

تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت با روش همگرایی - همجواری و معیار شکست هوک - براون

حسن بخشنده امنیه^{۱*}، سعید طایی سمیرمی^۲، مرتضی رحیمی دیزجی^۳، حکیمه پیرمردیان^۴

دریافت مقاله: ۹۱/۰۶/۰۵ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۶/۱۱

چکیده

تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل‌ها یکی از موضوعات مهم در طراحی عملیات حفر تونل‌ها می‌باشد. با استفاده از روش همگرایی-همجواری، مقدار بار اعمال شده به سیستم نگهداری نصب شده در پشت سینه‌کار تونل تخمین زده می‌شود. از طرفی با کنترل میزان همگرایی توده‌سنگ‌های درزه‌دار که باعث کاهش مقاومت توده‌سنگ می‌شود می‌توان رفتار این گونه سنگ‌ها را بررسی کرد. Carranza-Torres and Fairhurst با استفاده از جدیدترین رابطه Hoek - Brown که برای شکست توده‌سنگ ارائه شده روش تجربی برای تعیین رابطه‌ی بین پارامترهای معرف مقاومت توده‌سنگ و عکس‌العمل مکانیکی فضاهای زیرزمینی استوانه‌ای شکل ارائه کرده‌اند. در این مقاله با استفاده از روش Carranza-Torres and Fairhurst منحنی واکنش زمین برای تونل بلند سد سردشت برآورد گردید. با توجه به نتایج حاصل از روش تجربی و نرم‌افزار عددی تفاضل محدود FLAC 3D، مشخص شد که روش Carranza-Torres and Fairhurst و معیار شکست Hoek - Brown برای تونل بلند سد سردشت کاربردی بوده و محاسبه ضریب اطمینان برابر با ۳/۱۴ نشان دهنده پایداری پوشش سگمندی تونل بلند سد سردشت در برابر بارهای اعمال شده است.

کلید واژه‌ها: تونل بلند، روش همگرایی - همجواری، معیار Hoek - Brown، روش Carranza-Torres and Fairhurst.

۱. دانشیار گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان bakhshandeh@kashanu.ac.ir

۲. کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، شرکت مهندسی سپاسد

۳. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، شرکت مهندسی سپاسد

۴. دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

* مسئول مکاتبات

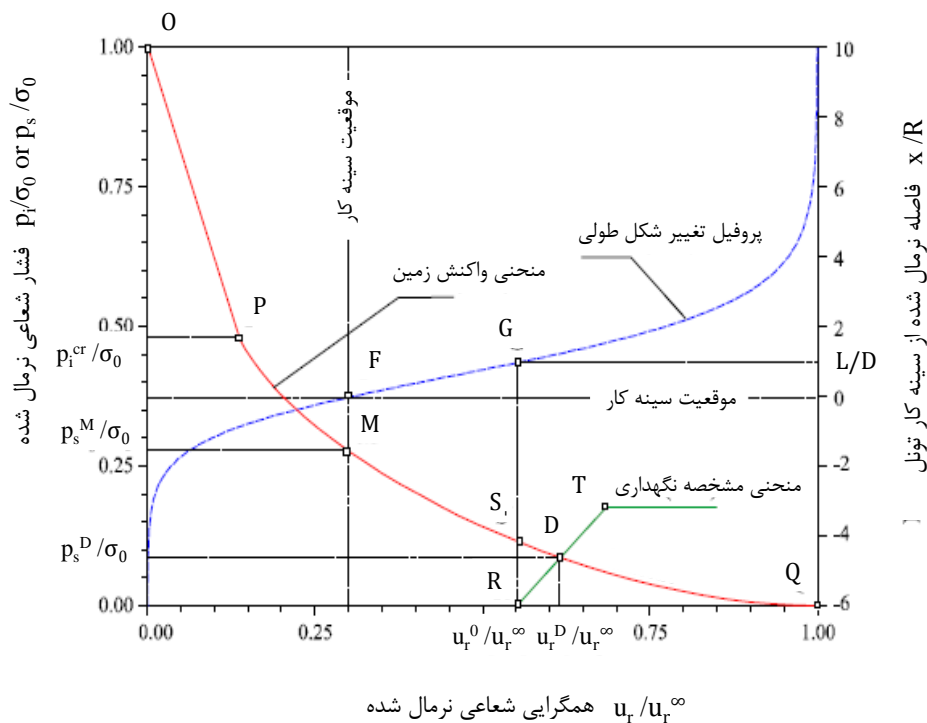
۱. مقدمه

تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل‌ها یکی از نکات قابل توجه مهندس طراح در حین حفر تونل‌ها می‌باشد. اگرچه اطلاعات زمین شناسی حاصل از گمانه‌های حفاری که معمولاً با پیشروی تونل نیز قابل دسترس می‌باشد به مهندسان کمک می‌کند، اما توده‌سنگ پشت سینه کار تونل می‌تواند رفتار متفاوتی از آنچه که پیش‌بینی می‌شود، مخصوصاً نسبت به قابلیت تغییر شکل پذیری و مقاومت توده‌سنگ از خود نشان دهد. بنابراین سیستم نگهداری تونل که عامل تثبیت کننده تونل‌ها است، باید با شرایط متغیر توده‌سنگ تطبیق داده شود. روش همگرایی - همجواری می‌تواند بارهای وارد شده به سیستم نگهداری پشت سینه‌کار تونل را تخمین بزند. حضور درزه‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی، ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ را در مقایسه با خصوصیات مشابه نمونه سنگ سالم کاهش می‌دهد. روش‌های تجربی متنوعی برای تعیین خصوصیات توده‌سنگ پیشنهاد شده است که از این میان معیار شکست توده‌سنگ Hoek - Brown بیشترین کاربرد را دارد. این معیار با در نظر گرفتن خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ می‌تواند مقاومت کاهش یافته‌ی توده‌سنگ را تخمین بزند. (Londe (1988 نشان داد که می‌توان معیار شکست Hoek - Brown را به یک پوش شکست عمومی که به پارامترهای σ_{ci} ، m_b و S وابسته نیست، تبدیل کرد که برای استفاده در روش همگرایی - همجواری مناسب است. Carranza-Torres and Fairhurst با استفاده از فرمول لوند رابطه‌ای بین پارامترهای معرف مقاومت توده‌سنگ و عکس‌العمل مکانیکی فضاهای زیرزمینی استوانه‌ای شکل ارائه داده‌اند (Hoek et al., 2002, Carranza - Torres and Fairhurst, 2001, Londe, 1988). بخشنده و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی آزمایش‌های سه محوره بر روی توده‌سنگ اسلیتی سد سردشت به این نتیجه رسیدند که عوارض توده‌سنگ شامل ناپیوستگی‌ها و کلیواژ بر مقدار پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ اسلیتی از جمله

مقاومت فشاری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ثابت‌های m و s در معیار Hoek - Brown تأثیر قابل توجهی دارد (بخشنده و همکاران، ۱۳۹۱). در این مقاله به منظور اعتبارسنجی روش عددی از روش‌های تجربی معیار شکست Hoek - Brown، همگرایی - همجواری و Carranza-Torres and Fairhurst، سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت از لحاظ پایداری و ایمنی بررسی شده است.

۲. روش همگرایی - همجواری

با استفاده از روش همگرایی - همجواری، مقدار بار اعمال شده به سیستم نگهداری نصب شده در پشت سینه‌کار تونل تخمین زده می‌شود. اجزاء اصلی روش همگرایی - همجواری، منحنی واکنش زمین (GRC)، پروفیل تغییر شکل طولی (LDP) و منحنی مشخصه نگهداری (SCC) می‌باشند. در شکل ۱ محور افقی برابر با جابجایی شعاعی u_r مقطع نسبت به جابجایی شعاعی ماکزیمم u_r^∞ است. محور عمودی سمت راست، فاصله مقطع از سینه‌کار تونل را نسبت به شعاع تونل نشان می‌دهد. مقادیر منفی بخش جلوی سینه‌کار تونل و مقادیر مثبت پشت سینه‌کار تونل را نشان می‌دهد. منحنی LDP مقدار جابجایی شعاعی دیواره تونل در طول محور تونل بدون سیستم نگهداری را نشان می‌دهد. این جابجایی در فاصله حدود ۴ برابر شعاع تونل در جلوی سینه‌کار صفر شده و در فاصله حدود ۸ برابر شعاع تونل در پشت سینه‌کار به مقدار ماکزیمم می‌رسد. منحنی‌های GRC و SCC فشار واکنش p_i و p_s به ترتیب برای زمین و سیستم نگهداری را نشان می‌دهند و بعنوان تابعی از جابجایی شعاعی u_r هستند. فشار p_s^D که با نقطه D مشخص می‌شود، توسط توده‌سنگ به سیستم نگهداری منتقل می‌شود (فرخ، ۱۳۸۶، Carranza-Torres and Fairhurst, 2001).



شکل ۱. اثر تقابل سه منحنی SCC و GRC، LDP (Carranza-Torres and Fairhurst, 2001)

زمین‌شناسی GSI می‌باشد. پارامترهای s و a نیز به صورت تجربی به مقدار GSI وابسته هستند. (1988) Londe نشان داد که می‌توان رابطه ۱ را به یک پوش شکست عمومی که وابسته به پارامترهای σ_{ci} ، m_b و s نیست، تبدیل کرد. در این تبدیل (که برای حالت خاص $a=0.5$ اعمال شده است) مقادیر تنش به مقدار $m_b \sigma_{ci}$ تقسیم می‌شود و به این مقدار تقسیم شده مقدار s/m_b^2 اضافه می‌شود. بنابراین با اعمال این تبدیل بر روی تنش‌های σ_1 و σ_3 ، تنش‌های مقیاس‌بندی شده S_1 و S_3 به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شوند:

$$S_1 = \frac{\sigma_1}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2}, S_3 = \frac{\sigma_3}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (2)$$

با جایگزین کردن σ_1 و σ_3 در رابطه ۱ با S_1 و S_3 ، معیار شکست توده‌سنگ به صورت رابطه ۳ نوشته می‌شود:

$$S_1 = S_3 + \sqrt{S_3} \quad (3)$$

به منظور شرح استفاده از فرمول لوند، نتایج آزمایش‌های سه محوره برای نمونه‌های گرانیت، دلریت و مرمر بررسی شده

۳. منحنی واکنش زمین با توجه به معیار شکست - Hoek

Brown و روش Carranza-Torres and Fairhurst

معیار شکست Hoek - Brown به عنوان یک روش پر کاربرد در تعیین شرایط تنش توده‌سنگی که به صورت غیرخطی تغییر شکل می‌دهد، شناخته شده است. پارامترهای معیار - Hoek Brown از نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مغزه‌های ماده سنگ و از یک تبدیل تجربی برای در نظر گرفتن مقاومت کاهش یافته توده‌سنگ به واسطه حضور ضعف‌ها و ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ به دست می‌آید. Hoek - Brown در سال ۱۹۹۷ معیار شکست زیر را برای توده سنگ ارائه کردند (Hoek and Diederichs, 2006):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

که در آن σ_{ci} مقاومت فشاری تک محوره ماده‌سنگ (MPa)، σ_1 تنش محوری که منجر به شکست نمونه می‌شود (MPa)، σ_3 تنش محصور کننده اعمال شده به نمونه (MPa) پارامتر m_b وابسته به پارامتر m_i توده‌سنگ و مقدار شاخص مقاومتی

فشار بحرانی مقیاس‌بندی شده به صورت رابطه ۵ است:

$$P_i^{cr} = \frac{1}{16} (1 - \sqrt{1 + 16S_0})^2 \quad (5)$$

فشار بحرانی واقعی از معکوس معادله بالا به دست می‌آید.

$$p_i^{cr} = \left[P_i^{cr} - \frac{s}{m_b^2} \right] m_b \sigma_{ci} \quad (6)$$

در حالتی که $p_i > p_i^{cr}$ است جابجایی شعاعی قسمت الاستیک منحنی واکنش زمین به صورت رابطه ۷ است:

$$u_r^{el} = \frac{\sigma_0 - p_i}{2G_m} R \quad (7)$$

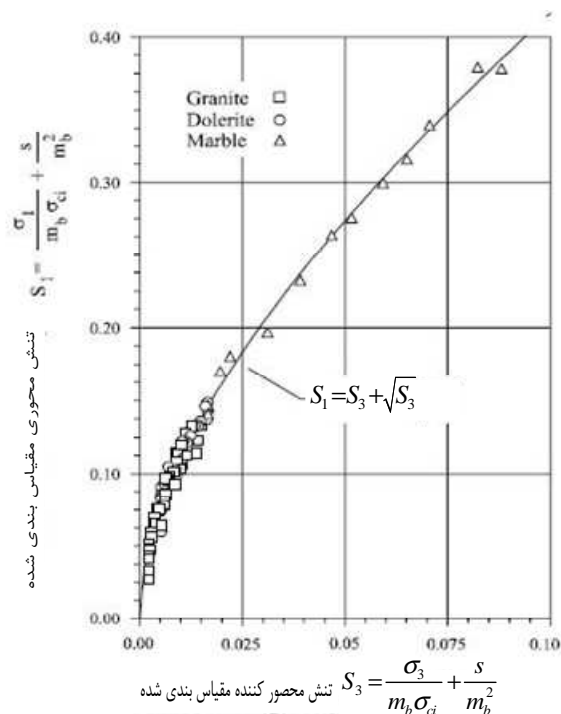
در حالتی که $p_i < p_i^{cr}$ است، شعاع منطقه پلاستیک اطراف تونل برابر خواهد بود با:

$$R_{pl} = R \exp \left(2(\sqrt{P_i^{cr}} - \sqrt{P_i}) \right) \quad (8)$$

برای تعیین قسمت پلاستیک منحنی GRC یک قانون جریان برای مواد مورد نیاز است. طبق نظر Atkinson در سال ۱۹۹۳ قانون جریان رابطه بین کرنش‌های اعوجاجی و عوامل به وجود آورنده تغییرات حجمی هنگام تغییرات پلاستیک در ماده می‌باشد (Atkinson, 1993). مقدار تغییر حجمی توسط زاویه اتساع (ψ) تعیین می‌شود. ضریب اتساع به صورت Fairhurst and Carranza- $K_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$ محاسبه می‌شود (Torres, 2002).

در نهایت جابجایی شعاعی در منطقه پلاستیک برابر خواهد بود با (Carranza-Torres and Fairhurst, 1999):

است. در شکل ۲ اطلاعات موجود از σ_1 و σ_3 همراه با معادله شکست Hoek - Brown در فضای دو محور عمود بر هم از تنش‌های اصلی مقیاس‌بندی شده نشان داده شده است (Carranza-Torres and Fairhurst, 2001, Londe, 1988).



شکل ۲. نتایج آزمایش‌های سه محوره با منحنی تنش‌های

مقیاس‌بندی شده (Carranza-Torres and Fairhurst, 2001)

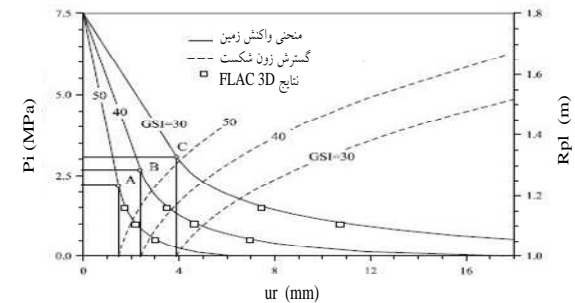
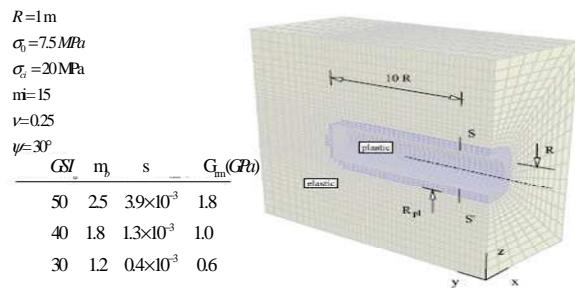
دو متغیر P_i (فشار داخلی مقیاس‌بندی شده) و S_0 (تنش اولیه مقیاس‌بندی شده) نیز با توجه به روش Carranza-Torres and Fairhurst به صورت رابطه ۴ می‌باشند (Fairhurst and Carranza-Torres, 2002):

$$P_i = \frac{p_i}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad S_0 = \frac{\sigma_0}{m_b \sigma_{ci}} + \frac{s}{m_b^2} \quad (9)$$

$$\frac{u_r}{R} \frac{2G_m}{\sigma_0 - p_i^{cr}} = \frac{k_\psi - 1}{k_\psi + 1} + \frac{2}{k_\psi + 1} \left(\frac{R_{pl}}{R} \right)^{k_\psi + 1} + \frac{1 - 2\nu}{4(S_0 - P_i^{cr})} \left[\ln \left(\frac{R_{pl}}{R} \right) \right]^2 - \left[\frac{1 - 2\nu}{k_\psi + 1} \frac{\sqrt{P_i^{cr}}}{S_0 - P_i^{cr}} + \frac{1 - \nu}{2} \frac{k_\psi - 1}{(k_\psi + 1)^2} \frac{1}{S_0 - P_i^{cr}} \right] \times \left[(k_\psi + 1) \ln \left(\frac{R_{pl}}{R} \right) - \left(\frac{R_{pl}}{R} \right)^{k_\psi + 1} + 1 \right] \quad (9)$$

۴. موقعیت زمین شناسی و جغرافیایی سد سردشت

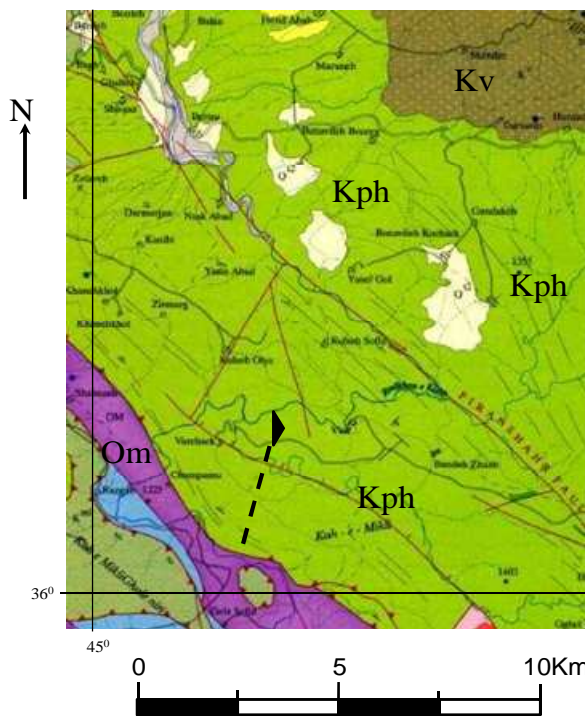
طرح سد و نیروگاه سردشت در شمال غربی ایران و در جنوب غربی شهرستان سردشت از استان آذربایجان غربی در مختصات جغرافیایی ۳۳° - ۴۵° طول شرقی و ۳۶° - ۰۴° عرض شمالی و بر روی رودخانه کلاس (شکل ۴) قرار گرفته است. ورودی تونل انتقال آب در تکیه‌گاه چپ سد واقع شده که دسترسی به آن از طریق ساختگاه سد امکان‌پذیر است. کاربری تونل بلند سد سردشت از نوع آب بر و تحت فشار می‌باشد. طول کلی تونل از بخش ورودی تا خروجی حدود ۴۳۰۰ متر خواهد بود. پروژه حفاری مکانیزه شامل یک رشته تونل به طول ۴۰۰۰ متر و قطر ۶،۵۴ متر می‌باشد که وظیفه انتقال آب را به عهده دارد (سپاسد - فراب، خرداد ۱۳۹۰). همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده، ساختگاه سد و سازه‌های مربوطه در پهنه گسترده‌ای از ردیف رسوبی کرتاسه قرار گرفته که دگرگونی ضعیفی را نیز پشت سر گذاشته است.



شکل ۳. رسم منحنی واکنش زمین در شرایط مختلف

ژئومکانیکی توده سنگ (Carranza-Torres and Fairhurst, 2001)

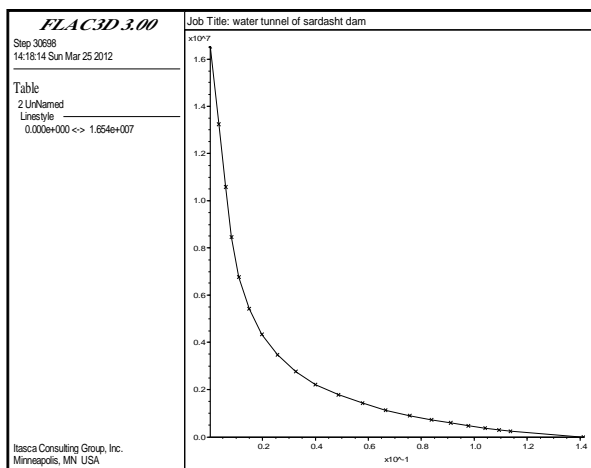
ژئومکانیکی توده سنگ Carranza-Torres and Fairhurst برای بررسی روابط به دست آمده، آزمایش‌هایی را بر روی تونل‌های مختلف انجام دادند که به عنوان مثال رسم منحنی GRC با پارامترهای مختلف ژئومکانیکی در شکل ۳ نشان داده شده است.



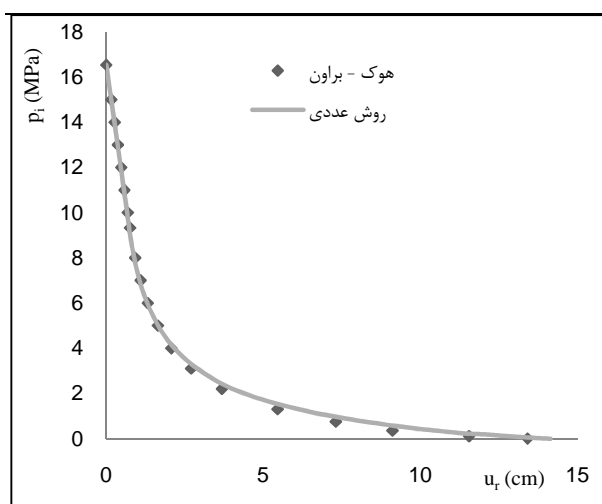
راه‌نما	
تناوب ماسه‌سنگ دگرگون شده، فیلیت و اسلیت	Kph
سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده	Kv
افیولیت ملانژ	Om
محور سد	▶
تونل انتقال	---
رودخانه	—

شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی سد سردشت (مهندسین مشاور سپاسد - فراب، ۱۳۹۰)

نرم افزار 3D FLAC رسم شده که نتیجه‌ی آن برای زون با روباره ۵۵۰ متر در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل محور افقی نمودار جابجایی دیواره تونل برحسب متر می‌باشد و محور قائم نمودار مقدار فشار داخلی تونل برحسب مگاپاسکال را نشان می‌دهد. نتیجه حاصل از رسم منحنی واکنش زمین با روش‌های عددی و روش تجربی Carranza-Torres and Fairhurst در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود به ازای تمامی مقادیر فشار داخلی، دو نمودار تقریباً با هم انطباق خوبی دارند.



شکل ۵. رسم منحنی واکنش زمین تونل بلند سد سردشت با روش عددی



شکل ۶. انطباق روش‌های عددی و تجربی در رسم منحنی واکنش زمین

این پهنه گسترده که به لحاظ ترکیب سنگ‌شناختی اولیه از تناوب شیل و ماسه‌سنگ تشکیل شده تحت اثر دگرگونی دینامیکی به تناوب اسلیت و فیلیت تبدیل شده است. بررسی گمانه‌های اکتشافی نشان می‌دهد که اکثر درزه‌ها به صورت مایل نسبت به محور حفاری واقع شده‌اند. مقدار بازشدگی سطح درزه نیز در درزه‌های باز بین ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر است که از این رو بازشدگی درزه‌ها قابل ملاحظه نیست، سطح ۶۰ درصد درزه‌ها نیز صاف و نزدیک به ۴۰ درصد به صورت نامنظم است. به لحاظ درجه هوازدگی نیز سطوح درزه‌ها عموماً در حد اندکی هوازده تا سالم ارزیابی شده‌اند. کلیواژ به عنوان مهم‌ترین اثر ناهمسانگردی در توده‌سنگ مطرح است که تنش‌های اصلی حاکم بر منطقه باعث ایجاد سیستم کلیواژ در توده‌سنگ شده و جهت شیب عمومی آن به سمت شمال شرق است (سپاسد - فراب، مرداد ۱۳۹۰). با توجه به تغییرات مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ و ضخامت روباره مسیر تونل بلند و اطلاعات حاصل از نرم‌افزار Roclab، اگر زون‌ها با تغییرات ۵۰ متری روباره در نظر گرفته شود، تغییرات در چسبندگی و زاویه اصطکاک خیلی قابل توجه نیست. لذا با تقسیم به زون‌های ۵۰ متری، تونل به ۱۱ زون تقسیم می‌شود، که مشخصات آن با توجه به اثر کلیواژ بر توده‌سنگ در جدول ۱ نشان داده شده است.

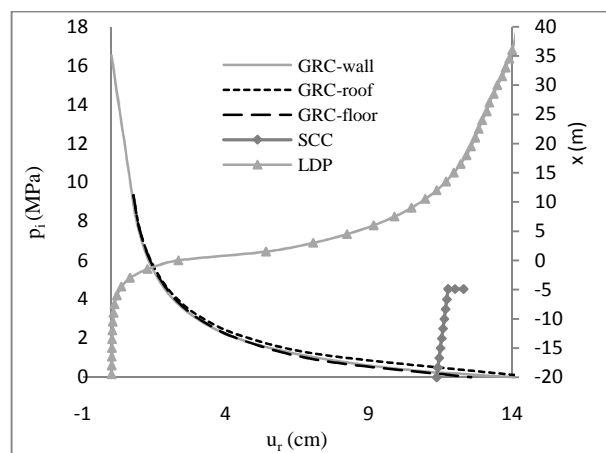
۵. تحلیل پایداری سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت با روش‌های تحلیلی و عددی

به علت اینکه روابط (Londe 1988) بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه سنگ‌های مختلف به دست آمده است و شرایط توده‌سنگ تونل بلند سد سردشت بسیار درزه‌دار و پیوسته است، روش‌های تجربی Hoek - Brown و Carranza-Torres and Fairhurst در این نوع توده‌سنگ بهتر قابل کاربرد است. جهت برآورد پایداری پوشش از روش همگرایی - همجواری استفاده شده است. اجزاء این روش، از جمله منحنی‌های GRC و LDP با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی و منحنی SCC با استفاده از روابط ریاضی به دست آمده و از ترکیب آن‌ها بار وارد بر پوشش سگممتی محاسبه شده است. منحنی واکنش زمین در روش عددی با

جدول ۱. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ مسیر تونل بلند سد سردشت با توجه به زون‌های مختلف

C (MPa)	ϕ (Deg)	m_i	m_b	s	σ_{ci} (MPa)	GSI	عمق آب زیرزمینی (m)	عمق روباره (m)
۰/۱۷	۳۷	۷	۰/۶۸	۰/۰۰۰۷	۲۰	۳۵	۲۲	۵۰
۰/۲۶۵	۳۲/۵۲	۷	۰/۶۸۷	۰/۰۰۰۷	۲۲	۳۵	۵۲	۱۰۰
۰/۴۱۳	۳۲	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۱۱۰	۱۵۰
۰/۴۸۸	۳۰/۶	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۱۴۰	۲۰۰
۰/۵۵۷	۲۸/۹۳	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۱۹۰	۲۵۰
۰/۶۲۱	۲۷/۵۹	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۲۱۵	۳۰۰
۰/۶۸۱	۲۶/۴۷	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۲۶۰	۳۵۰
۰/۷۳۷	۲۵/۵۲	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۱۹۰	۴۰۰
۰/۷۹۱	۲۴/۶۸	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۲۰۰	۴۵۰
۰/۸۴۲	۲۳/۹۵	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۲۱۰	۵۰۰
۰/۸۹۱	۲۳/۳۰	۷	۰/۸۲	۰/۰۰۱۳	۲۷	۴۰	۲۳۰	۵۵۰

روی محور قائم سمت راست فاصله سیستم نگهداری از سینه کار (۱۲ متر) مشخص شده و با قطع نمودار پروفیل طولی به صورت افقی و قطع محور افقی جابجایی به صورت قائم، محل شروع منحنی مشخصه سیستم نگهداری تعیین می‌شود. در ادامه می‌توان از محل تقاطع منحنی واکنش زمین و منحنی مشخصه سیستم نگهداری میزان بار وارده بر پوشش تعیین می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل از روش همگرایی-همجواری، بیشترین فشار وارده بر سیستم نگهداری از سوی زمین در زون با روباره ۵۵۰ متر و برابر با ۰/۴۳۳ مگاپاسکال است.



شکل ۷. تعیین بار وارد بر پوشش با روش همگرایی-

همجواری

برای رسم منحنی مشخصه پوشش سگمتی، شعاع خارجی ۳/۱۵ متر، ضخامت پوشش ۰/۳۰ متر، ضریب پواسون ۰/۲۵، مدول یانگ ۳۵ گیگاپاسکال، مقاومت فشاری تک محوری پوشش ۵۰ مگاپاسکال و فاصله کله حفار دستگاه EPB TBM تا محل نصب سگمنت ۱۲ متر در نظر گرفته شده است. فشار نگهداری (p_s) و ماکزیمم فشار قابل تحمل (p_s^{\max}) به وسیله سیستم نگهداری به صورت زیر محاسبه شده است.

(۱۰)

$$K_s = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \frac{e}{R} + \frac{E_s}{1-\nu_s^2} \frac{I}{R^3} = 3558.18 \text{ (MPa)} \quad p_s = (K_s) \frac{u}{R} \quad (11)$$

$$p_s^{\max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \left(\frac{R-e}{R} \right)^2 \right] = 4.535 \text{ MPa}$$

در رابطه‌های بالا K_s سختی سیستم نگهداری، I ممان اینرسی سطح بوده و برابر است با $I = e^3/12$ ، e ضخامت پوشش بتنی، E_s مدول یانگ سیستم نگهداری، ν_s نسبت پواسون سیستم نگهداری و σ_{cc} مقاومت فشاری تک محوره بتن است. با ترسیم همزمان منحنی‌های GRC، LDP و SCC می‌توان بار وارده بر پوشش تونل را تعیین کرد. برای نمونه نحوه تعیین بار روی پوشش تونل در زون با روباره ۵۵۰ متر طبق شکل ۷ تشریح شده است. برای این منظور با توجه به شکل ۷ ابتدا در

$$u_r = \varepsilon_c \times R \quad (13)$$

که در آن ε_c کرنش بحرانی در حالت اعمال تنش، E مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ بر حسب u_r ، $Kgf \cdot cm^{-2}$ ، جابجایی برحسب متر و R شعاع فضای زیرزمینی برحسب متر می‌باشد. کرنش بحرانی حاصل از تراز هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی نگهداری فضاهاى زیرزمینی مهندسی پیشنهاد شده است. شکل ۸ کنتور جابجایی بعد از اعمال سیستم نگهداری در تونل بلند سد سردشت را نشان می‌دهد، که با توجه به نتایج جدول ۲ توده سنگ پایدار است.

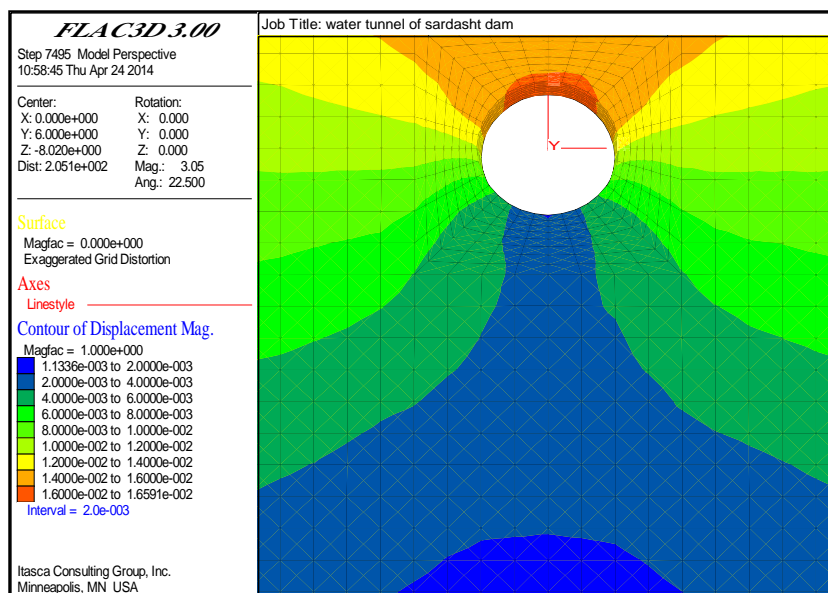
۱-۵. کنترل پایداری سیستم نگهداری تونل بلند سد سردشت برای بررسی پایداری توده سنگ اطراف تونل بلند بایستی مقدار تراز هشدار خطر برای توده سنگ تعیین و با پارامتر اندازه گیری شده مانند کرنش بحرانی، مقایسه گردد. اگر مقدار اندازه گیری شده از سطح هشدار خطر کمتر باشد، توده سنگ و سازه پایدار می‌باشد. جابجایی مجاز از روابط (Sakurai (1999) به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ تعیین شده‌اند:

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{Log } E - 1.22 \quad (12)$$

تراز هشدار خطر II

جدول ۲. بررسی نتایج FLAC3D در توده سنگ دربرگیرنده تونل بلند سد سردشت

نوع سنگ	مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ E (MPa)	کرنش بحرانی	جابجایی مجاز تونل بلند (mm)	جابجایی تونل بلند بعد از نصب سیستم نگهداری در مدل FLAC3D (mm)
اسلیت و فیلیت	۱۰۰۰	5.977×10^{-3}	۱۹،۵۵	۱۶،۵۹



شکل ۸. کنتور جابجایی تونل بلند سد سردشت بعد از نصب سیستم نگهداری

گسیختگی پوشش بتن مسلح می‌شود، می‌تواند از رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ تعیین شود (طاحونی، ۱۳۸۳).

$$P_n = C_S + C_C - T_S \quad (14)$$

$$M_n = C_S \times \left(\frac{H}{2} - d' \right) + C_C \times \left(\frac{H}{2} - \frac{a_b}{2} \right) + T_S \times \left(d'' - \frac{H}{2} \right) \quad (15)$$

که در آن $C_S = A'_S f_y$ ، $C_C = 0.85 f'_c b a_b$ ، $T_S = A_S f_y$ است.

همچنین پایداری سازه‌ای پوشش تونل بلند مورد بررسی قرار گرفت. نمودار اثر متقابل پوشش ترکیب‌های قابل قبول گشتاور خمشی و نیروی محوری را در عضو بتن مسلح یا غیر مسلح نشان می‌دهد. نمودار توزیع تنش در سطح مقطع پوشش را می‌توان به صورت شکل ۹ در نظر گرفت. با توجه به این شکل ترکیبی از نیروی محوری و گشتاور خمشی که منجر به

۶. نتیجه گیری

بر اساس روش همگرایی - همجواری و معیار شکست Hoek - Brown - نتایج تحلیل به شرح زیر است:

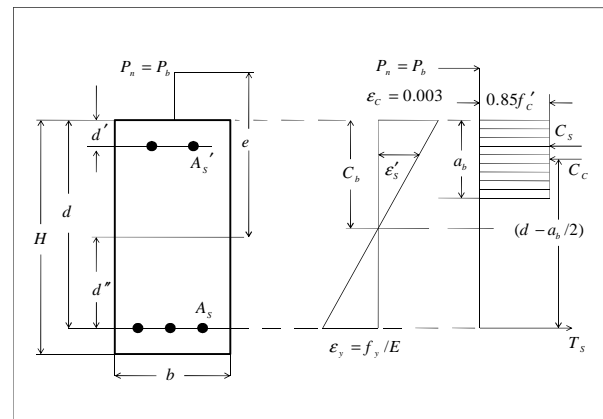
۱- به علت تاثیر درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها بر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ اسلیتی مسیر تونل بلند سد سردشت از جمله مقاومت فشاری، چسبندگی و زاویه اصطکاک، معیار شکست Hoek - Brown که نسبت به دیگر روش‌های تجربی، خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ را بهتر در نظر می‌گیرد، قابل کاربرد است.

۲- با استفاده از فرمول لوند، Carranza-Torres and Fairhurst رابطه‌ای تجربی بین پارامترهای معرف مقاومت توده سنگ و عکس‌العمل مکانیکی فضاهای زیرزمینی استوانه‌ای شکل ارائه دادند که این روش در منحنی عکس‌العمل زمین و تحلیل پایداری تونل بلند سد سردشت مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اعتبارسنجی روش عددی FLAC3D از روش تجربی استفاده شد که به ازای تمامی مقادیر فشار داخلی، دو نمودار منحنی عکس‌العمل زمین در روش تجربی و عددی تقریباً با هم انطباق خوبی دارند. لذا در ادامه برای برآورد بار وارد بر پوشش سگمندی از روش عددی استفاده شد و مقدار بار وارد بر پوشش سگمندی با روش همگرایی - همجواری ۰/۴۳۳ مگاپاسکال به دست آمد.

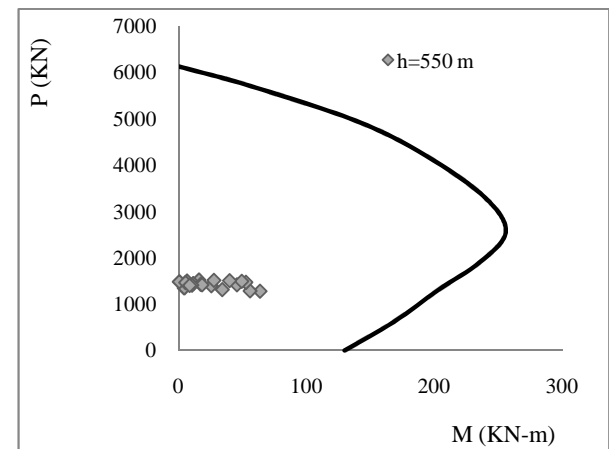
۳- با توجه به روابط Sakurai مشخص شد که جابجایی توده سنگ مسیر تونل بلند بعد از نصب پوشش سگمندی کمتر از جابجایی مجاز می‌باشد. همچنین با بررسی سازه‌ای پوشش سگمندی تمام ترکیب‌های گشتاور خمشی و نیروی محوری وارد بر پوشش سگمندی تونل بلند انتقال آب سد سردشت در داخل نمودار اثر متقابل قرار گرفت، بنابراین پوشش انتخاب شده برای تمام زون‌ها مناسب است.

۴- محاسبه ضریب اطمینان برابر با ۳/۱۴ نشان دهنده پایداری پوشش سگمندی تونل بلند سد سردشت در برابر بارهای اعمال شده است.

برای محاسبه نیروی محوری و گشتاور خمشی وارده بر پوشش به روش عددی با توجه به شرایط منطقه سد سردشت می‌توان توده‌سنگ را به صورت پیوسته در نظر گرفت و از نرم‌افزار FLAC3D استفاده کرد. برای بررسی پایداری پوشش انتخاب شده، ترکیب گشتاور خمشی و نیروی محوری وارده بر پوشش در داخل نمودار اثر متقابل قرار گرفت که به عنوان نمونه این موضوع برای زون با روباره ۵۵۰ متر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ضریب اطمینان که به صورت بیشترین نیروی محوری قابل تحمل توسط پوشش بر بیشترین نیروی محوری وارده به آن تعریف می‌شود برابر با ۳/۱۴ است و نشان دهنده پایداری پوشش سگمندی تونل بلند سد سردشت در برابر بارهای اعمال شده است.



شکل ۹. نمودار توزیع تنش در سطح مقطع پوشش (طاحونی، ۱۳۸۳)



شکل ۱۰. بررسی پایداری سازه‌ای پوشش انتخاب شده در

زون با روباره ۵۵۰ متر

منابع

- بخشنده، ح.، طایی، س.، رحیمی، م.، ۱۳۹۱. تحلیل پایداری شیروانی‌های مشرف به نیروگاه سد سردشت با در نظر گرفتن اثر کلیواژ توده‌سنگ. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد پنجم، شماره ۱ و ۲، صص ۱۷-۲۶.
- شرکت مهندسی مشاور سپاسد - فراب، خرداد ۱۳۹۰، گزارش زمین‌شناسی مهندسی مطالعات مرحله دوم.
- شرکت مهندسی مشاور سپاسد - فراب، مرداد ۱۳۹۰، گزارش بازنگری مرحله دوم پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ.
- طاحونی، ش.، ۱۳۸۳. طراحی سازه‌های بتن مسلح. تهران: انتشارات دهخدا. چاپ اول، صص ۳۲۸-۳۲۱.
- فرخ، الف.، ۱۳۸۶. قطعات بتنی پیش ساخته. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- Atkinson, J., 1993. An introduction to the mechanics of soils and foundations. Mc Graw - Hill Book Company.
- Brady, B.G.H., Brown, E.T., 2004. Rock mechanics for underground mining: Springer Science, Business Media, Inc, United States of America, 645p.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2001. Analysis of tunnel support requirements using the convergence-confinement method and the Hoek-Brown rock failure criterion. Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, pp.65-75.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000. Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion. Tunnelling and Underground Space Technology, 15: 187-213.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 1999. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36: 777-809.
- Fairhurst, C., Carranza-Torres, C., 2002. Closing the circle. In J. Labuz and J. Bentler (Eds.), Proceedings of the 50 th Annual Geotechnical Engineering Conference. St. Paul, Minnesota. February 22. University of Minnesota, 65p.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, vol 1: 267-273.
- Hoek, E., Diederichs, M.S., 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43: 203-215.
- Londe, P., 1988. Discussion on the Determination of the Shear Stress Failure in Rock Masses. ASCEJ. Geotechnical Engineering Division, 14(3): 374-376.
- Sakurai, S., 1999. Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology, 12: 453-460.