



بررسی پدیده لهیدگی در قطعه اول تونل آزاد با استفاده از روش‌های تجربی

غلامرضا لشکری پور^۱، حسین صادقی^۲، محمد غفوری^۲، محمد صادق قائم‌پناه^۳

(۱) استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در حفاری تونل‌ها درون توده سنگ‌های ناهمگن و کم مقاومت مانند شیل‌ها و شیست‌ها، پیش‌بینی سریع مشکلات ممکن در هنگام حفاری تونل بسیار مهم می‌باشد. در این مقاله مساله لهیدگی در مسیر قطعه اول تونل آزاد به دلیل وجود توده سنگ‌های فیلیتی و اسلیتی با مقاومت پایین دارای پتانسیل لهیدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از چهار روش تجربی استفاده شده است. برای این منظور با توجه به نتایج بدست آمده، میزان لهیدگی و درصد تغییر شکل دیواره تونل نسبت به شعاع آن در مقطع بحرانی با بیشترین ارتفاع روباره (۴۳۰ متر) تعیین و سپس مقدار فشار نگهدارنده با استفاده از رابطه هوک-مارینوس محاسبه شده است.

Abstract

Quick estimation of possible problems is very important for tunnel excavation through unisotropic and low strength rock masses like shale and schist. This paper deals with the squeezing problem in the first segment of Azad tunnel which passes through phyllite and slate rock masses with squeezing potential. For this purpose four experimental method were used. According to the obtained results squeezing value and strain of tunnel wall in the critical section with maximum overburden (430m) was determined and then support pressure has been calculated by using Hoek & Marinos equation.

کلمات کلیدی: لهیدگی، تونل آزاد، فشار نگهدارنده، مقطع بحرانی

۱- مقدمه

امروزه حفاری تونل‌ها برای اهداف مختلف، از جمله راه و ترابری، استخراج معادن، انحراف مسیر آب در سدها و همینطور انتقال آب، انجام می‌شود. یکی از مشکل سازترین نوع تونل‌های حفر شده، تونل‌های انتقال آب هستند. علت این امر غالباً به دلیل طولانی بودن این نوع تونل‌ها می‌باشد. طول زیاد این تونل‌ها باعث می‌شود که در طول مسیر از شرایط متنوع لیتولوژیکی و اعماق مختلف عبور نمایند. تونل‌هایی که از سنگ‌های کم مقاومت و ناهمگن مانند شیل، شیست، فیلیت، اسلیت، مارن و ... عبور می‌کنند با مشکلات زیادی از لحاظ پایداری مواجه می‌باشند.



اگر تونل در اعماق نسبتاً بالا (به طور معمول بیش از ۲۰۰ متر) و در سنگ های دارای پتانسیل لهیدگی حفر شوند، احتمال بروز این پدیده در آن ها وجود دارد. طبق تعریف انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM)، لهیدگی عبارت است از برش وابسته به زمان سنگ که منجر به حرکت سنگ های درونگیر به سمت تونل می شود [7]. این پدیده با تغییر شکل های بزرگ و همگرایی های وابسته به زمان در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش های القائی، تنش موجود از حد مقاومت برشی سنگ تجاوز نموده و توده سنگ به داخل فضای حفاری رانده می شود. این تغییر شکل ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی مدت ادامه داشته باشد. میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر شکل ها و وسعت ناحیه پلاستیک در اطراف تونل به خواص زمین شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، تنش برجا، جریان آب، فشار آب حفره ای و خواص توده سنگ بستگی دارد. از طرفی لهیدگی رابطه نزدیکی با تکنیک های حفاری و نصب سازه نگهدارنده دارد. به طور مثال اگر نصب سیستم نگهدارنده به تعویق افتد، تنش های القائی باعث رانده شدن توده سنگ به داخل تونل می گردد. برعکس اگر تغییر شکل ها با نصب سریع سیستم نگهدارنده مهار شود، به سیستم نگهدارنده بسیار قوی نیاز است [4]. تا کنون روش های تجربی و عددی و بسته های نرم افزاری مختلفی برای بررسی این پدیده بکار گرفته شده است. در این مقاله با استفاده از روش های تجربی، به بررسی پتانسیل وقوع این پدیده در قطعه اول تونل آزاد، اولین بخش از سامانه انتقال آب آزاد- روانسر پرداخته شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

طرح سامانه انتقال آب آزاد رود به روانسر، از کیلومتر ۷۰ جاده سنندج-مریوان در استان کردستان شروع شده و به سمت جنوب، تا دشت روانسر واقع در شمال استان کرمانشاه ادامه پیدا می کند. هدف از این طرح انتقال آب از سدخاکی آزاد رود و بندهای موجود بر روی رودخانه های آویهنگ و بیساران به روانسر می باشد. این سامانه شامل ۵ قطعه تونل با قطر میانگین ۴/۶ متر و طول مجموع ۴۵ کیلومتر است که کوتاه ترین قطعه تونل، ۳ کیلومتر و بلندترین قطعه آن حدود ۱۱ کیلومتر طول دارد. علاوه بر این، این سامانه دارای کانال های انتقال با عرض و عمق ۴ متر و طول مجموع ۲۶ کیلومتر می باشد. قطعه اول این تونل در زون ساختاری سنندج-سیرجان واقع شده و توده سنگ درونگیر آن، از جنس فیلیت و اسلیت می باشد. ورودی این قطعه در کیلومتر ۷۰ جاده سنندج مریوان، ۶ کیلومتری شرق روستای نگل و خروجی آن در کیلومتر ۵۵ جاده سنندج مریوان، در حاشیه غربی جاده قرار دارد. ورودی این قطعه در طراز ۱۴۲۰ متر و خروجی آن در طراز ۱۴۱۸ متر از سطح آزاد آب دریاها قرار دارد. طول این قطعه ۳۹۹۶ متر بوده و در نقاط ورودی، میانی و خروجی آن سه گمانه با عمق های به ترتیب ۴۰، ۲۵۵ و ۳۰ متر حفاری شده است [3]. نتایج حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی و مطالعات صحرایی این تونل در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سنگ درونگیر قطعه اول تونل آزاد [۲]

σ_{ci}	σ_{cm}	E_m	C_i	C_m	γ
22MPa	2.2MPa	3.5GPa	6.3MPa	0.7MPa	0.028MN / m ³
Φ_i	Φ_m	η	Q	RMR	Gsi
34°	28°	0.3	0.3	47	40

۳- روش‌های تجربی مورد استفاده:

۳-۱- روش جتوا و همکاران (Jethwa et al., 1984):

درجه لهیدگی توسط جتوا و همکاران بر اساس رابطه زیر تعریف می‌گردد [11]:

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{P_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}$$

که در آن σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری، P_0 تنش برجا، γ وزن مخصوص سنگ و H عمق تونل از سطح زمین است. بر این اساس درجه لهیدگی برای مقطع با بیشترین روباره (۴۳۰ متر) برابر است با:

$$N_c = \frac{2.2MPa}{0.028 MN/m^3 \times 430m} = 0.18$$

که با توجه به جدول شماره ۲، تونل آزاد در این مقطع دارای شرایط درجه لهیدگی زیاد می‌باشد.

جدول ۲- رتبه بندی رفتار لهیدگی بر اساس جتوا و همکاران (۱۹۸۴)

ردیف	نوع رفتار	$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H}$
۱	لهیدگی زیاد	< 0.4
۲	لهیدگی متوسط	0.4 – 0.8
۳	لهیدگی کم	0.8 – 2
۴	بدون لهیدگی	2 >

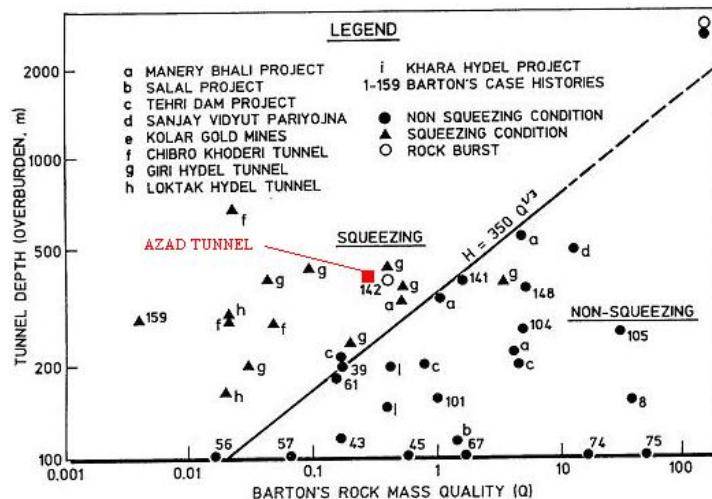
۳-۲- روش سینگ و همکاران (Singh et al., 1992)

سینگ و همکاران بر اساس ۳۹ مورد تونل بررسی شده، بوسیله جمع آوری داده های مربوط به کیفیت توده سنگ (Q) و ارتفاع روباره (H)، یک خط مرزی ترسیم نمودند. معادله این خط به این صورت است [12]:

$$H = 350Q^{1/3} m$$

نقاط اطلاعاتی که بالای این خط قرار دارند، شرایط لهیدگی را نشان می دهند. با توجه به میزان شاخص توده سنگ در تونل، که به طور میانگین ۰.۳ می باشد، ارتفاع روباره ای که در آن شرایط لهیدگی شروع می شود به این صورت بدست می آید:

محل مقطع مورد مطالعه در نمودار سینگ، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- معیار لهیدگی سینگ و همکاران (۱۹۹۲) و محل مقطع مورد مطالعه در تونل آزاد بر روی آن

۳-۳- روش گوئل و همکاران (Goel et al., 1995)

روش تجربی ساده ای که توسط گوئل گسترش یافته، بر اساس عدد توده سنگ (N) است که بصورت Q فاقد فاکتور تنش (SRF=1) تعریف می گردد [8]:

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

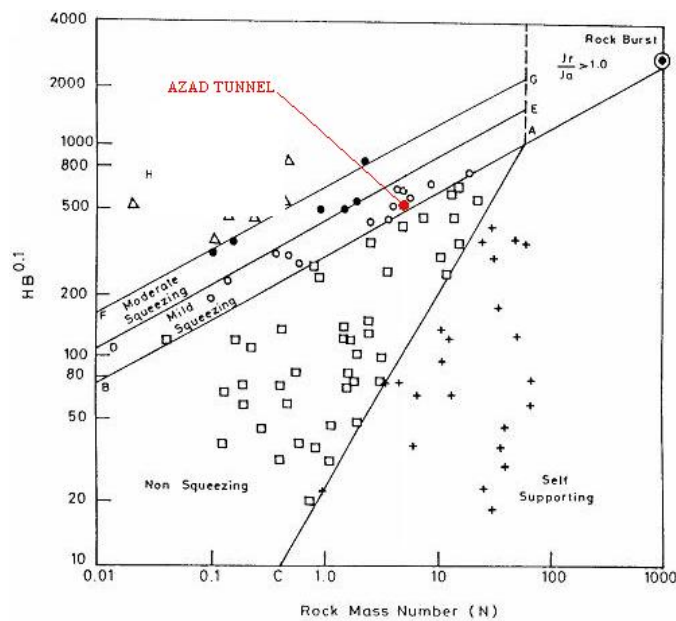
با بررسی عمق تونل (H)، دهانه تونل (B) و عدد توده سنگ (N) مربوط به ۹۹ تونل، گوئل و همکاران (۱۹۹۵) داده های بدست آمده را بصورت N در مقابل $H.B^{0.1}$ در یک نمودار تمام لگاریتمی (شکل ۲) ترسیم نمودند.

$$H = (275 N^{0.33}) B^{-0.1} m$$

همانطور که در شکل مشاهده می شود، یک خط موارد لهیدگی را از موارد غیر لهیدگی متمایز می سازد. معادله این خط بصورت زیر است:

$$H = (275 \times 5.36^{0.33}) 4.6^{-0.1} = 410 m$$

در تونل آزاد، $B=4.6$ متر و $N=5.36$ می باشد، یعنی از عمق ۴۱۰ متری شرایط لهیدگی شروع می شود. محل مقطع مورد مطالعه در نمودار گوئل، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار لهیدگی گوئل و همکاران (۱۹۹۵) و محل تونل آزاد بر روی این نمودار

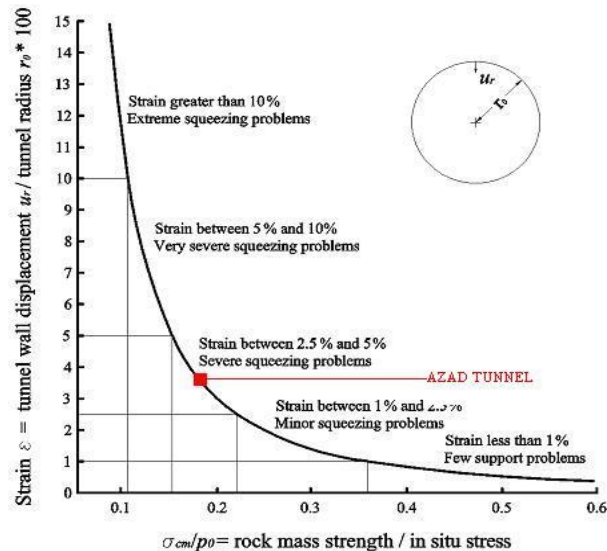
۳-۴- روش هوک و مارینوس (Hoek & Marinos, 2000):

هوک در سال ۱۹۹۸ از نسبت مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (σ_{cm}) به تنش برجا (P_0) به عنوان یک شاخص در تونلها استفاده کرد. سپس هوک و مارینوس در سال ۲۰۰۰ نمودار کارآمدی را جهت ارزیابی مساله لهیدگی در تونلها تهیه کردند که در شکل ۳ نشان داده شده است [10].

مطابق شکل، با کاهش مقاومت توده سنگ نسبت به تنش برجا و متعاقب آن افزایش کرنش، شدت لهیدگی تونل بالا می رود. با توجه به اینکه نسبت مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ به استرس برجا در مقطع مورد مطالعه برابر است با ۰/۱۸، بر طبق نمودار این مقطع در محدوده لهیدگی با مشکلات جدی قرار می گیرد. همچنین بر اساس نتایج جدول ۳ و فرمول ارائه شده توسط هوک و مارینوس نیز می توان شرایط لهیدگی را بررسی نمود:

$$\varepsilon_t (\%) = 0.15(1 - P_i / P_0)(\sigma_{cm} / P_0)^{-\left(3\frac{P_i}{P_0} + 1\right) / \left(3.8\frac{P_i}{P_0} + 0.54\right)}$$

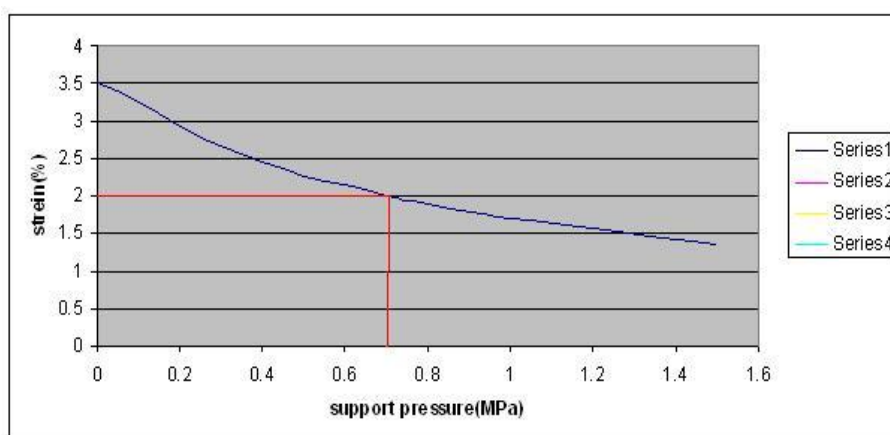
که در این رابطه ε_t کرنش جداره تونل، P_i فشار نگهدارنده، P_0 تنش برجا و σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ می باشد.



شکل ۳- نمودار هوک و مارینوس (۲۰۰۰) و محل تونل آزاد بر روی آن
جدول ۳- طبقه بندی میزان لهیدگی بر اساس روش هوک و مارینوس (۲۰۰۰)

میزان لهیدگی	استرین جداره تونل به درصد
سیستم نگهدارنده با مشکل کمی مواجه است	$\varepsilon_t \leq 1$
لهیدگی با مشکلات ضعیف	$1 < \varepsilon_t \leq 2.5$
لهیدگی با مشکلات جدی	$2.5 < \varepsilon_t \leq 5$
لهیدگی با مشکلات خیلی جدی	$5 < \varepsilon_t \leq 10$
لهیدگی با مشکلات بی نهایت زیاد	$10 < \varepsilon_t$

با توجه به فرمول فوق و با در نظر گرفتن فشار نگهدارنده صفر، مقدار استرین جداره تونل برابر با $3/5$ درصد خواهد بود که مقدار قابل توجهی می باشد. تجربه حاکی از آن است که نسبت تغییر شکل جداره تونل به شعاع تونل بایستی به مقدار کمتر از حدود ۲ درصد ثابت نگه داشته شود تا در طی آن بتوان جلوی ناپایداری های جدی را گرفت [9]. به همین منظور با استفاده از رابطه فوق و رسم نمودار می توان فشار نگهدارنده برای رسیدن به تغییر شکل ۲ درصد را بدست آورد (شکل ۴).



شکل ۴- تغییر شکل دیواره تونل آزاد بر اساس رابطه هوک و مارینوس

با استفاده از نمودار بدست آمده، به این منظور حداقل فشار نگهدارنده لازم برای نگه داشتن نسبت تغییر شکل دیواره به شعاع تونل به مقدار کمتر از ۲ درصد، برابر با 0.7 مگاپاسکال می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله احتمال پدیده لهیدگی در قطعه اول تونل انتقال آب آزاد که از توده سنگ های غیر مقاوم اسلیتی و فیلیتی عبور می کند مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور به تعدادی از روش های بررسی پتانسیل وقوع لهیدگی در حین حفاری تونل ها اشاره گردید. با بررسی اجمالی این روش ها مشخص شد که وقوع این پدیده به دو فاکتور اساسی یعنی عمق نسبتا زیاد تونل و دیگری ضعیف بودن توده سنگ در برگرنده از لحاظ خصوصیات ژئومکانیکی، وابسته است. با توجه به نتایج حاصل از این روش های تجربی، عمق شروع پدیده لهیدگی در قطعه اول تونل آزاد به طور میانگین حدود ۲۳۰ متر در نظر گرفته شده که با توجه به این مساله در مترهاژ ۷۵۷ تا ۲۲۰۴ و مترهاژ ۲۴۹۱ تا ۳۴۲۱ احتمال وقوع پدیده لهیدگی وجود دارد. میزان تغییر شکل دیواره تونل در مقطع بحرانی، بدون فشار نگهدارنده $3/5$



درصد محاسبه شده که نشان دهنده مشکلات جدی از لحاظ لهیدگی می باشد. برای رساندن این مقدار به ۲ درصد، حدود ۰/۷ مگاپاسکال فشار نگهداری لازم است.

۵. منابع

- [۱] شریف زاده، م.، دلبری، س.م. (۱۳۸۵). "تاثیر مچاله شوندگی در برآورد بار وارده بر سیستم نگهدارنده - مطالعه موردی، تونل گلاب"، مجموعه مقالات کنفرانس هفتم تونل، فضاهای زیرزمینی و توسعه دانش و فناوری، صص ۳۴۹-۳۶۰.
- [۲] مهندسین مشاور گمانه کاو، (۱۳۸۶). "گزارش نهایی آزمایشات ژئومکانیکی تونل آزاد".
- [۳] مهندسین مشاور مهتاب قدس، (۱۳۸۵). "گزارش مقدماتی زمین شناسی مهندسی سامانه انتقال آب آزاد - روانسر".
- [۴] میر محرابی، ح. (۱۳۸۴). "تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهدارنده تونل انتقال آب کسلیان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

- [5] Bhasin, R., Barton, N., Grimstad, E., Chryssanthakis, P., (1995). "Engineering geological characterization of low strength anisotropic rocks in the Himalayan region for assessment of tunnel support", *Journal of Engineering Geology*, 40, 169-193.
- [6] Daligic, S., (2002). "Tunneling in squeezing rock, the bolu tunnel, Anatolian motorway, Turkey", *Journal of Engineering Geology*, 67, 73-96.
- [7] Einstein, H., (1996). "Tunneling in difficult ground-swelling behavior and identification of swelling rock", *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, 113-124.
- [8] Goel, R.K., Jethwa, J.L., Pailhankar, A.G., (1995). "Indian experiences with Q and RMR systems", *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 10, 97-109.
- [9] Hoek, E., (2007). "Practical Rock Engineering", www.rocksolid.com/hoek.
- [10] Hoek, E., Marinos, P., (2000). "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses", *Tunnels and Tunneling International*.
- [11] Jethwa J.L., Singh, B., 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*, 231-238.
- [12] Singh, B., Jethwa, J.L., Dube, A.K., Singh, B., (1992). "Correlation between observed support pressure and rock mass quality", *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 7, 59-74.