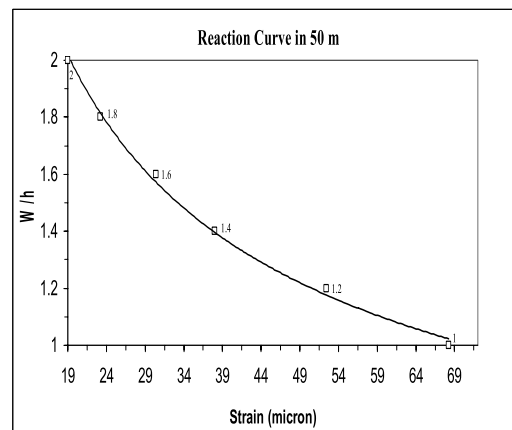
شکل ۶- منحنی عکس العمل زمین برای عمق ۴۰ متری با

نسبت های W/h مختلف



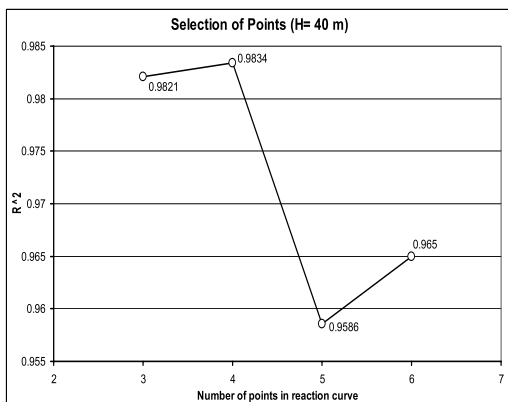
شکل ۹- چهار نقطه اول منحنی عکس العمل زمین

در عمق ۴۰ متری

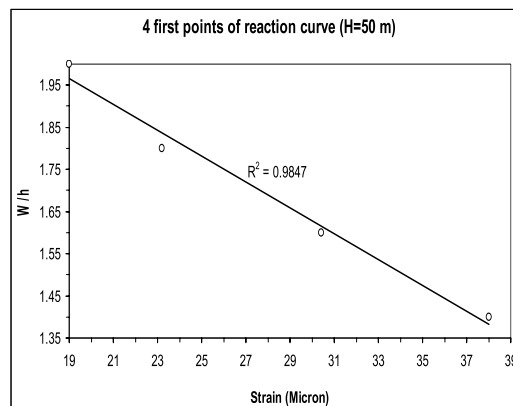


شکل ۷- منحنی عکس العمل زمین برای عمق ۵۰ متری با

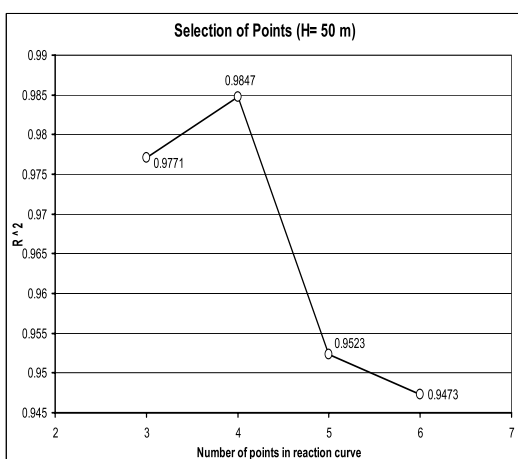
نسبت های W/h مختلف



شکل ۱۲- مقادیر ضریب همبستگی برای تعیین محدوده خطی منحنی عکس العمل زمین برای عمق ۴۰ متری



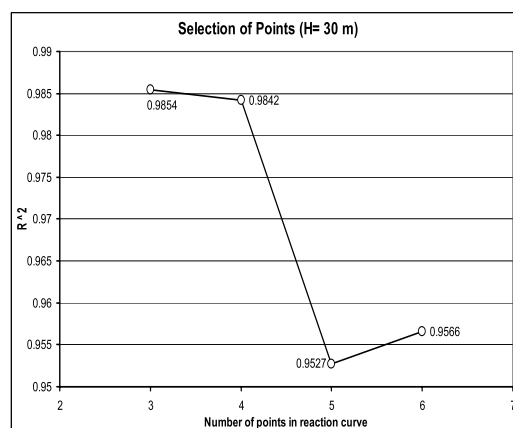
شکل ۱۰- چهار نقطه اول منحنی عکس العمل زمین در عمق ۵۰ متری



شکل ۱۳- مقادیر ضریب همبستگی برای تعیین محدوده خطی منحنی عکس العمل زمین برای عمق ۵۰ متری

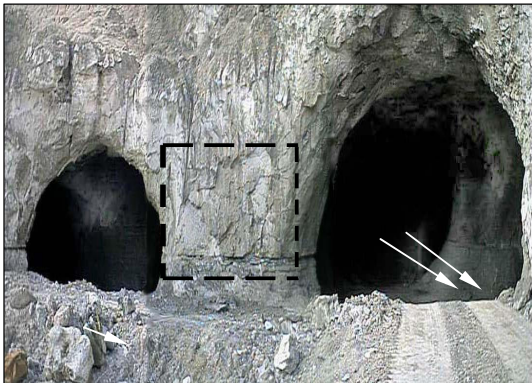
شکل ۱۴، سه منحنی عکس العمل زمین را روی یک دستگاه مختصات نشان داده و همان طور که پیش بینی می شد، منحنی عمق ۳۰ متری در پایین ترین موقعیت و منحنی عمق ۵۰ متری در بالاترین مکان قرار دارد. این بدان معنی است که با انتخاب یک W/h معین بیشترین تغییر شکل حاصله در عمق ۵۰ متری و کمترین تغییر شکل در عمق ۳۰ متری رخ خواهد داد. منحنی ها نشان می دهند که می توان نسبت عرض به ارتفاع پایه را تا مقدار $1/375$ (پایین ترین قسمت خطی منحنی عکس العمل) کاهش داد براساس

علت انتخاب ۴ نقطه اول برای توصیف محدوده رفتار الاستیک پایه سنگی دارا بودن بالاترین ضریب همبستگی (R^2) برای ۴ نقطه اول می باشد. با کاهش و یا افزایش تعداد نقاط (در برازش خطی) مقدار ضریب همبستگی رگرسیون کاهش می یابد. مقادیر ضریب همبستگی در مقابل تعداد نقاط در اشکال ۱۱، ۱۲ و ۱۳ دیده می شود. البته در شکل ۱۱ مقدار این ضریب برای ۳ نقطه اول اندکی ($0/0012$) بیشتر از ۴ نقطه است که می توان با اغماض ۴ نقطه اول را برای این شکل به عنوان محدوده رفتار الاستیک پایه سنگی انتخاب کرد.

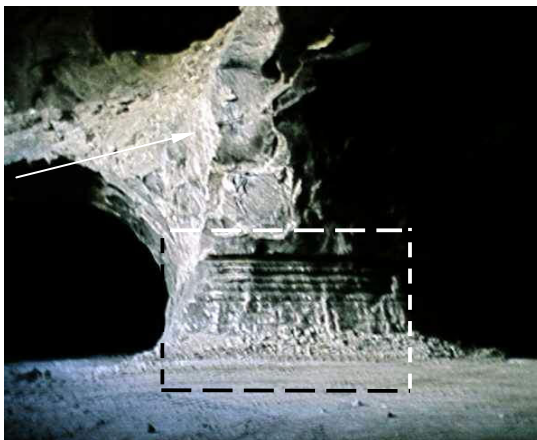


شکل ۱۱- مقادیر ضریب همبستگی برای تعیین محدوده خطی منحنی عکس العمل زمین برای عمق ۳۰ متری

اجرا شده (به صورت موفق) از روش سعی و خطا در طول عمر معدن (بیش از سه دهه) تطابق چشمگیری دارد و از آنجایی که روش‌های تحلیلی و تجربی برای طراحی پایه‌های معدنی دارای محدودیت‌های فراوانی هستند، پیشنهاد می‌شود که از روش ارائه شده در این مقاله برای طراحی پایه‌ها استفاده گردد.



شکل ۱۵- دهانه ورودی بخش غربی معدن نمک سلطان آباد دارای پایه‌ای با نسبت عرض به ارتفاع ۱/۵۳

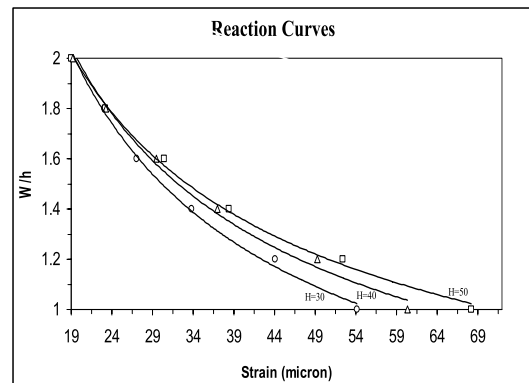


شکل ۱۶- نمایی از یکی از پایه‌های معدن نمک سلطان آباد با نسبت عرض به ارتفاع ۱/۰۴

نتیجه‌گیری

استفاده از فرمول‌های تجربی برای طراحی پایه‌ها دارای محدودیت‌های مختلفی است. این فرمول‌ها در شرایط خاص و بر مبنای تجارب محدود ارائه

منحنی‌های اشکال ۸، ۹ و ۱۰، مشاهدات در معدن سلطان‌آباد نشان دادند که پایه‌های با نسبت عرض به ارتفاع ۱/۳ به بالا پایدارند. این امر تاییدی بر نتایج بدست آمده است. شکل ۱۵ یکی از این پایه‌های پایدار را با نسبت عرض به ارتفاع ۱/۵۳ نشان می‌دهد. سه پایه سنگی دیگر که در شکل ۱۵ با فلش مشخص شده‌اند دارای نسبت عرض به ارتفاع بیش از ۱/۴ می‌باشند. در توضیح شکل ۱۵ باید اشاره شود که خطوط افقی حک شده در پایه‌ها به علت انحلال اندک پایه‌ها در اثر ورود یک سیلاب به داخل معدن در سال‌های گذشته می‌باشد. از آنجا که غلظت نمک در سیلاب نسبتاً بالا بوده است، باعث انحلال زیاد نشده و به پایداری معدن لطمه نزده است. شکل ۱۶ نیز پایه‌ای با نسبت عرض به ارتفاع ۱/۰۴ را نشان می‌دهد. این پایه در امتداد عمود بر عکس دچار گسیختگی شده است.



شکل ۱۴- منحنی عکس‌العمل زمین برای اعماق ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری

نکته قابل توجه در این تصویر احداث دو کارگاه اتاق و پایه به صورت دو طبقه و به صورت سنتی می‌باشد. طبقه دوم با فلش نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه گردید مقدار نسبت عرض به ارتفاع پایه، بدست آمده از روش پیشنهادی با مقادیر

۳- اورعی، ک، حسینی مقدم، ع، ارشدنژاد، ش، (۱۳۸۲). کاربرد روش‌های عددی در تحلیل پایداری انواع سازه‌های زیرزمینی براساس منحنی عکس‌العمل زمین، بیست و دومین گردهمایی علوم زمین، صفحه ۳۸۵-۳۸۷.

۴- فهیمی‌فر، ا. (۱۳۷۶). سازه‌های زیرزمینی در سنگ، انتشارات آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری ایران، ۵۹۰ ص.

۵- قارونی نیک، م؛ همزه ایبازنی، م، (۱۳۸۰). نگهداری حفاریات زیرزمینی در سنگ‌های سخت. انتشارات نص، ۲۷۰ ص.

۶- عسگری، ع، (۱۳۸۰). پیشنهاد دو رابطه تجربی بین "RCR" و "N" و "RMR, Q"، پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشگاه تهران، صفحه ۲۳-۲۷.

۷- دانش، م، (۱۳۷۴). مکانیک سنگ، انتشارات شرکت ملی فولاد ایران، ۶۴۵ ص.

۸- مدنی، ح، (۱۳۷۹). تونل‌سازی (تحلیل پایداری)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جلد سوم، ۴۸۸ ص.

9- Bieniawski, Z. T., (1968). The effect of specimen size on the compressive strength of coal, Intl. J. Rock mechanics and Mining Sciences, Vol. 5, 325-335

10- Bieniawski, Z. T., (1989). Engineering rock mass classifications, John Wiley & Sons, 251.

11- Brady, B.H.G., Brown, E.T., (1993). Rock mechanics for underground mining, Chapman & Hall, 571.

12- Hartman, H.L., (1992). SME Mining Engineering Handbook, 2nd Edition, Society for mining metallurgy and exploration Inc. Littleton, Colorado.

گردیده‌اند. اکثر این فرمول‌ها برای معادن زغال سنگ توسعه داده شده‌اند. اما روش پیشنهاد شده در این مقاله از بسیاری از محدودیت‌های فوق مبراست.

منحنی عکس‌العمل زمین با استفاده از داده‌هایی حاصل می‌شود که هر یک از آنها با اعمال شرایط مختلف توده سنگ، شامل هر نوع ماده معدنی و یا هر ساختار زمین‌شناسی، با کمک مدلسازی عددی- در اینجا با روش عددی اجزا محدود- و اعمال شرایط گوناگون هندسی سازه زیرزمینی، بدست می‌آید. حتی می‌توان این داده‌ها را بر اساس برداشت‌های دقیق با ابزاربندی در حین حفر تونل‌ها بدست آورد، که در این شرایط از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود.

با استفاده از تعریف جدید منحنی عکس‌العمل برای طراحی پایه‌های سنگی می‌توان هر نوع ساختار پیچیده‌ای را مدلسازی کرده، کلیه پارامترهای ژئومکانیکی را مورد بررسی قرار داده و در نهایت ابعاد مورد اطمینان پایه‌ها را تعیین نمود. حتی از این روش می‌توان برای مشخص کردن فاصله بهینه دو تونل در مجاورت یکدیگر (مانند تونل‌های مترو، راه و راه آهن) بهره گرفت.

منابع

۱- اجل لوییان، ر؛ محمدی، د. (۱۳۸۲)، رده‌بندی توده سنگ، نشر فن آوران، ۳۴۹ ص.

۲- ارشدنژاد، ش، پارسایی، ح، پشتوان، ح، (۱۳۸۵). تعیین ابعاد بهینه پایه‌های سنگی بوسیله روش‌های تجربی و عددی بر اساس منحنی عکس‌العمل زمین- مطالعه موردی، معدن نمک زیرزمینی سلطان‌آباد، هفتمین کنفرانس تونل، دانشگاه صنعتی شریف، ص

۸۴۹-۸۶۵

13-Hedley, D. G. f. roxburgh, J. W., Muppalaneni, S. N., (1984). A case history of rock bursts at Elliot Lake, in stability in underground mining II, university of Kentucky, AIME, New York, 210-234.

14- Hedley, D.G.F., Grant, F., (1972). Stope and pillar design for the Elliot Lake uranium mines, Bull. Can. Inst. Min. Metall. Vol.65, 37-44.

15- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002

edition, Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto.

16- Greenwald, H. P., Howarth, H.C., Hartman, I., (1993). Experiments on the strength of small pillars of coal in the Attisbug bed, U.S. Bureau of Mines Tech. Rep. No. 605, 22.

17- Obert, L., Duvall, W.I., (1967). Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, New York, 650.

/ -
