

بررسی و مقایسه روش‌های پیش‌بینی پدیده فشارندگی با مطالعه موردی تونل امامزاده‌هاشم

مرتضی احمدی^{۱*}، کامران گشتاسبی^۲، رضا رشیدی^۳

۱. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، moahmadi@modares.ac.ir

۲. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن،

۳. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، Rrashidi59@gmail.com

(دریافت ۱۹ آبان ۱۳۸۶، پذیرش ۴ خرداد ۱۳۸۷)

چکیده

اولین تعریف علمی برای پدیده فشارندگی در سنگ توسط ترزاقی ارائه شد. طبق تعریف او سنگ‌های فشارنده بر اثر اعمال تنش به آهستگی به درون تونل پیشروی می‌کنند، بدون آنکه حجم آنها به طور محسوس افزایش یابد. همچنین بارلا و انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ فشارندگی را بر اثر افزایش تنش برشی تعریف نموده که باعث حرکت پیرامون تونل به سمت داخل آن بشود. در این تحقیق بررسی بوجود آمدن پدیده فشارندگی در تونل‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در منابع، روش‌های مختلفی از جمله تجربی، نیمه تجربی و تئوری-تحلیلی ارائه شده است. روش‌های سینگ، گوئل، جتوا و هوک-مارینوس از جمله این روش‌ها می‌باشند. به عنوان مطالعه موردی از تونل جدید الاحداث امامزاده‌هاشم استفاده و وضعیت فشارندگی در این تونل مورد تحقیق قرار گرفته شده است. این تونل به عرض ۱۲ متر و به ارتفاع ۹ متر در مسیر جاده هراز قرار گرفته است. در این تونل به دلیل وجود شرایط آبهای زیرزمینی، ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها ریزش در مسیر تونل در ماسه سنگ‌ها و شیل‌های سازندهای مختلف در مسیر تونل رخ داده است. در این تحقیق به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و خواص ژئومکانیکی توده سنگ‌های مسیر این تونل، استعداد وقوع پدیده فشارندگی، میزان شدت و ارزیابی این پدیده پرداخته شد. نتایج حاکی از این می‌باشد که میزان فشارندگی در شیل سازند شمشک زیاد می‌باشد و در این سازند ریزش رخ خواهد داد. مارن با میان لایه سنگ آهکی و سنگ آهک ضخیم سازند مبارک بعد از شیل دارای بیشترین فشارندگی در سازندهای مسیر تونل می‌باشند. مقایسه روش‌های مختلف در تعیین پدیده فشارندگی نشان داد که روش جتوا واقع بینانه‌ترین جواب را برای پدیده فشارندگی در تونل مورد مطالعه ارائه نموده است.

کلمات کلیدی

پدیده فشارندگی، سنگ شیل، روش‌های پیش‌بینی فشارندگی، تونل جدید الاحداث امامزاده هاشم

۱- مقدمه

توده سنگ ضعیف در مقابل تنش‌های اعمالی بالا دچار پدیده فشارندگی خواهد شد. پس از گذشت توده سنگ از ظرفیت باربری، وارد رفتار جاری شدن خواهد شد. اولین تعریف علمی برای پدیده فشارندگی در سنگ توسط ترزاقی ارائه شد. طبق تعریف او سنگ‌های فشارنده بر اثر اعمال تنش به آهستگی به درون تونل پیشروی می‌کنند، بدون آنکه حجم آنها به طور محسوس افزایش یابد [۱]. همچنین بارلا و انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ فشارندگی را ناشی از افزایش تنش برشی تعریف کرده‌اند که باعث حرکت پیرامون تونل به سمت داخل می‌شود [۲].

ایجاد حفره یا احداث تونل در سنگ مستعد رفتار فشارندگی منجر به تغییر شکل‌های بزرگ و در نتیجه کاهش سطح مقطع حتی در کف تونل خواهد شد. این تغییر شکل‌ها در یک دوره طولانی ادامه خواهند یافت. به منظور جلوگیری از ادامه این تغییر شکل‌ها نیاز به سیستم نگهداری است.

برای تعیین استعداد فشارندگی در سنگ‌ها سه روش متداول وجود دارد که عبارتند از روش‌های تجربی، نیمه تجربی و تئوری - تحلیلی. روش‌های تجربی بر پایه دو پارامتر اساسی طبقه‌بندی توده سنگ (Q) و عمق تونل (H) می‌باشند. دو روش متداول در این گروه شامل روش سینگ و روش گوئل است [۳]. در روش‌های نیمه تجربی احتمال فشارندگی با استفاده از تغییر شکل‌های قابل انتظار در اطراف تونل، در یک میدان هیدرواستاتیک پیش‌بینی می‌شود.

نقطه مشترک روش‌های نیمه تجربی پارامتر فاکتور صلاحیت است که بر اساس نسبت مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ و یا سنگ بکر، به فشار برجا بیان می‌شود. روش‌های متداول در این گروه روش‌های جتوا [۴] و هوک و مارینوس [۵] می‌باشند. روش تئوری - تحلیلی بر اساس روش‌های فرم بسته و روش‌های عددی می‌باشند. پارامترهای لازم برای حل معادلات در روش‌های فرم بسته شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی حداکثر و پسماند توده سنگ، مدول یانگ، ضریب پواسون، زاویه اتساع و تنش بحرانی می‌باشند.

دو روش عمده در این گروه شامل روش بارلا [۶] و روش ISRM می‌باشد [۷]. در جدول ۱ طبقه‌بندی شرایط زمین در روش تئوری - تحلیلی نشان داده شده است.

در جدول ۱، σ_θ مقدار تنش مماسی، σ_{cm} مقاومت فشاری تک-محوره توده سنگ و P_0 تنش برجا می‌باشد.

جدول ۱: طبقه‌بندی شرایط زمین در روش تئوری - تحلیلی [۷].

بارلا	ISRM	درجه فشارندگی
σ_{cm} / P_0	$\sigma_\theta / \sigma_{cm}$	
> 1	< 1	بدون فشارندگی
$0.4 - 1$	$1 - 2$	فشارندگی کم
$0.2 - 0.4$	$2 - 4$	فشارندگی متوسط
$0 < 0.2$	> 4	فشارندگی زیاد

۲- بررسی پدیده فشارندگی

۲-۱- روش تجربی

روش تجربی بر پایه روش‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ، ارائه شده‌اند. با وجود اینکه مسئله فشارندگی در تونل‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لیکن تاکنون عدم قطعیت‌هایی در موضوع فشارندگی و روش‌های تعیین مقدار فشارندگی وجود دارد.

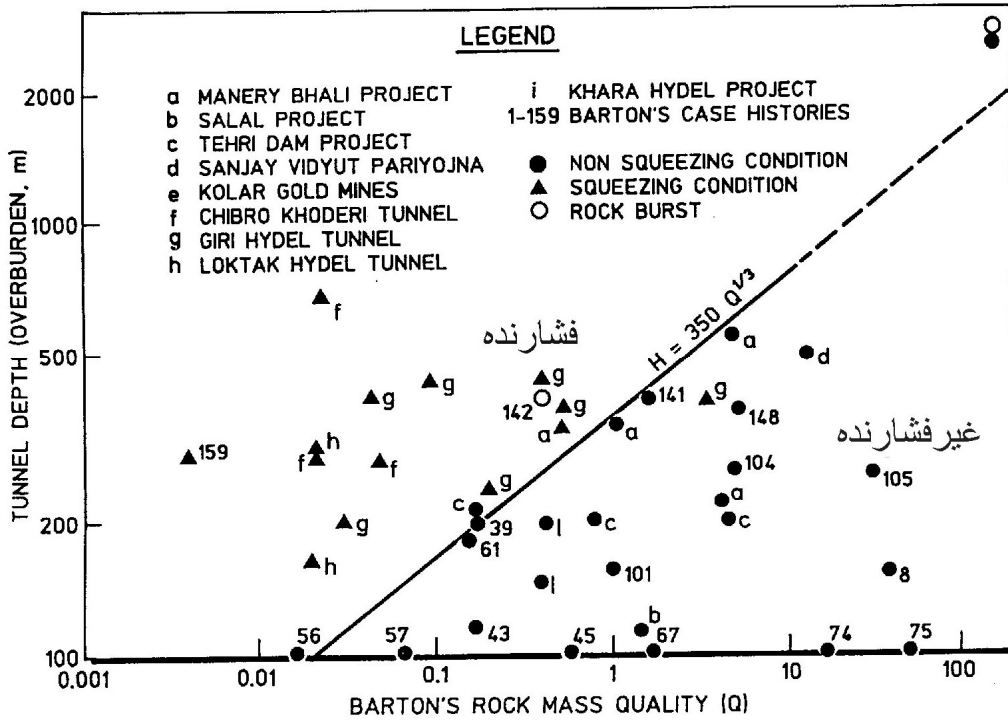
بر پایه ۳۹ مورد مطالعاتی، با توجه به مطالعات جمع‌آوری شده از طبقه‌بندی Q و روبراه (H)، سینگ و همکاران (۱۹۹۲) یک خط راست که معیار جداسازی بین سنگ فشارنده از غیر فشارنده می‌باشند، ارائه کردند. معادله این خط به صورت رابطه ۱ می‌باشد [۳].

$$H = 350Q^{1/3} [m] \quad (1)$$

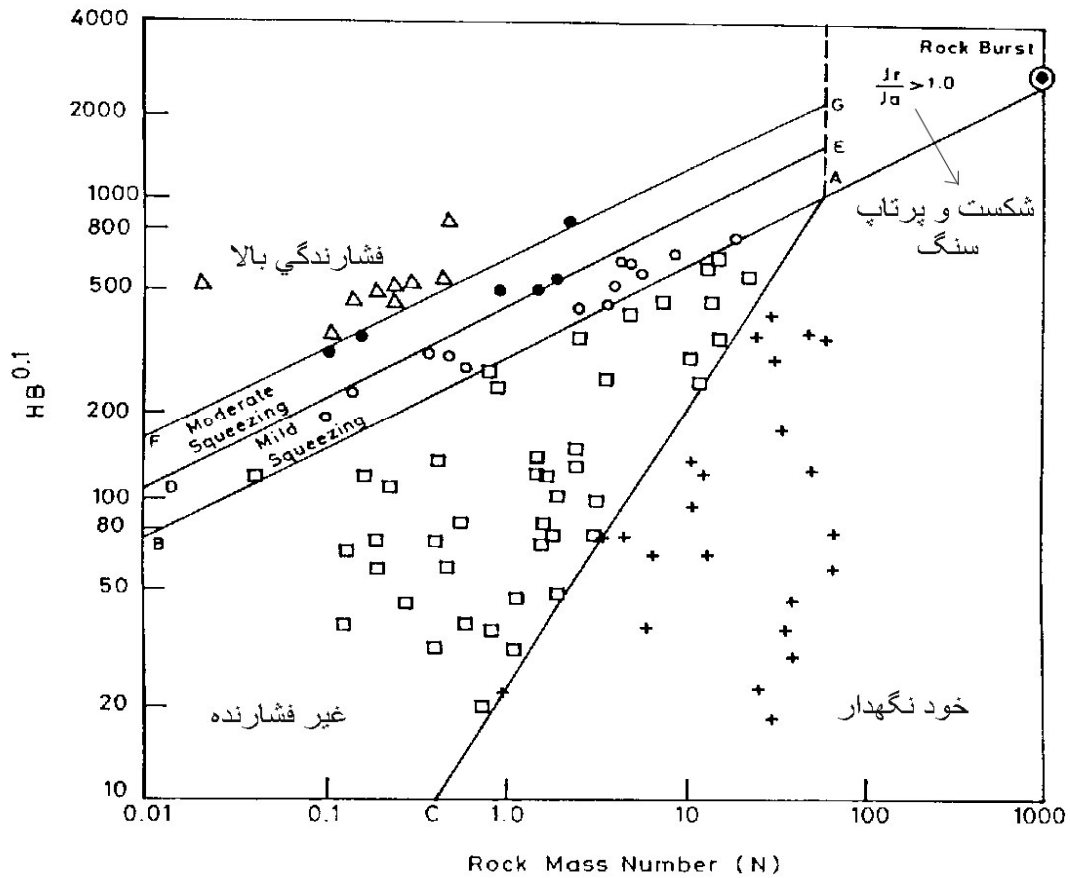
روش ساده تجربی دیگر، روشی است که توسط گوئل و همکاران در سال ۱۹۹۵ بر پایه عدد توده سنگ (N) در شرایط تنش آزاد بر اساس طبقه‌بندی Q ارائه شده است که عبارت است از:

$$N = Q_{SRF=1}$$

آنها برای سادگی و پیشگیری از اثر پارامترهای نامشخص در شاخص Q، پارامتر SRF را برابر یک فرض نمودند. با فرض عمق تونل برابر H، دهانه یا قطر تونل B و عدد توده سنگ N، از بررسی ۹۹ مقطع تونل، گوئل و همکاران در سال ۱۹۹۵ نموداری لگاریتمی بین N و $H * B^{0.1}$ را جهت تعیین وضعیت فشارندگی ارائه کردند که در شکل ۱ روش سینگ و در شکل ۲ روش گوئل ارائه شده است.



شکل ۱: روش پیش‌بینی شرایط فشارندگی توسط سینگ و همکاران [۳].



شکل ۲: روش پیش‌بینی وضعیت فشارندگی توسط گوئل و همکاران [۳].

۳-۲- روش تئوری - تحلیلی

آیدان و همکاران فرضیه‌ای را بر پایه تونل‌سازی در ژاپن که در آن رابطه مقاومت سنگ بکر (σ_{ci}) با فشار روباره (γH) مطابق رابطه ۴ می‌باشد، ارائه کردند [۸].

با این پیش فرض که مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و توده سنگ σ_{cm} برابر باشد. شرایط فشارندگی هنگامی رخ می‌دهد که نسبت $\sigma_c / \gamma H$ کمتر از ۲ باشد.

ایده اصلی این فرضیه بر پایه مقایسه پاسخ تنش - کرنش سنگ در آزمایشگاه و پاسخ تنش مماسی - کرنش مماسی در اطراف تونل می‌باشد. در این تئوری سطوح کرنش نرمال شده η_p و η_s و η_f به صورت زیر تعریف می‌شوند [۸].

$$\eta_p = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_e} = 2\sigma_{ci}^{-0.17},$$

$$\eta_s = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_e} = 3\sigma_{ci}^{-0.25}, \quad (۴)$$

$$\eta_f = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_e} = 5\sigma_{ci}^{-0.32}$$

ϵ_p ، ϵ_s و ϵ_f مقادیر کرنش بعد از نقطه تسلیم و ϵ_e کرنش حدی الاستیک می‌باشد.

هوک و مارینوس بر اساس تحقیقات قبلی محققین از نسبت σ_{cm} به p_0 به عنوان یک شاخص، جهت تعیین پتانسیل فشارندگی در تونل‌ها استفاده نمودند و دو نمودار را برای درک بهتر نحوه رفتار تغییر شکل در اطراف تونل ارائه کردند [۵].

در این نمودارها کرنش شعاعی جداره تونل و همچنین کرنش جداری جبهه کار تونل با توجه به نیروهای داخلی مختلف سیستم نگهداری در مقابل نسبت مقاومت فشاری تک محوری سنگ به تنش در جا، رسم شده‌اند.

هوک به کمک تحلیل‌های اجزای محدود و بررسی طیف وسیعی از سنگ‌ها، بررسی تنش‌های برجا و نیروی وارد بر سیستم نگهداری (Pi) رابطه‌های تقریبی ۵ و ۶ را برای محاسبه کرنش جداره (ϵ_t) و سینه کار تونل (ϵ_f) ارائه کرد [۵]:

$$\epsilon_f (\%) = 0.15(1 - P_i / P_0) \frac{\sigma_{cm}}{P_0}^{-(3P_i / P_0 + 1) / (3.8P_i / P_0 + 0.54)} \quad (۵)$$

$$\epsilon_t (\%) = 0.1(1 - P_i / P_0) \frac{\sigma_{cm}}{P_0}^{-(3P_i / P_0 + 1) / (3.8P_i / P_0 + 0.54)} \quad (۶)$$

نمودار مربوط به ϵ_t در شکل ۳ و نمودار مربوط به ϵ_f در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

در جدول ۲ با استفاده از روش‌های تجربی ارائه شده فوق، رابطه همگرایی (کاهش قطر تونل) با میزان فشارندگی نشان داده شده است [۳].

جدول ۲: تعیین درجه فشارندگی [۳].

نسبت میزان همگرایی به قطر تونل	شرایط فشارندگی
۱ - ۳ %	فشارندگی ملایم
۳ - ۵ %	فشارندگی متوسط
> ۵ %	فشارندگی زیاد

معادله خط مرزی بین شرایط فشارنده و غیر فشارنده به صورت رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$H = (275N^{0.33})B^{-1} \quad (۲)$$

۲-۲- روش نیمه تجربی

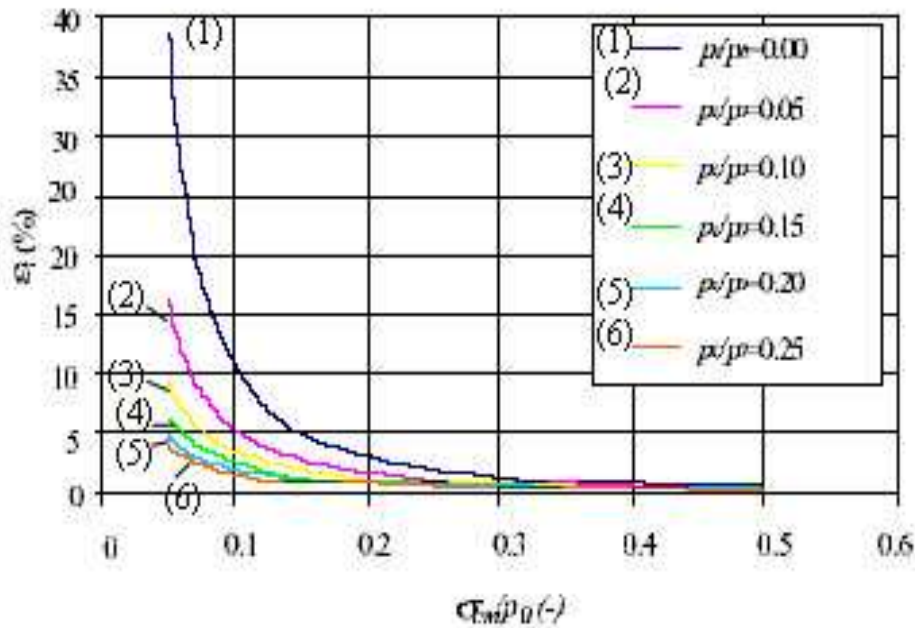
روش نیمه تجربی شاخص‌هایی را برای تعیین پتانسیل فشارندگی تونل ارائه می‌نماید. همچنین با این روش‌ها و توسط روش‌های تحلیلی فرم بسته برای یک تونل دایره‌ای و تحت شرایط بارگذاری هیدرواستاتیک می‌توان ابزارهایی را برای تخمین جایجایی فضای اطراف تونل و نیروی داخلی وارد بر سیستم نگهداری بدست آورد. در این روش از پارامتر کمی تعیین پتانسیل فشارندگی یا به عبارتی دیگر توانایی جسم در برابر فشار که همان نسبت مقاومت فشاری تک محوری سنگ یا توده سنگ به تنش برجا (ناشی از سرباره) می‌باشد، استفاده می‌شود. جتوا و همکاران در سال ۱۹۸۴ درجه فشارندگی را به صورت رابطه ۳ ارائه کردند:

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_z} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad (۳)$$

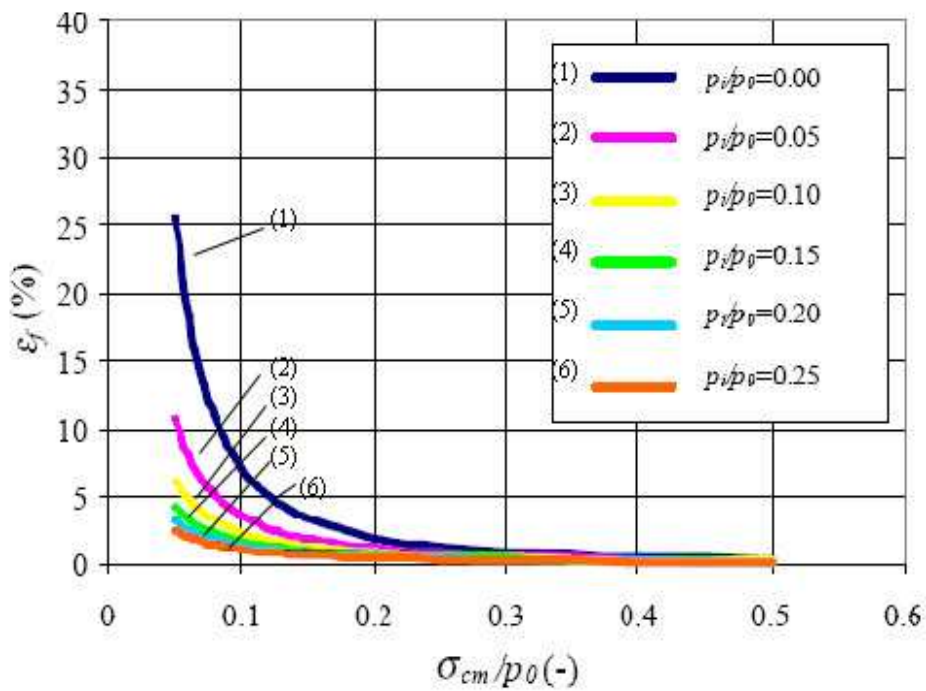
σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ، H عمق تونل از سطح زمین، P_0 تنش برجا، γ وزن مخصوص توده سنگ می‌باشد. در جدول ۳ طبقه‌بندی فشارندگی بر اساس روش جتوا ارائه شده است [۴].

جدول ۳: طبقه بندی فشارندگی مطابق با نظریه جتوا و مکاران [۴].

N_c	نوع رفتار
< ۰/۴	فشارندگی زیاد
۰/۴ - ۰/۸	فشارندگی متوسط
۰/۸ - ۲	فشارندگی ملایم
> ۲	غیر فشارنده



شکل ۳: کرنش در جداره تونل ϵ_t برای دامنه‌ای از مقادیر σ_{cm}/p_0 و فشار داخلی سیستم نگهداری p_i [۵].



شکل ۴: کرنش در جبهه کار تونل ϵ_r برای دامنه‌ای از مقادیر σ_{cm}/p_0 و فشار داخلی سیستم نگهداری p_i [۵].

۲- مفهوم کلی این روش بر پایه مقایسه پاسخ تنش - کرنش سنگ در آزمایشگاه و پاسخ تنش - کرنش در اطراف تونل است که اطلاعات آزمایشگاهی در خصوص تونل مورد مطالعه دقت کافی برای محاسبات مورد نیاز در این روش را ندارند.

از روش تئوری - تحلیلی برای تخمین مقدار فشارندگی به دلایل زیر نمی‌توان استفاده نمود.

۱- در این روش مقدار مقاومت فشاری سنگ بکر با توده سنگ برابر فرض می‌شود که چنین فرضی برای تونل مورد مطالعه صحیح نمی‌باشد.

کلی با شیل‌ها همراه است)، بازالیت و دولومیت [۹]. در مسیر تونل منطقه گسلی نیز قرار دارد. در جدول ۴ اطلاعات زمین‌شناسی مسیر حفر شده تونل و وضعیت کیفی تغییر شکل‌ها و حالت عمومی تونل ارائه شده است.

۳-۲- بررسی پدیده فشارندگی

جهت برآورد پارامترهای اولیه مورد نیاز در روش‌های بکار گرفته شده، ابتدا با مشخص کردن نوع واحدهای سنگی در مسیر حفر تونل، مقادیر کیفی توده سنگ‌های مسیر تونل، ارتفاع روباره در محل حفر، عرض دهانه تونل، مشخصات ژئومکانیکی سنگ بکر و توده سنگ‌ها تهیه و سپس مقادیر پارامترهای ثانویه محاسبه گردیدند.

آنگاه با توجه به نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای بین روش‌های مورد استفاده انجام گرفته و رفتار واحدهای سنگی در هر سازند مشخص شده است.

از روش‌های مختلف ارائه شده، روش تئوری،-تحلیلی در خصوص این تونل به دلیل نبود اطلاعات مربوط به مقادیر واقعی تنش‌های مماسی و شعاعی کاربرد نداشته و لذا استفاده نشده است. از روش‌های تجربی دو روش سینگ و گوئل انتخاب شدند. بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های قبلی و معادلات ۱ و ۲ وضعیت فشارندگی برای تونل مورد مطالعه تعیین و در جدول ۵ ارائه شده است.

۳- محاسبات نهایی و نتیجه‌گیری در این روش برپایه راه حل تحلیلی فرم بسته، که بر اساس محاسبه سطح کرنش در محیط تونل دایره‌ای تحت میدان تنش هیدروستاتیک قرار گرفته، می‌باشد. تونل مورد مطالعه با مقطع نعل اسبی بوده، لذا نمی‌توان از این روش برای تخمین فشارندگی در آن استفاده کرد.

۳- مطالعه موردی

تونل جدیدالاحداث امامزاده هاشم به طول ۳۲۸۰ متر در مسیر جاده تهران- آمل، به خاطر بهمن‌گیر بودن این مسیر و همچنین کاهش زمان و هزینه رفت و آمد در این مسیر، در حال احداث می‌باشد [۹]. از دو طرف ورود و خروج در حال استخراج بوده و حدود ۱۳۷۰ متر آنها حفاری شده است. در مقاطع مشخص از تونل به جهت اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها اقدام به نصب ابزار همگرایی سنج شده است. در این تحقیق روش‌های مختلف تعیین پدیده فشارندگی در حین حفر برای این تونل مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و سپس نتایج حاصل از روش‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۳-۱- زمین‌شناسی و شرایط ژئوتکنیکی تونل مورد مطالعه

این تونل در توده سنگ‌هایی حفاری می‌شود که به ترتیب فراوانی عبارتند از: شیل، سنگ آهک، ماسه سنگ (که به طور

جدول ۴: اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی تونل مورد مطالعه [۹].

مشاهدات عینی	σ_{cm} (MPa)	σ_{ci} (MPa)	γ (MN/m ³)	Q	H (m)	نام و جنس سازند	علامت اختصاری
تغییر شکل نسبتاً زیاد	۵/۶۵	۷۲	۰/۰۲۷	۲/۸۷	۳۵۰	سنگ آهک سازند مبارک	$Cm_{1,2}b$
تغییر شکل نسبتاً زیاد	۲/۲۶	۶۱/۴	۰/۰۲۷	۱/۱۳	۲۹۵	آهک مبارک با میان لایه مارنی	Cm_1a
تغییر شکل زیاد	۶/۴۱	۸۱/۸	۰/۰۲۷	۱/۹۳	۳۸۵	آهک ضخیم لایه سازند مبارک	$Cml_{1,2}$
تغییر شکل کم	۶/۲۷	۱۰۵	۰/۰۲۶	۱/۸۳	۱۷۰	ماسه سنگ کوارتزی شمشک	Jss
تغییر شکل زیاد	۲/۱۴	۵۸/۲	۰/۰۲۶	۱/۰۵	۱۵۰	ماسه سنگ و شیل شمشک	$Jssh$
تغییر شکل بسیار زیاد(ریزش)	۰/۴۵	۲۵	۰/۰۲۵	۱/۰۱	۲۷۰	شیل و ماسه سنگ شمشک	Jsh
تغییر شکل بسیار زیاد(ریزش)	۰/۴۵	۲۵	۰/۰۲۵	۱/۰۱	۲۰۵	مارن با میان لایه سنگ آهکی	Cmm

جدول ۵: بررسی استعداد فشارندگی به روش سینگ و گوئل

توده سنگ	P_o	N	سینگ	گوئل
$Cm_{1,2}b$	۹/۵	۷/۵	۴۹۷	۴۱۷
Cm_1a	۷/۷	۲/۳	۳۰۷	۲۸۱
$Cml_{1,2}$	۱۰/۵	۴/۸	۴۷۹	۳۶۰
Jss	۴/۳	۴/۶	۲۰۸	۳۵۴
$Jssh$	۳/۷۵	۲	۱۵۲	۲۷۰
Jsh	۷	۰/۷	۲۶۸	۱۹۰
Cmm	۵/۱۳	۰/۷	۲۰۳	۱۹۰

از روش‌های نیمه تجربی ابتدا روش جتوا انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس اطلاعات موجود و رابطه ۳، مقدار N_c برای لایه‌های مختلف مشخص شد. در جدول ۶ پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه فشارندگی و مقدار آن به روش جتوا ارائه شده است.

جدول ۶: داده‌های مورد نیاز تخمین فشارندگی و مقدار آن به روش جتوا.

توده سنگ	P_o	N_c
$Cm_{1,2}b$	۹/۵	۰/۶
Cm_1a	۷/۷	۰/۳
$Cml_{1,2}$	۱۰/۵	۰/۶۱
Jss	۴/۳	۱/۴۶
$Jssh$	۳/۷۵	۰/۵۷
Jsh	۷	۰/۰۶۴
Cmm	۵/۱۳	۰/۰۸۸

سپس روش هوک و مارینوس مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس اطلاعات موجود و روابط ۴ و ۵ و شکل‌های ۳ و ۴، مقادیر پارامترهای ϵ_f و ϵ_i محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج محاسبات فشارندگی به روش‌های مختلف در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷: ارزیابی فشارندگی در جداره و سینه کار تونل به روش هوک و مارینوس

توده سنگ	ϵ_i	ϵ_f
$Cm_{1,2}b$	۰/۴	۰/۲۶
Cm_1a	۱/۴۵	۰/۹۷
$Cml_{1,2}$	۰/۳۸	۰/۲۵
Jss	۰/۰۸	۰/۰۵
$Jssh$	۰/۴۳	۰/۲۸
Jsh	۲۴/۱۷	۱۶/۱۲
Cmm	۱۳/۶	۹/۰۶

در مسیر حفر تونل با توجه به تغییر شکل‌های ایجاد شده از زمان حفر و ریزش‌های در نقاط مشخص از تونل وضعیت فشارندگی مشخص شده است. همانطور که در جدول ۸ مشخص می‌باشد روش‌های سینگ و گوئل با آنچه که در تونل رخ داده است کاملاً متناقض می‌باشد که این به دلیل تجربی بودن این دو روش است. اما در روش‌های نیمه تجربی جتوا و گوئل این تناقض به چشم نمی‌خورد و نتایج بدست آمده با رخدادهای مسیر تونل همخوانی بیشتری دارد.

جدول ۸: نتایج ارزیابی فشارندگی به روش‌های مختلف.

توده سنگ	سینگ	گوئل	جتوا	هوک و مارینوس	مشاهدات عینی
$Cm_{1,2}b$	غیر فشارنده	فشارنده	فشارندگی متوسط	فشارندگی ندارد	تغییر شکل نسبتاً زیاد
Cm_1a	غیر فشارنده	غیر فشارنده	فشارندگی زیاد	فشارندگی کم	تغییر شکل نسبتاً زیاد
$Cml_{1,2}$	غیر فشارنده	غیر فشارنده	فشارندگی متوسط	فشارندگی ندارد	تغییر شکل زیاد
Jss	غیر فشارنده	غیر فشارنده	فشارندگی ملایم	فشارندگی ندارد	تغییر شکل کم
$Jssh$	غیر فشارنده	غیر فشارنده	فشارندگی متوسط	فشارندگی ندارد	تغییر شکل زیاد
Jsh	فشارنده	فشارنده	فشارندگی زیاد	فشارندگی بسیار زیاد	تغییر شکل بسیار زیاد (ریزش)
Cmm	فشارنده	فشارنده	فشارندگی زیاد	فشارندگی بسیار زیاد	تغییر شکل بسیار زیاد (ریزش)

۵- نتیجه گیری

مقدار فشارندگی در شیل سازند شمشک زیاد بوده و همچنین بیشترین فشارندگی تاکنون در این سازند مشاهده شده است. مارن با میان لایه سنگ آهکی و سنگ آهک ضخیم لایه سازند مبارک بعد از شیل شمشک، دارای بیشترین فشارندگی در مسیر تونل می‌باشند. سنگ آهک و سنگ آهک با میان لایه مارنی در سازند مبارک دارای فشارندگی متوسط هستند که احتمال ریزش در این سازندها کمتر می‌باشد. در ماسه سنگ کوارتزی شمشک و ماسه سنگ و شیل شمشک، احتمال فشارندگی ضعیف می‌باشد و به همین خاطر عملیاتی که برای نگهداری تونل، هنگام حفاری نیاز می‌باشد به مراتب کمتر از نگهداری‌های مورد نیاز هنگام حفاری در سازندهایی که نام برده شد، می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده و مقایسه آنها و با توجه به رخدادهای صورت گرفته در حفاری تونل و همچنین با توجه به ریزش‌های اتفاق افتاده در هنگام حفر تونل، می‌توان نتیجه گرفت که روش جتو رفتارهای واقع بینانه‌تری از توده سنگ‌های متعلق به سازندهای دربرگیرنده مسیر تونل را ارائه نموده است.

۶- منابع

- [7] Barla, G.; 2001; "*Tunneling under squeezing rock conditions*"; Department of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino.
- [8] Aydan Ö., Akagi T., Kawamoto T.; 1993; "*The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction*"; Rock Mechanics and Rock Engineering, 2, pp. 137-163.
- [۹] مجموعه گزارشات شرکت مشاورین ایران استن در مورد تونل شماره یک امامزاده‌هاشم.

- [1] Bieniawski Z.T.; 1989; "*Engineering rock mass classifications*". John Wiley & Rotterdam.
- [7] Kovari, K.; 1998; "*Tunneling in squeezing Rock*"; Elsevier Science Ltd.
- [3] Singh B. and Goel R.K.; 1999; "*Rock mass classification: a practical approach in Civil Engineering*"; Elsevier Science Ltd. U.K.
- [4] Jethwa J.L., and Singh B.; 1984; "*Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions-a new approach*"; Design and Performance of Underground Excavations, ISRM Symposium, Cambridge, E.T. Brown and J.A.Hudsoneds., pp. 231-238.
- [5] Hoek, E.; 2000; "*Big Tunnels in Bad Rock*"; Draft of paper to be submitted for publication in the ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Terzaghi Lecture, Seattle.
- [6] Barla, G.; 1995; "*Squeezing rocks in tunnels*"; ISRM News Journal, 3/4, pp. 44-49.