

## ارائه معیاری جهت تعیین کمترین فاصله بین تونل‌های موازی (دوقلو) توسط منحنی واکنش پایه (PRC)

حسین قربانی<sup>۱</sup>، رسول اجل لوئیان<sup>۲\*</sup>

دریافت مقاله: ۹۸/۰۲/۲۱ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۴

### چکیده

تعیین فاصله‌ی حفاری بهینه بین تونل‌های موازی از اهمیت فراوانی برخوردار است. مدل‌های تجربی فراوانی جهت تخمین عرض پایه تونل وجود دارد که هر یک محدودیت‌هایی دارند. در این مقاله، معیاری جهت طراحی عرض پایه بین تونل‌های موازی (دوقلو) ارائه شده است. این معیار مبتنی بر منحنی واکنش زمین و با استفاده از مدل‌سازی عددی در شرایط مختلف است. مقدار کرنش در لحظه رسیدن میزان تنش عمودی (۱۵) در پایه به مقدار مقاومت فشاری توده سنگ ( $\sigma_{cm}$ ) نشانگر نسبت قابل قبول عرض به ارتفاع ( $w/h$ ) می‌باشد که بیانگر فاصله بهینه بین تونل‌های دوقلو است. بدین منظور تونل دوقلوی پونه که در آزاد راه اراک- خرم‌آباد قرار دارد به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. این تونل از هشت زون در لایه‌های سنگ آهک ماری و یک زون در نهشته‌های آبرفتی می‌گذرد. نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی تطابق خوبی بین ابعاد پایه در مشاهدات تونل مورد مطالعه با در نظر گرفتن ابزار دقیق نصب شده در تونل دارد. در نتیجه با در نظر گرفتن این معیار می‌توان بهینه‌ترین عرض پایه را در طراحی تونل‌های دوقلو در حالت استاتیک با دقت مناسبی در تونل‌های ایران بدست آورد. برای نمونه در زون ۳ مقدار مقاومت فشاری توده سنگ ۳/۲۳ مگاپاسکال و مقدار کرنش در محدوده پایه ۰/۰۵۳ می‌باشد. بر اساس تحلیل‌ها در این زون مقدار  $w/h=1/8$  به دست آمده که عرض پایه پایدار حداقل ۱۷/۱ متر می‌باشد.

**کلید واژه‌ها:** تونل‌های دوقلو، منحنی واکنش پایه و تونل پونه.

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

۲. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، [ajalloeian@gmail.com](mailto:ajalloeian@gmail.com)

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

تحلیل دقیق پخش تنش حول یک سازه‌ی زیرزمینی جهت تعیین پایداری توده سنگ یا خاک و نیروهای داخلی در سازه‌ی تونل، از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. در همین حال ساخت یک تونل ثانویه در نزدیکی یک تونل موجود، بر روی شدت تمرکز تنش و پخش ناحیه پلاستیک اثر می‌گذارد. اگر فاصله بین دو تونل بیش از هم باشد هزینه‌های اجرایی را افزایش می‌دهد. بدین شکل که در باز کردن پرتال حجم وسیع‌تری باید ترانشه‌بری شود و همچنین در تونل‌های دسترسی بین دو تونل (Cross cut) طول آن‌ها افزایش یافته و لذا هزینه‌های اجرایی تونل افزایش می‌یابد. تونل‌های دوقلو به موازات هم حفاری می‌شوند اگر فاصله این تونل‌های دو قلو نزدیک هم باشد بدلیل تمرکز تنش و افزایش ناحیه پلاستیک، میزان بار وارده به سیستم نگهداری افزایش می‌یابد. لذا بایستی سیستم نگهداری سنگین انتخاب شود. پس در نتیجه همواره فاصله بین دو تونل بایستی بهینه انتخاب شود. ناحیه بین تونل‌های دوقلو که پایه نامیده می‌شود را می‌توان به عنوان خاک و سنگ برجا بین دو یا چند بازشوی زیرزمینی تعریف کرد. هنگامی که یک پایه باریک است تمرکز تنش افزایش خواهد یافت.

چندین فرمول تجربی جهت طراحی پایه وجود دارد. ولی این روابط دقت کافی ندارند چرا که تمامی این فرمول‌ها با داده‌های محدود بدست آمده از چند پروژه بخصوص، حاصل شده‌اند. بنابراین در حال حاضر به یک الگوریتم جدید یا روش جدیدی برای طراحی بهینه پایه‌ها نیاز است.

فرمول‌های تخمین مقاومت پایه با استفاده از ترکیبی از نتایج تست‌های آزمایشگاهی و در محل بدست آمده‌اند. این فرمول‌ها مقاومت متوسط پایه را محاسبه می‌کنند. تحقیقات دیگری تحت این شرایط با روش‌های مختلفی انجام گرفته، مانند روش تجربی (Bunting, 1911, Morrison et al., 1956, 1972, Holland, Hedley and Grant, 1972, Martin and Maybee, 1967)، عددی (Obert and Duvall, 1967)،

Ghazvinian, 1989, ) و فیزیکی (2000, Hasani et al., 2008

(Ghazvinian et al, 2000).

هیگ و شاهرور (Hage and Shahrou, 2008) تونل‌های دوقلوی دایره‌ای را در زمین‌های کم عمق مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نشست زمین می‌تواند بر افزایش ممان پیچشی برای تونل‌های کم عمق تأثیر گذارتر باشد. عثمان (Osman, 2010) پایداری تونل‌های دوقلو در زمین‌های نرم را با استفاده از روش تحلیلی بررسی کرد. نتایج این تحلیل نشان داد زمانی که تونل‌ها بسیار نزدیک به هم و در عمق کم باشند عدد پایداری تا ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. ساهو و کومار (Sahoo and Kumar, 2013) تأثیر نسبت بین فاصله تونل‌ها و عمق آن‌ها را بر عدد پایداری در زمین نرم نشان دادند. بر پایه این مطالعه، بایستی فاصله بهینه بین تونل‌های دایره‌ای دوقلو در محدوده  $1/5D-3/5D$  برای  $H/D=1$  و  $1/2D-7/5D$  برای  $H/D=7$  باشد (D قطر تونل است). وانگ و همکاران (Wang et al, 2017) یک روش حل تحلیلی را برای پیش‌بینی تنش‌ها و جابجایی‌های حول تونل‌های دوقلوی دایره‌ای در توده سنگ‌های ویسکوالاستیک توسعه دادند. فریت و رید (Frith and Reed, 2018) مفهومی را برای پیش‌بینی نشست با استفاده از منحنی واکنش زمین ((Ground Reaction Curve (GRC)) معرفی کردند. آن‌ها از نسبتی بین عرض پایه و روباره، و همچنین دیگر نسبت‌های بین نشست حداقل و ضخامت لایه یا ارتفاع تونل استفاده کردند. گائوفنگ و شنگلی (Gaofeng and Shengli, 2018) تحلیل پایداری پایه را با استفاده از تئوری احتمالات بررسی کردند و نشان دادند که مدل وندرمروه و متی (Vander Merwe and Mathey, 2013) دقیق‌تر از مدل سالامون و مونرو (Salamon and Munro, 1967) می‌باشد. مدل‌های تجربی بسیاری جهت طراحی پایه در سنگ‌های سخت و نرم ارائه شده است. برخی از مدل‌های پرکاربرد در

جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱. مدل‌های تجربی برای طراحی برخی پایه‌ها

Model	Reference	number
Metamorphosed sedimentary rocks		
$\sigma_p = 0.69\sigma_c h^{-0.66} w^{0.46}$	Von Kimmelman et al., 1984	1
Limestone		
$\sigma_p = 0.35\sigma_c \left( 0.778 + 0.222 \left( \frac{w}{h} \right) \right)$	Krauland and Soder, 1987	2
Canadian shale		
$\sigma_p = 0.42\sigma_c h^{-1} w^1$	Potvin et al., 1989	3
Limestone and scarn		
$\sigma_p = 0.31\sigma_c \left( 0.778 + 0.222 \left( \frac{w}{h} \right) \right)$	Sojoberg, 1992	4
Hard rocks		
$\sigma_p = 0.44\sigma_c \left( 0.68 + 0.52 \left( \frac{w}{h} \right) \right)$	Lunder and Pakalnis, 1997	5

محدود بوده و بنابراین کاربرد آنها و میزان اعتبار آنها محدود خواهد بود.

یکی از بهترین روش‌های تعیین عرض مناسب پایه، مدل‌سازی کامپیوتری با روش‌های عددی مانند روش اجزاء محدود (Finite Element Method (FEM)) می‌باشد. با توجه به اینکه تونل‌های موازی هم در پروژه‌های جاده‌ای کشور بیشتر کار می‌شود ولی در ارتباط با تعیین عرض مناسب بین دو تونل موازی در ایران کمتر کار شده است. با این حال هدف این مقاله پیشنهاد معیاری جهت طراحی پایه یا تعیین فاصله بهینه بین دو یا چند تونل موازی در حالت استاتیک می‌باشد.

## ۲. پروژه مورد مطالعه (تونل‌های دوقلوی پونه)

مطالعه موردی بر روی تونل دوقلوی پونه در آزاد راه اراک به خرم آباد انجام شده است. موقعیت تونل دوقلوی پونه حدود ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهر بروجرود و حدود ۳۶ کیلومتری شمال شرقی شهر خرم آباد قرار دارد. تونل‌های دوقلوی پونه به موازات یکدیگر بوده و با فاصله ۲۵ متری از یکدیگر قرار دارند. باتوجه به اینکه لایه‌بندی تقریباً عمود بر محور تونل‌ها است لذا خصوصیات زون‌های تعریف شده برای آنها یکسان می‌باشد. طول تونل غربی و شرقی به ترتیب ۳۰۸۶ و ۳۰۷۰ متر می‌باشد.

که در آن  $\sigma_p$ : مقاومت پایه (MPa)،  $\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر (MPa)،  $w$ : عرض پایه (m)،  $h$ : ارتفاع پایه (m)،  $H$ : عمق تونل از سطح (m)،  $V$ : حجم ستون مربعی (m<sup>3</sup>)،  $V_s$ : حجم نمونه سنگ (m<sup>3</sup>)،  $V_p$ : حجم پایه (m<sup>3</sup>)،  $d$ : عرض نمونه سنگ (m)،  $L$ : ارتفاع نمونه سنگ (m).

تنش متوسط روی یک پایه‌ی پیوسته (برای طول واحد پایه) با رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Hoek and Brown, 1982):

$$\sigma_v = \gamma H \left( 1 + \frac{B}{w} \right) \quad (1)$$

رابطه (۲) برای پایه‌های مربعی (Hoek and Brown, 1982):

$$\sigma_v = \gamma H \left( 1 + \frac{B}{w} \right)^2 \quad (2)$$

رابطه (۳) برای پایه‌های مستطیلی (Hoek and Brown, 1982):

$$\sigma_v = \gamma H \left( 1 + \frac{B}{w} \right) \left( 1 + \frac{L_t}{L_p} \right) \quad (3)$$

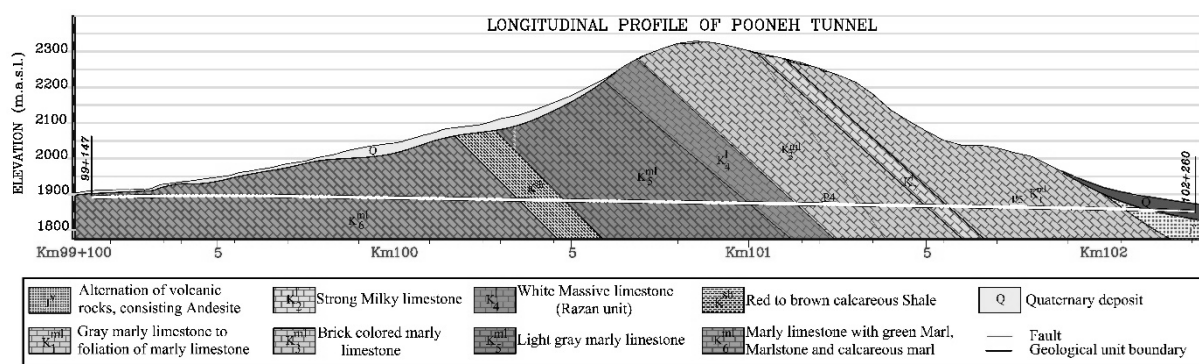
که در آن  $\sigma_v$ : تنش متوسط پایه (MPa)،  $\gamma$ : وزن واحد حجم روبراه (MN/m<sup>3</sup>)،  $H$ : عمق تونل از سطح (روباره) (m)،  $B$ : عرض تونل (m)،  $w$ : عرض پایه (m)،  $L_t$ : عرض تونل متقاطع (m) و  $L_p$ : طول پایه (m).

تمامی این فرمول‌ها در شرایط شیب کم قابل اعمال هستند. حداکثر شیب مجاز ۱۰ درجه از سطح افقی می‌باشد (Hoek and Brown, 1982). همچنین تمامی این فرمول‌ها بر اساس تجارب زیاد در شرایط مختلف با هندسه‌ی متفاوت بدست آمده‌اند ولی میزان داده‌های بکار رفته (در تحلیل آماری)

تونل مورد مطالعه در تقسیم‌بندی ساختاری - رسوبی ایران زمین، در ناحیه زاگرس گسل خورده (زاگرس مرتفع) قرار دارد. تاقدیس و ناودیس‌های متعددی در این ناحیه دیده می‌شود که محور این ساختارها به تبعیت از نیروهای حاکم بر منطقه دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی می‌باشد. از گسل‌های مهم و لرزه‌زای واقع در گستره مورد مطالعه تونل‌ها، گسل راست‌الغز راستگرد دورود در فاصله ۱۱ کیلومتری شمال شرق تونل است. به دلیل عملکرد نیروهای تکتونیکی در لایه‌های مقاوم و نامقاوم، ناپیوستگی‌های مشخصی به صورت

دسته درزه در لایه‌های مقاوم دیده می‌شود.

واحدهای سنگ‌چینه‌ای تشکیل دهنده تونل دوقلوی پونه از جنس سنگ‌آهک، سنگ‌آهک مارنی، مارن و شیل می‌باشد که در شکل ۱ پروفیل طولی زمین‌شناسی آورده شده است. اندازه‌گیری میزان همگرایی، با نصب ابزار دقیق با فاصله هر ۵۰ متر در طول تونل انجام گرفته است. ابزاربندی در هر مقطع در پنج نقطه انجام گرفته و مقایسه میزان همگرایی در یک مقطع که شامل هر دو تونل و محدوده پایه می‌باشد نیز صورت گرفته است.



شکل ۱. پروفیل طولی زمین‌شناسی تونل پونه

اطلاعات حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی، قبل از حفاری تونل و در هنگام حفاری تونل، به همراه آزمایشات مکانیک سنگی در هر ۵۰ متر طول تونل یا با تغییر لیتولوژی می‌باشد. شکل ۲ خروجی تونل دوقلوی پونه را نشان می‌دهد.

قطر هر تونل ۱۶ متر و ارتفاع آنها ۹/۵ متر بوده و تحکیمات دائمی تونل شامل پوشش نهایی با بتن مسلح به ضخامت ۳۵ سانتیمتر می‌باشد. تونل‌ها به یکدیگر نزدیک بوده و میانگین داده‌های ژئومکانیکی توده سنگ در هر زون در جدول ۲ ارائه شده‌اند. این داده‌ها نتیجه برداشت‌های دقیق صحرایی و



شکل ۲. خروجی تونل دوقلوی پونه

جدول ۲. داده‌های ژئومکانیکی (توده سنگ) تونل دوقلوی پونه در تمامی زون‌ها

Zone	$m_i$	GSI	UCS (MPa)	E (MPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	D (Distribution factor)	L (Length of ) (zone)
Zone 1	8	45	32	6000	25	0.5	1190
Zone 2	6	35	15	3750	24.5	0.2	131
Zone 3	9	55	34	12000	25	0.5	519
Zone 4	11	65	60	15000	27	0.5	133
Zone 5	9	50	41	14000	26	0.5	366
Zone 6	11	55	73	15000	26	0.5	62
Zone 7	11	53	59	12000	26	0.5	497
Zone 8	10	42	24	6000	24	0.5	75
Zone 9	-	-	0.85	100	22	-	113s

## ۳. روش تحقیق

پارامترهای فراوانی مانند هندسه‌ی تونل، روباره، مقاومت توده سنگ و مشخصات پوشش نهایی موجب محدودیت استفاده از یک مدل خاص در شرایط مختلف می‌شوند. بنابراین ایجاد یک معیار جدید با حداقل محدودیت برای طراحان فضاهای زیرزمینی بسیار مطلوب خواهد بود.

اساس این معیار بر کرنش برشی پایه با یک مدل عددی برای حصول نموداری جدید خواهد بود. چنانچه مشخص است با گذشت زمان میزان جابجایی زمین بیشتر می‌شود و در نتیجه میزان فشار زمین کمتر می‌شود به عبارت دیگر آزاد شدگی تنش اتفاق می‌افتد. البته مشخص است که بر حسب پروژه مورد نظر و شرایط زمین‌شناسی، مقدار خاصی از این آزاد شدگی مجاز می‌باشد. با این دیدگاه که در حفاری دو تونل کنار هم، زمین از دو سمت مورد تغییر وضعیت تنش می‌شود و قسمت میانی دو تونل (پایه) به این تغییر وضعیت تنش، عکس‌العمل نشان داده و به صورت کرنش در پایه نمایان می‌شود. اگر میزان تغییر تنش و کرنش اتفاق افتاده در نتیجه حفاری دو تونل کنار هم در دسترس باشد می‌توان برای

طراحی پایداری پایه بین تونل قضاوت بهتری انجام داد. بدین منظور از یک نمودار که محور افقی این نمودار کرنش برشی موجود در پایه و محور عمودی، نسبت عرض به ارتفاع (w/h) پایه می‌باشد، معرفی می‌گردد. این نمودار، توسط مولفین، نمودار واکنش پایه (Pillar Reaction Curve) نامگذاری می‌گردد. کل داده‌های لازم جهت رسم این نمودار را می‌توان با مدل‌سازی عددی یا داده‌های اندازه‌گیری شده در محل بدست آورد. هر شرایطی را می‌توان با مدل‌سازی عددی شبیه سازی نمود و نمودار با بدست آمدن دو مولفه (نسبت w/h) و کرنش پایه) در هر نقطه حاصل خواهد شد. این نمودار را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد که قسمت اول آن خطی و قسمت دوم غیر خطی می‌باشد. قسمت خطی نمودار معرف رفتار الاستیک و قسمت غیر خطی معرف رفتار پلاستیک در پایه می‌باشد.

معیار انتخاب کرنش برشی مجاز، بدین شکل می‌باشد که مقدار کرنش در لحظه رسیدن میزان تنش عمودی ( $1\sigma$ ) در پایه به مقدار مقاومت فشاری توده سنگ ( $\sigma_{cm}$ ) محاسبه شود. در نقطه نظیر آن روی نمودار که میزان (w/h) را نشان

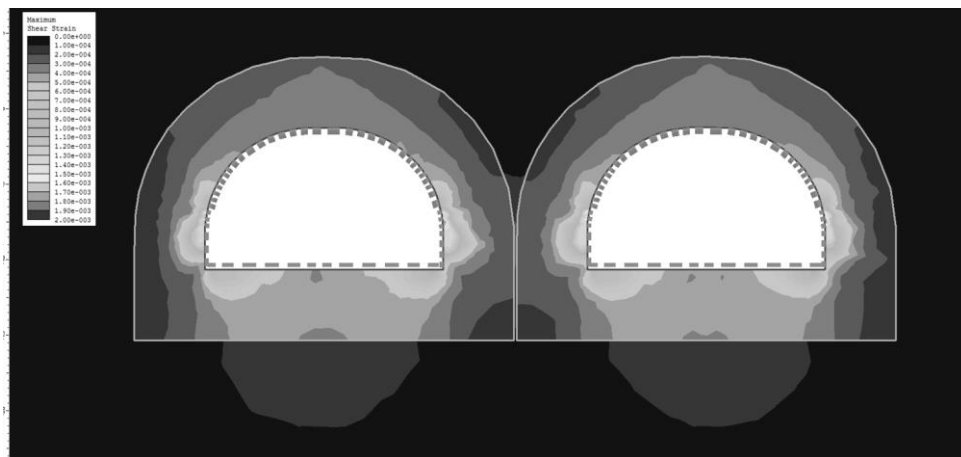
می‌دهد، به عنوان کمترین (w/h) مجاز انتخاب می‌شود. مقاومت فشاری توده سنگ از رابطه‌های مختلف محاسبه شده و میانگین آنها به عنوان مقاومت فشاری توده سنگ در نظر گرفته شده است. با انتخاب میانگین مقاومت‌ها می‌توان گفت که عدد انتخاب شده ضریب اطمینان ۱/۴ نسبت به کمترین مقدار مقاومت می‌باشد. از لحاظ اینکه معیار توضیح داده شده، با کمترین مقدار مجاز (w/h) در ارتباط است لذا عدد انتخاب شده حاشیه اطمینان خوبی دارد.

تعداد ۹ مدل عددی با نرم افزار phase2 برای هر زون با شرایط داده‌های ژئومکانیکی ثابت که در جدول ۲ آورده شده است، مدل‌سازی شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از این مدل عددی ساخته شده را نشان می‌دهد. در این مدل‌ها فاصله تونل‌ها تغییر کرده و میزان کرنش برشی و تنش عمودی در آنها محاسبه شده است.

فاصله دیوار به دیوار تونل‌ها در محاسبات به ترتیب ۹/۵، ۱۰/۸، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۱ و ۳۶ متر در نظر گرفته شده است. برای کنترل مدل عددی از مقایسه نتایج آن با نتایج ابزار دقیق نصب شده در تونل استفاده شده است. قرائت بین‌های

ابزار دقیقی که بین دو نقطه در دیواره تونل و در ارتفاع ۵ متری از کف تونل نصب شده (L1 و R1)، صورت گرفته است. همچنین میزان کرنش برشی در مدل‌ها در محل بین‌های ابزار دقیق (L1 و R1)، قرائت شده و تنش عمودی دقیقاً در وسط پایه اندازه‌گیری شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد خروجی مدل عددی با نتایج ابزار دقیق تطبیق خوبی دارد. سیستم مونیتورینگ و ابزار دقیق هر ۵۰ متر در هر دو تونل نصب شده است که میزان همگرایی تونل را در اثر بارهای وارده اندازه‌گیری می‌گیرد. با اطمینان حاصل شده از صحت مدل عددی ساخته شده، با تغییر میزان فاصله دو تونل از هم تحت همان شرایط زمین‌شناسی میزان کرنش اتفاق افتاده در پایه محاسبه شده است.

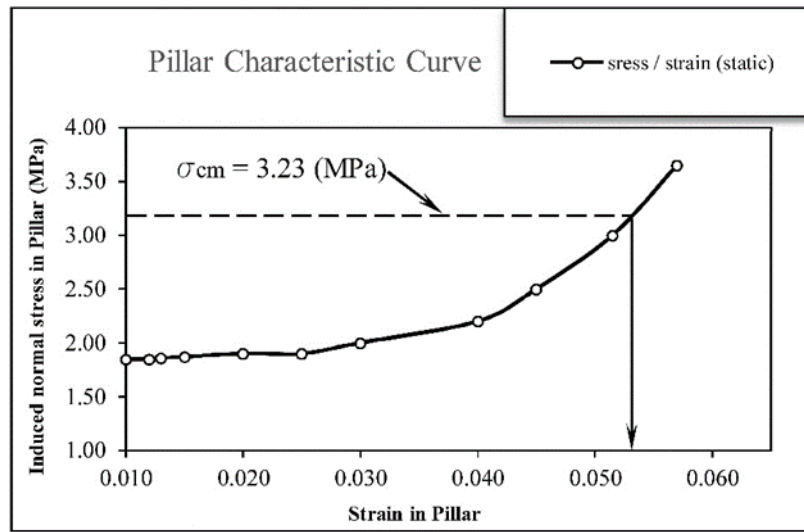
در مدل عددی ساخته شده میزان تنش عمودی ایجاد شده تحت اثر حفاری تونل محاسبه شده است. زمانی که میزان تنش ایجاد شده مساوی مقاومت فشاری توده سنگ شود مقدار کرنش محاسبه شده و به عنوان میزان کرنش قابل تحمل توده سنگ انتخاب می‌شود.



شکل ۳. مدل سازی برای تونل پونه

در اثر حفاری تونل دو قلو در محدوده پایه را در زون شماره ۳ نشان می‌دهد.

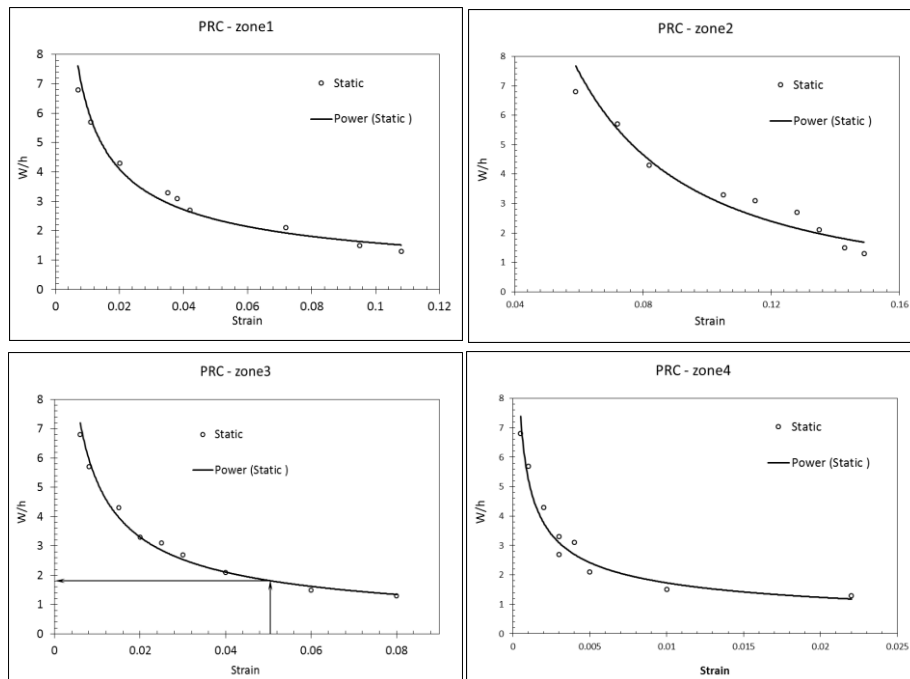
نمودارهای تنش و کرنش برای تمام زون‌ها بدست آمده که نمودار شکل ۴ نمونه‌ای از نمودار تنش و کرنش ایجاد شده

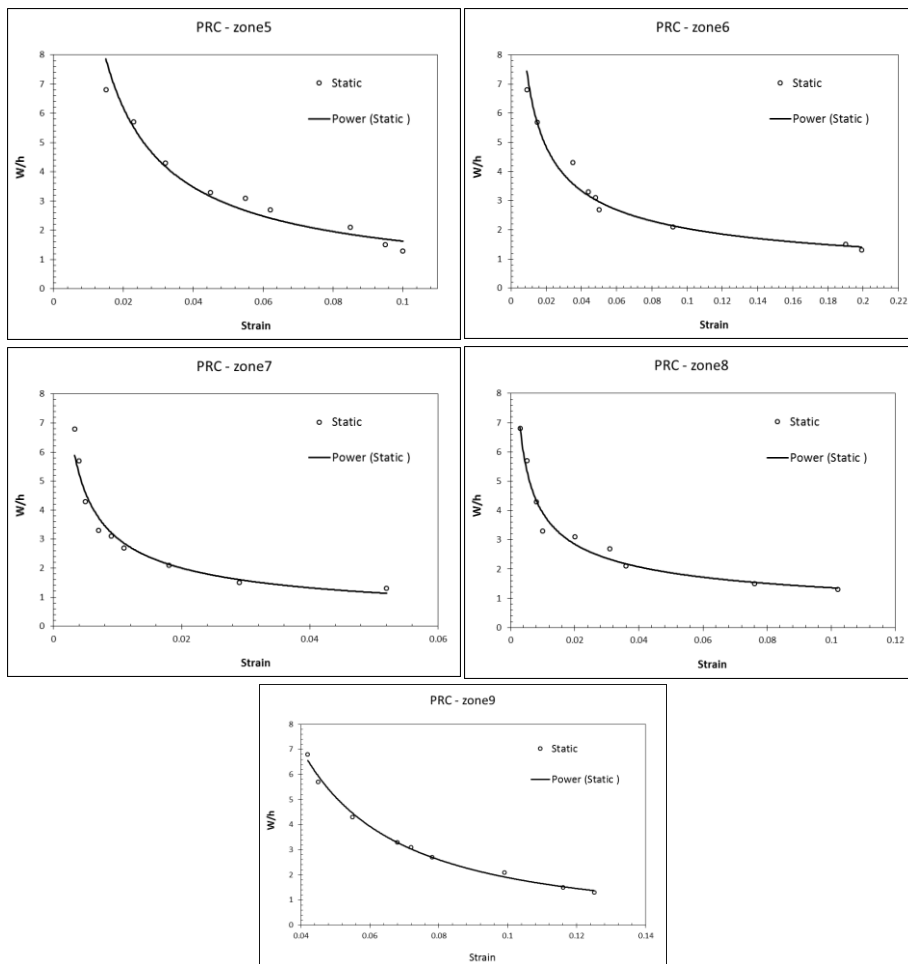


شکل ۴. نمودار تنش و کرنش ایجاد شده در اثر حفاری در پایه تونل دو قلوئی پونه با فاصله‌های مختلف از هم

ایجاد شده در پایه زمانی که این تنش مساوی مقاومت پایه شود میزان کرنش در پایه محاسبه می‌شود. با توجه به فاصله تونل‌ها و میزان کرنش، نمودارهای PRC برای تمام زون‌ها رسم شده است (شکل ۵).

چنانچه مشخص است با کاهش میزان فاصله بین دو تونل مقدار تنش ایجاد شده به دلیل تداخل دو تنش القایی در هر دو تونل افزایش می‌یابد و در نتیجه آن، مقدار کرنش پایه نیز افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شکل ۵ با افزایش تنش





شکل ۵. نمودار PRC برای تمامی زونهای تونل دو قلوئی پونه.

میزان مقاومت فشاری توده سنگ برای زونهای مختلف با روابط که در جدول ۳ مشخص می‌باشد، محاسبه شده است (جدول ۴).

جدول ۳. محاسبه مقدار مقاومت فشاری توده سنگ با روابط مختلف

Hoek and Brown (1980)	$\sigma_{cm} / \sigma_{ci} = \sqrt{S} \quad (S = e(RMR-100)/9)$
Kalamaros and Bieniawski (1995)	$\sigma_{cm} / \sigma_{ci} = e(RMR-100)/24$
Aydan and Dalgic (1998)	$\sigma_{cm} = (RMR/RMR + 6(100-RMR)) * \sigma_{ci}$
Hoek and Marinos (2007)	$\sigma_{cm} = (0.0034 m_i^{0.8}) \sigma_{ci} (1.029 + 0.025 e^{(-0.1 m_i)})^{GSI}$
Barton (2002)	$\sigma_{cm} = ((5 * \gamma) * (Q * (\sigma_{ci}/100))^{1/3})$



همانطور که توضیح داده شد، در این نقطه مقدار تنش ایجاد شده برابر مقاومت پایه می‌باشد. لذا در این نقطه پایه به حداکثر میزان تنش قابل تحمل خود رسیده و اعمال تنش بیش از آن به شکست پایه منجر خواهد شد.

جدول ۴. مقادیر مقاومت متوسط پایه بدست آمده برای تمامی زون‌ها و کرنش متناظر به آن

Zone	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma_{cm}$ (MPa)	1.43	0.65	<b>3.23</b>	12.53	5.91	12.14	9.04	1.43	0.85
Static strain	0.056	0.087	<b>0.053</b>	0.015	0.033	0.019	0.027	0.062	0.075
Static (w/h)	2.22	4.10	<b>1.80</b>	1.41	1.95	1.52	1.74	2.37	2.62

بین تونل قضاوت بهتری انجام داد. بدین منظور یک نمودار بنام نمودار واکنش پایه (PRC) که محور افقی آن کرنش برشی موجود در پایه و محور عمودی، نسبت عرض به ارتفاع (w/h) پایه می‌باشد، معرفی می‌گردد. کل داده‌های لازم جهت رسم این نمودار را می‌توان با مدل‌سازی عددی یا داده‌های اندازه‌گیری شده در محل بدست آورد.

نتایج PRC نشان می‌دهند زمانی که میزان تنش ایجاد شده در توده سنگ در اثر حفاری مساوی مقاومت فشاری توده سنگ باشد، مقدار کرنش ایجاد شده در محدوده مجاز می‌باشد که نشانگر فاصله‌ی بهینه بین تونل‌های دوقلو می‌باشد. نتایج روش پیشنهادی انطباق خوب بین داده‌های مطالعه موردی و تحلیل نمودار PRC را نشان می‌دهند.

#### ۵. قدردانی

از شرکت طرح آفرینان هزاره امید و آقای دکتر شبیر ارشدنژاد، آقای دکتر مجتبی کمانی و آقای مهندس محمد اعزازی که کمک شایانی برای ارائه این مقاله کرده‌اند کمال تشکر را دارم.

در نمودار PRC شکل ۵ رسم شده برای تونل دوقلوی پونه، با توجه به کرنش‌های متناظر با مقاومت پایه برای هر زون میزان (w/h) متناسب با آن نیز انتخاب شده و در جدول ۴ آورده شده است. برای انتخاب فاصله بهینه با توجه به طول تونل میانگین وزندار از (w/h) های بدست آمده، گرفته شد که مقدار  $w/h = 2/09$  حاصل شد. چنانچه مشخص است در بعضی از زون‌ها فاصله دو تونل می‌بایست بیشتر از این مقدار باشد (مانند زون ۲) ولی با توجه به طول تونل و هزینه‌های اجرایی و مقتضیات هندسی مسیر میزان  $w/h = 2/09$  حالت بهینه‌تری می‌باشد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

تعیین کمترین فاصله مجاز بین دو تونل موازی (تونل‌های دوقلو) برای تحلیل پایداری و هزینه‌ی پروژه بسیار مهم می‌باشد. ساخت یک تونل ثانویه در نزدیکی یک تونل موجود و یا ساخت همزمان دو تونل به موازی هم، بر روی شدت تمرکز تنش و پخش ناحیه پلاستیک اثر می‌گذارد.

اساس این معیار بر کرنش برشی پایه با یک مدل عددی و استفاده از مفهوم GRC برای حصول نموداری جدید است. با پیش‌بینی میزان تغییر تنش و کرنش اتفاق افتاده در نتیجه حفاری دو تونل کنار هم می‌توان برای طراحی پایداری پایه

## منابع

- Arshadnejad, Sh., poshtvan, H., Parsaee, H., 2006. Determination of Optimum pillar size by empirical and numerical methods based on ground reaction curve – Case study, Soltan abad's underground salt mine. Proc. of 7<sup>th</sup> tunneling conference in Tehran, Iran, (in Persian), pp. 849-865.
- Aydan, S. Dalgic., 1998. Prediction of deformation behavior of 3-lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian fault zone (NAFZ) Proceedings of Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, China, pp. 228-233.
- Barton, N., Loset, F., Lien, R., and Lunde, j., 1980. Application of the Q-System in design decisions. Subsurface Space, Ed: M. Bergman, 2, 553-561.
- Bunting, D., 1911. Chamber pillars in deep anthracite mines, Transactions, AIME, Vol. 42: 235-245.
- Frith, R., Reed, G., 2018. Coal pillar design when considered a reinforcement problem rather than a suspension problem, International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 28: 11-19.
- Gaofeng, S., Shengli, Y., 2018. Probability and reliability analysis of pillar stability in South Africa, International Journal of Mining Science and Technology, article in press (doi.org/10.1016/J.JJmst.2018.02.004).
- Ghazvinian, A.H., 1989. Prediction of the stability of underground openings by equivalent material modelling, PhD Thesis, Submitted to Indian Institute of Technology Delhi, 188p.
- Ghazvinian, A.H., Gupta, K.K., Ramamurthy, T., 2000. Equivalent material modelling to predict the stability of underground openings, Proc. of Tunnelling Asia 2000, Central Board of Irrigation and Power, New Delhi, pp. 1:58-69.
- Goshtasbi, K., Arshadnejad, Sh., 2008. Pillar design in underground mines by ground reaction curve, Journal of Geology & Environment, Islamic Azad University, Islamshahr branch, (in Persian), Vol. 1: 11-23.
- Hage Chehade, F., Shahrour, I., 2008. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure, Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 23: 210-214.
- Hassani, H., Arshadnejad, Sh., Khodadadi, H., Goodarzi, N., 2008. 3D numerical modelling of a couple of power intake shafts and head race tunnels at vicinity of a rock slope in Siah Bishe pumped storage dam, north of Iran, Journal of Applied Sciences, Science Alert publisher, pp. 4294-4302.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1982. Underground excavations in rock, the institution of Mining and Metallurgy, Hertford, England, 527p.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980a. Underground Excavation in Rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, UK.
- Hoek, E., Marinos, P., 2007. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks, No., 2.
- Holland, C.T., 1964. Strength of coal in mine pillars, Proc. of 6<sup>th</sup> US symposium on rock mechanics, University of Missouri, Rolla, pp. 450-466.
- Kalamaras, G., Bieniawski, Z.T., 1995. A rock mass strength concept incorporating the effect of time. Proc ISRM Congress, Tokyo, Balkema, p.295.
- Krauland, N., Soder, P.E., 1987. Determining pillar strength from pillar failure observations, Engineering Mining Journal, Vol. 8: 34-40.
- Lunder, P.J., Pakalnis, R., 1997. Determination of the strength of hard rock mine pillars, Bulletin of Canadian Inst. Min. Metall., Vol. 90: 51-55.
- Martin, C.D., Maybee, W.G., 2000. The strength of hard-rock pillars, Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 37: 1239-1246.
- Morrison, R.G.K., Corlett, A.V., Rice, H.R., 1956. Report of special committee on mining practices at Elliott lake, Ontario department of Mines, Bulletin, 155 p.
- Osman. A., 2010. Stability of unlined twin tunnels in undrained clay, Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25: 290-296.
- Potvin, Y., Hudyma, M.R., Miller, H.D.S., 1989. Design guidelines for open stope support, Bulletin of Canadian Inst. Min. Metall., Vol. 82: 53-62.
- Sahoo, J.P., Kumar, J., 2013. Stability of long unsupported twin circular tunnels in soils, Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 38: 326-335.

- 
- Salamon, M.D.G., Munro, A.H., 1967. A study of the strength of coal pillars, *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 68: 55-67.
- Sojoberg, J., 1992. Failure modes and pillar behaviour in the Zinkgruvan mine, *Proc. of 33<sup>rd</sup> U.S. Rock Mechanics symposium*, Sante Fe. Rotterdam, A. A. BALKEMA, pp. 491-500.
- Vander Merwe, J.N., Mathey, M., 2013. Update of coal pillar database for South Africa coal mining, *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, (SAIIM), Vol. 113: 825-840.
- Von Kimmelman, M.R., Hyde, B., Madgwick, R.J., 1984. The use of computer applications at BCL Limited in planning pillar extraction and design of mining layouts, *Proc. of ISRM symposium: Design and Performance of Underground Excavations*, London, British Geotechnical Society, pp. 53-63.
- Wang, H.N., Zeng, G.S., Utili, S., Jiang, M.J., Wu, L., 2017. Analytical solutions of stresses and displacements for deeply buried twin tunnels in viscoelastic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93: 13-29.