

بررسی استعداد ایجاد لهیدگی در قطعه دوم تونل آزاد

محمد صادق قائم پناه^{۱*}، غلامرضا لشکری پور^۲، حسین صادقی^۲، محمد غفوری^۲، محمد عشقی پور^۳

پذیرش مقاله: ۸۷/۱۱/۲

دریافت مقاله: ۸۶/۹/۷

چکیده

در توده سنگ‌های ناهمگن و کم مقاومت مانند شیل‌ها و شیست‌ها، پیش بینی سریع مشکلات در هنگام حفاری تونل بسیار مهم می‌باشد. در این مقاله مساله لهیدگی در مسیر قطعه دوم تونل آزاد در استان کردستان به دلیل وجود توده سنگ‌های فیلیتی و اسلیتی با مقاومت پایین دارای پتانسیل لهیدگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از چهار روش تجربی استفاده گردید. سپس با توجه به نتایج به دست آمده، میزان لهیدگی و درصد تغییر شکل دیواره تونل نسبت به شعاع آن در مقطع بحرانی با بیش‌ترین ضخامت روباره (۷۶۰ متر) تعیین و مقدار فشار نگهدارنده با استفاده از رابطه هوک-مارینوس محاسبه شده است. در نهایت با میانگین‌گیری از نتایج حاصل از روش‌های تجربی ذکر شده، عمق شروع لهیدگی در این قطعه، ۱۸۰ متر تخمین زده شده است.

کلید واژه‌ها: تونل آزاد، لهیدگی، فشار نگهدارنده، روش تجربی

۱- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی ghaempanah87@yahoo.com

۲- گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد lashkaripour@ferdowsi.um.ac.ir

۳- گروه ژئوتکنیک شرکت مهندسین مشاور مهتاب قدس eshghipour_m@yahoo.com

* مسئول مکاتبات

مقدمه

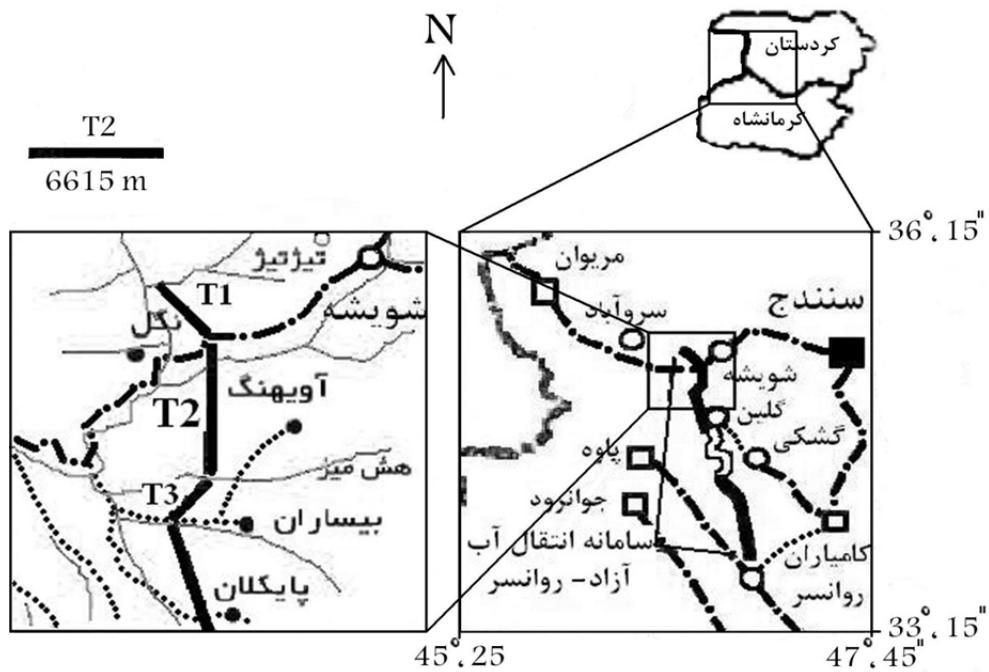
امروزه حفاری تونل‌ها با اهداف مختلف، از جمله راه و ترابری، استخراج معادن، انحراف مسیر آب در سدها و همین‌طور انتقال آب، انجام می‌شود. یکی از مشکل‌سازترین انواع تونل‌های حفر شده، تونل‌های انتقال آب هستند. علت این امر غالباً به دلیل طولانی بودن این نوع تونل‌ها می‌باشد. طول زیاد این تونل‌ها باعث می‌شود که 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 و مارن عبور می‌کنند با مشکلات زیادی از لحاظ پایداری مواجه هستند.

اگر تونل در اعماق نسبتاً زیاد (به طور معمول بیش از ۲۰۰ متر) و در سنگ‌های دارای پتانسیل لهیدگی حفر شود، احتمال بروز این پدیده در آن وجود دارد. طبق تعریف انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)، لهیدگی عبارت است از برش و وابسته به زمان سنگ که منجر به حرکت سنگ‌های درون‌گیر به سمت تونل می‌شود (Einstein, 1996). این پدیده با تغییر شکل‌های بزرگ و همگرایی‌های وابسته به زمان در طی حفاری تونل همراه است. در اثر ایجاد و ترکیب تنش‌های القائی، تنش موجود از حد مقاومت برشی سنگ تجاوز نموده و توده سنگ به داخل فضای حفاری رانده می‌شود (شریف‌زاده، ۱۳۸۵). این تغییر شکل‌ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی مدت ادامه داشته باشد (Daligic, 2002). اگرچه هنوز مکانیسم پدیده لهیدگی بطور کامل شناسایی نگردیده، ولی امروزه به خوبی مشخص شده که حفاری تونل باعث توزیع مجدد استرس در توده سنگ می‌شود. استرس مماسی در سطح محیطی تونل زیاد شده تا جایی که از مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ در جهت مماس محیط تونل در هر نقطه، فزونی می‌یابد. در نتیجه توده سنگ در محیط تونل دچار گسستگی شده و زون شکسته به آرامی و به صورت پیش‌رونده، در جهت شعاعی تونل به همگرایی وابسته به زمان تونل تبدیل می‌شود (Singh et al., 2007). میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر شکل‌ها و وسعت ناحیه پلاستیک در اطراف تونل به خواص زمین‌شناختی و

ژئوتکنیکی محدوده تونل، تنش برجا، جریان آب، فشار آب حفره‌ای و خواص توده سنگ بستگی دارد (Shalabi, 2005). از طرفی لهیدگی رابطه نزدیکی با تکنیک‌های حفاری و نصب سازه نگهدارنده دارد. به طور مثال اگر نصب سیستم نگهدارنده به تعویق افتد، تنش‌های القائی باعث رانده شدن توده سنگ به داخل تونل می‌گردد. در نتیجه میزان تنش در توده سنگ اطراف تونل کاهش یافته و به سیستم نگهدارنده فشار کم‌تری وارد می‌شود. برعکس اگر قرار باشد که تغییر شکل‌ها با نصب سریع سیستم نگهدارنده مهار شود، به سیستم نگهدارنده فشار قوی نیاز است (میرمحرابی، ۱۳۸۴). تا کنون روش‌های تجربی و عددی و بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی برای بررسی این پدیده به کار گرفته شده است. در این مقاله با استفاده از روش‌های تجربی، به بررسی پتانسیل وقوع این پدیده در قطعه دوم تونل آزاد که بخشی از سامانه انتقال آب آزاد رود- روانسر می‌باشد پرداخته شده است.

روش 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 ۶۰ کیلومتری شمال‌غرب کرمانشاه، حدود ۶ کیلومتری شمال‌شرق روانسر ادامه پیدا می‌کند. هدف از این طرح انتقال آب از سد خاکی آزاد رود و بندهای موجود بر روی رودخانه‌های شویشه، آویهنگ و بیساران به روانسر می‌باشد. این سامانه شامل ۵ قطعه تونل با قطر ۴/۵ تا ۵/۸ متر و طول مجموع ۴۵ کیلومتر و کانال‌های انتقال با عرض و عمق ۴ متر و طول مجموع ۲۶ کیلومتر می‌باشد. مجموعه این اجزا در محدوده‌ای بین طول جغرافیایی $46^{\circ}25'$ الی $46^{\circ}45'$ شرقی و عرض جغرافیایی $33^{\circ}45'$ الی $35^{\circ}25'$ شمالی قرار می‌گیرد. موقعیت این سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است. قطعات اول، دوم، سوم و بخشی از قطعه چهارم مجموعه تونل‌های این سامانه در زون ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده و توده سنگ درون‌گیر آن، از جنس فیلیت و اسلیت می‌باشد. ورودی قطعه دوم در محل سد مخزنی رودخانه



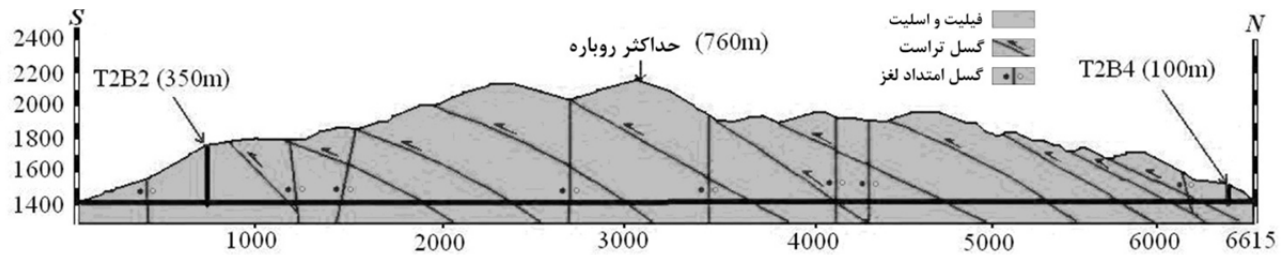
شکل ۱- موقعیت سامانه انتقال آب آزاد- روانسر

(معمولاً کمتر از یک واحد لوژن) بوده است. به نحوی که در مقطعی که بیشترین میزان نفوذپذیری را داشته (T2-B2)، عمق ۳۳۵ تا ۳۴۰ متر) این مقدار در حد یک و نیم واحد لوژن اندازه‌گیری شده است. با توجه به این‌که در پروژه‌های حفاری تونل، توده سنگ با میزان نفوذپذیری کمتر از سه واحد لوژن را نفوذناپذیر در نظر می‌گیرند، در نتیجه به نظر نمی‌رسد مشکل خاصی از جانب آب‌های زیرزمینی در حفر تونل ایجاد شود. مقطع طولی این قطعه از تونل و محل گمانه‌های ذکر شده روی آن، در شکل ۲ نشان داده شده است. جنس سنگ‌های تشکیل دهنده تمام بخش‌های این مقطع، فیلیت و اسلیت بوده و گسل‌های تراست با روند کلی شمال غربی- جنوب شرقی و شیب ۳۰ تا ۴۰ درجه به سمت شمال شرقی، به دفعات مسیر تونل را قطع نموده‌اند.

نتایج مطالعه درزه‌های سطحی در محل گمانه T2B2 در جدول ۱، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که توده سنگ دربرگیرنده تونل، به شدت از لحاظ ساختاری تضعیف شده است. ناپیوستگی سطحی غالب در این جا، برگ‌وارگی S2 با شیب حدود ۴۵ درجه می‌باشد. این مساله در نمونه‌های به‌دست آمده از این گمانه نیز مشهود است به‌نحوی که در

شوش، واقع در غرب بخش شوش از استان کردستان و خروجی آن ۶ کیلومتر به سمت جنوب، در محدوده بند انحرافی رودخانه آویهنگ قرار دارد. طول این قطعه ۶۶۱۵ متر، تراز ورودی و خروجی آن به ترتیب ۱۴۱۵ و ۱۴۱۱/۷، قطر آن ۴/۸ متر و ظرفیت انتقال آن ۲۸ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. در طول مسیر این تونل چهار گمانه پیش‌بینی شده (شکل ۲) که تا به حال دو گمانه T2B2 و T2B4 با عمق‌های به ترتیب ۳۵۰ و ۱۰۰ متر حفاری شده است (مهندسین مشاور مهتاب‌قدس، ۱۳۸۵). به دلیل عمق نسبتاً زیاد گمانه‌های مزبور، هر دو گمانه به روش وایر لاین حفاری شده‌اند. به دلیل این‌که در این روش رادهای حفاری مانند کیسینگ عمل می‌کنند، بنابراین حتی اگر در گمانه عمیقی مانند T2B2 امکان ایجاد شرایط لهدگی وجود داشته باشد، عملاً در حین عملیات حفاری گمانه، قابل مشاهده نبوده است. سطح آب زیرزمینی در هر دو گمانه در عمق حدود ۱۰ متری قرار دارد. به عبارت دیگر حفاری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی انجام خواهد شد.

آزمایش‌های انجام شده در گمانه‌های حفر شده نشان می‌دهند که میزان نفوذپذیری توده سنگ در اکثر مقاطع بسیار پایین



شکل ۲- مقطع طولی قطعه دوم از مجموع تونل‌های سامانه انتقال آب آزاد- روانسر

جدول ۱- مشخصات ناپیوستگی‌های سطحی در محل گمانه T2-B2

رطوبت	زبری	بازشدگی (mm)	فاصله داری (cm)	جهت شیب	شیب	نوع	
خشک	صاف	۰/۲۵-۰/۵	<۶	۰۸۵	۱۵	برگوارگی	S1
خشک	صاف	۰/۲۵-۰/۵	<۶	۱۰۰	۴۵	برگوارگی	S2
خشک	صاف	۰/۵-۲/۵	۴۰-۵۰	۰۰۵	۸۰	درزه	J1
خشک	زبر	۰/۵-۲/۵	۴۰-۵۰	۰۵۰	۷۵	درزه	J2
خشک	صاف	۰/۵-۲/۵	۱۰-۲۰	۱۵۰	۲۰	درزه	J3

تعیین گردید و نتایج حاصله در جدول ۴ ارائه شده است. از آن‌جا که امتداد برگ‌وارگی تقریباً به موازات محور تونل است (شمالی - جنوبی)، لذا می‌توان فرض کرد که شرایط در تمام تونل به جز محل گسل‌ها، تقریباً مشابه با گمانه T2B2 باشد. به همین دلیل محاسبات مربوط به مقطع با بیش‌ترین روباره نیز با استفاده از نتایج گمانه T2B2 انجام گرفته است.

بحث

همان‌طور که اشاره گردید، توده سنگ درون‌گیر قطعه دوم تونل آزاد، از جنس فیلیت و اسلیت بوده و دارای پارامترهای مقاومتی ضعیفی می‌باشد. این مساله به همراه ارتفاع زیاد روباره تونل در طول مسیر حفاری، باعث شده که تونل دارای پتانسیل لهیدگی باشد. در این مقاله، برای بررسی این پدیده در سنگ‌های درون‌گیر تونل، از چهار روش تجربی استفاده شده است:

تمامی نمونه‌ها، برگ‌وارگی با زاویه ۳۵ تا ۵۰ درجه نسبت به محور حفاری وجود دارد. در مجموع تعداد ۱۷ نمونه مربوط به تونل شماره دو از گمانه‌های حفر شده تهیه گردید و برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ، به آزمایشگاه منتقل شدند. آزمون‌های انجام گرفته بر روی نمونه‌ها عبارتند از: تعیین خصوصیات فیزیکی، آزمون فشاری تک‌محوری، آزمون سه محوری، برش مستقیم، بار نقطه‌ای و برزیلی. نتایج حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی نمونه‌های به دست آمده از این گمانه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است (مهندسین مشاور گمانه کاو، ۱۳۸۵). برای رده بندی توده سنگ، از دو روش Q (اندیس کیفی تونل‌سازی در سنگ) و GSI (اندیس مقاومت زمین‌شناسی) استفاده گردید. پارامترهای اندیس کیفی تونل‌سازی (Q) در مقطع با بیشترین روباره در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین پارامترهای مقاومتی توده سنگ با استفاده از معیار هوک- براون و به وسیله نرم‌افزار Roclab

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی

تونل	$E(GPa)$	$\sigma_{ci}(MPa)$	$\sigma_t(MPa)$	$c(MPa)$	ϕ	$\gamma(g/cm^3)$	$Is_{(50)}(MPa)$
شماره دو	۳۷	۲۵	۴/۸۸	۵/۸	۳۴	۲/۷	۲/۵۷

جدول ۳- پارامترهای اندیس کیفی تونل سازی (Q) در مقطع با بیشترین روباره

تونل	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q
شماره دو	۷۰	۱۴	۱	۱	۱	۲۰	۰/۲۵

جدول ۴- پارامترهای مقاومتی توده سنگ

تونل	$E_m(GPa)$	$\sigma_{cm}(KPa)$	$\sigma_{tm}(KPa)$	$c_m(MPa)$	ϕ_m	GSI	Q
شماره دو	۴/۱۹۶	۶۰۲	-۲۰	۱/۱۷	۲۳/۳۲	۳۵	۰/۲۵

۱- روش جتوا و همکاران

درجه لهیدگی توسط جتوا و همکاران بر اساس رابطه زیر تعریف می‌گردد (Jethwa et al., 1984):

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

که در آن σ_{cm} و P_0 به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ و تنش برجا بر حسب مگاپاسکال، γ وزن مخصوص سنگ بر حسب مگانیوتن بر مترمکعب و H عمق تونل از سطح زمین بر حسب متر است. البته مقدار P_0 در شرایطی که تنش افقی عمود بر جهت تونل، بیش از تنش قائم باشد، برابر با تنش افقی در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد گسل‌های تراست زیادی مسیر تونل را قطع می‌کنند، در نتیجه تنشهای افقی در منطقه بزرگ‌تر از تنش قائم هستند. از طرفی چون امتداد گسل‌ها تقریباً عمود بر محور تونل است، در محدوده تونل تنش افقی حداکثر (σ_1) تقریباً موازی با محور تونل و تنش افقی کوچک‌تر (σ_2)، عمود بر محور می‌باشد. همچنین تنش قائم ایجاد شده در اثر وزن روباره، نشان دهنده کوچک‌ترین تنش (σ_3) است. میزان تنش افقی عمود بر محور قطعه دوم تونل آزاد، ۱/۵ برابر تنش قائم در نظر گرفته شده است (قائم پناه، ۱۳۸۷) بر این اساس درجه لهیدگی برای مقطع با روباره ۷۶۰ متر تونل برابر است با:

$$N_c = \frac{0.602MPa}{0.027 MN/m^3 \times 760m \times 1.5} = 0.019$$

و عمق شروع لهیدگی زیاد برای این قطعه از تونل برابر است با:

$$H_c = \frac{0.602MPa}{0.027 MN/m^3 \times 0.4 \times 1.5} = 37m$$

با توجه به جدول ۵، تونل آزاد در این مقطع دارای شرایط درجه لهیدگی زیاد می‌باشد.

۲- روش سینگ و همکاران

سینگ و همکاران بر اساس ۳۹ مورد تونل بررسی شده، به وسیله جمع‌آوری داده‌های مربوط به کیفیت توده سنگ (Q) و ارتفاع روباره (H)، یک خط مرزی ترسیم نمودند. (Singh et al., 1992) معادله این خط به صورت زیر است:

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

نقاط اطلاعاتی که بالای این خط قرار دارند، شرایط لهیدگی را نشان می‌دهند. با توجه به میزان شاخص توده سنگ در تونل، که به طور میانگین ۰/۲۵ می‌باشد، ارتفاع روباره‌ای که در آن شرایط لهیدگی شروع می‌شود به این صورت به دست می‌آید:

$$H = 350 \times 0.25^{1/3} = 220m$$

محل مقطع مورد مطالعه در نمودار سینگ، در شکل ۳ نشان داده شده است.

۳- روش گوئل و همکاران

روش تجربی ساده‌ای که توسط گوئل گسترش یافته، بر اساس عدد توده سنگ (N) است که به صورت Q فاقد فاکتور تنش (SRF=1) تعریف می‌گردد (Goel et al., 1995):

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

گوئل با بررسی عمق تونل (H)، دهانه تونل (B) و عدد توده سنگ (N) مربوط به ۹۹ تونل، داده‌های به دست آمده را به صورت N در مقابل $H.B^{0.1}$ در یک نمودار تمام لگاریتمی (شکل ۴) ترسیم نمودند.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، یک خط، موارد لهیدگی را از موارد غیر لهیدگی متمایز می‌سازد.

معادله این خط به صورت زیر است:

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

در قطعه دوم تونل آزاد، B و N به ترتیب برابر با ۴/۸ متر و ۵ می‌باشند، یعنی از عمق ۳۹۹ متری شرایط لهیدگی شروع می‌شود.

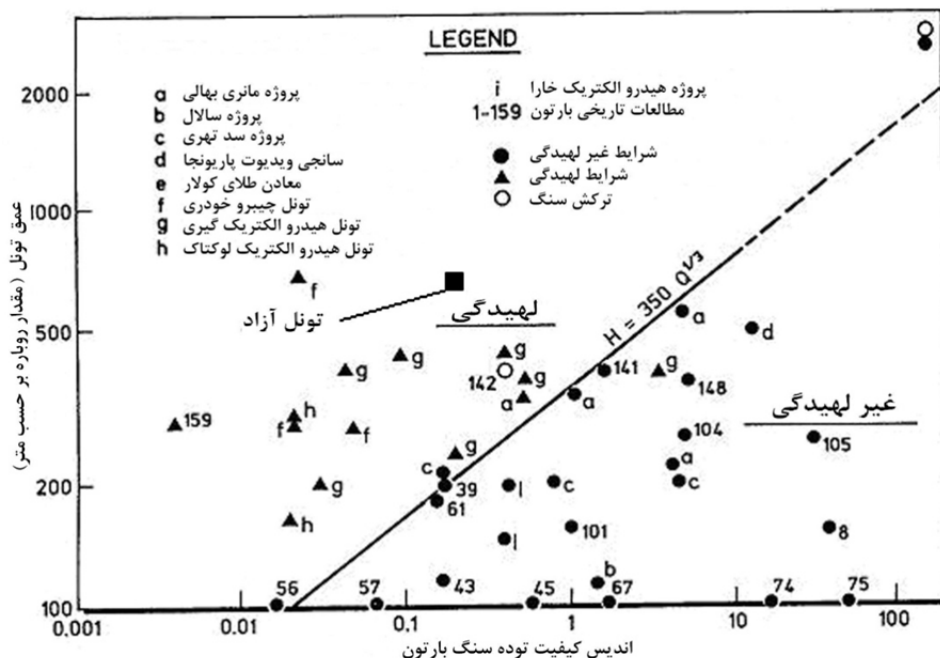
$$H = (275 \times 5^{0.33})4.8^{-0.1} = 399m$$

در محل مقطع بحرانی تونل، میزان $H.B^{0.1}$ به این صورت به دست می‌آید:

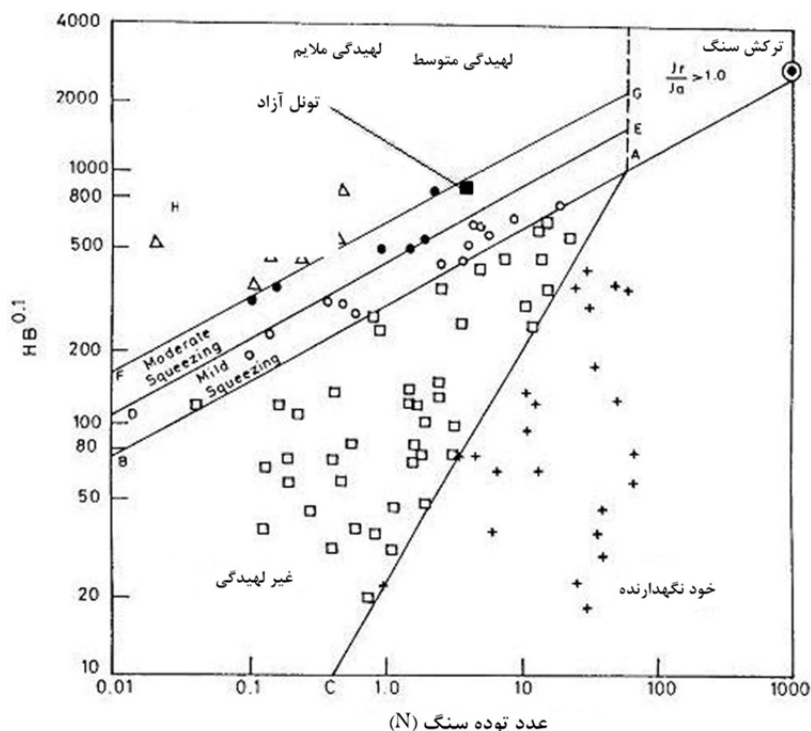
$$H.B^{0.1} = 760 \times 4.184.8^{0.1} = 889$$

جدول ۵- رتبه بندی رفتار لهیدگی بر اساس Jethwa et al., (1984)

ردیف	نوع رفتار	$Nc = \frac{\sigma_{cm}}{P_0}$	توضیحات
۱	لهیدگی زیاد	< 0.4	درجه مقطع مورد مطالعه
۲	لهیدگی متوسط	$0.4 - 0.8$	
۳	لهیدگی کم	$0.8 - 2$	
۴	بدون لهیدگی	$2 >$	



شکل ۳- نمودار لهیدگی سنگ و محل مقطع بحرانی در قطعه دوم تونل آزاد بر روی آن



شکل ۴- نمودار لهیدگی گوئل و همکاران و محل مقطع بحرانی در قطعه دوم تونل آزاد بر روی آن

زیاد قرار می‌گیرد (شکل ۵). هم‌چنین بر اساس نتایج جدول ۶ و فرمول ارائه شده توسط هوک و مارینوس نیز می‌توان شرایط لهیدگی را بررسی نمود:

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

که در این رابطه P_i فشار نگهدارنده، P_0 تنش برجا و σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (همگی بر حسب مگاپاسکال) و ε_i کرنش محوری جداره تونل می‌باشد.

نمودار هوک و مارینوس نیز با استفاده از همین فرمول و با در نظر گرفتن فشار نگهدارنده صفر، به دست آمده است. با توجه به فرمول فوق و با در نظر گرفتن فشار نگهدارنده صفر، مقدار استرین جداره تونل برابر با ۲۳/۱ درصد خواهد بود که مقدار قابل توجهی می‌باشد.

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 ناپایداری‌های جدی را گرفت (Hoek, 2007). به منظور به دست آوردن فشار نگهدارنده لازم برای کنترل کرنش محوری جداره تونل

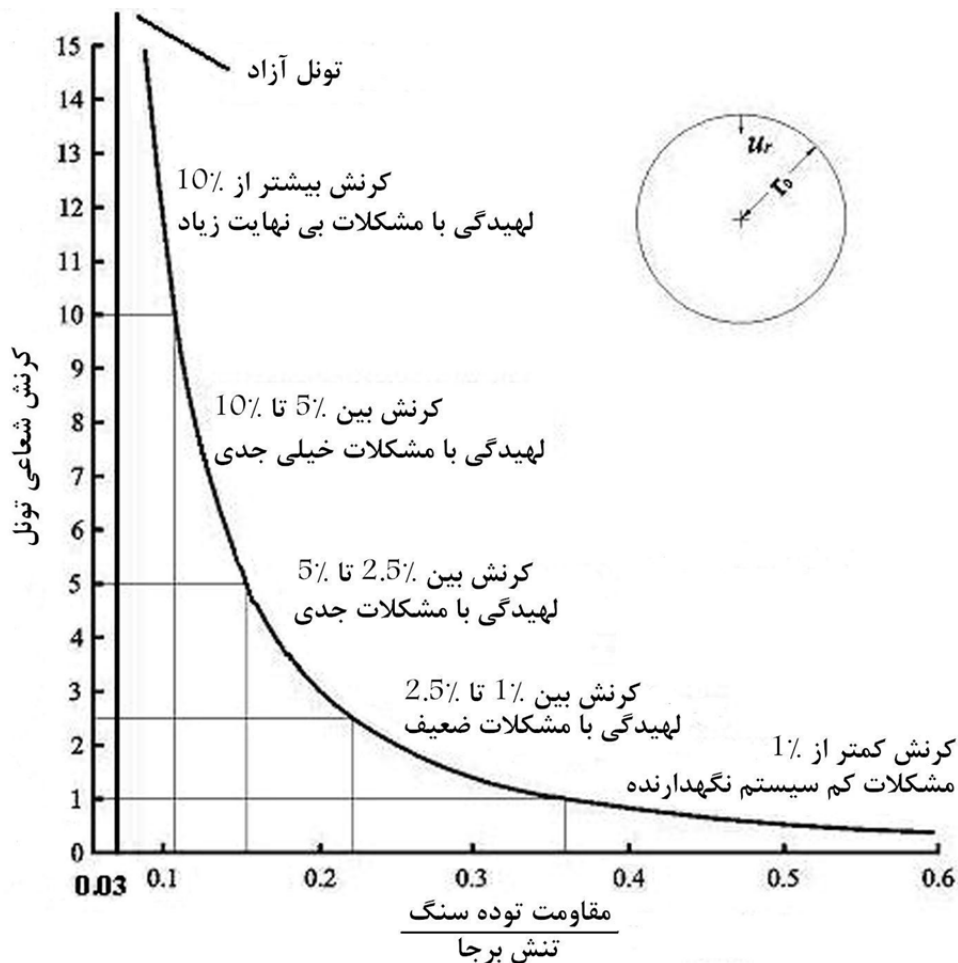
محل مقطع مزبور در نمودار گوئل، در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، این مقطع در محدوده لهیدگی متوسط قرار می‌گیرد.

۴- روش هوک و مارینوس

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 (Hoek, 1998). سپس هوک و مارینوس در سال ۲۰۰۰ نمودار کارآمدی را جهت ارزیابی مساله لهیدگی در تونل‌ها تهیه کردند که در شکل ۵ نشان داده شده است (Hoek & Marinos, 2000). مطابق شکل، با کاهش مقاومت توده سنگ، نسبت به تنش برجا و متعاقب آن افزایش کرنش، شدت لهیدگی تونل بالا می‌رود. وقتی که نسبت مقاومت توده سنگ، به استرس برجا از ۰/۲ کم‌تر شود، لهیدگی توده سنگ مشکلاتی ایجاد می‌کند که ممکن است باعث ناپایداری تونل شود (Hoek, 2001). با توجه به این‌که نسبت مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ به استرس برجا در مقطع مورد مطالعه برابر با ۰/۰۳ است، بر طبق نمودار، این مقطع در محدوده لهیدگی با مشکلات بی‌نهایت

جدول ۶- طبقه‌بندی میزان لهیدگی بر اساس روش هوک و مارینوس (۲۰۰۰)

میزان لهیدگی	کرنش جداره تونل به درصد	توضیحات
سیستم نگهدارنده با مشکل کمی مواجه است	$\epsilon_t \leq 1$	
لهیدگی با مشکلات ضعیف	$1 < \epsilon_t \leq 2/5$	
لهیدگی با مشکلات جدی	$2/5 < \epsilon_t \leq 5$	
لهیدگی با مشکلات خیلی جدی	$5 < \epsilon_t \leq 10$	
لهیدگی با مشکلات بی نهایت زیاد	$10 < \epsilon_t$	رده تونل آزاد

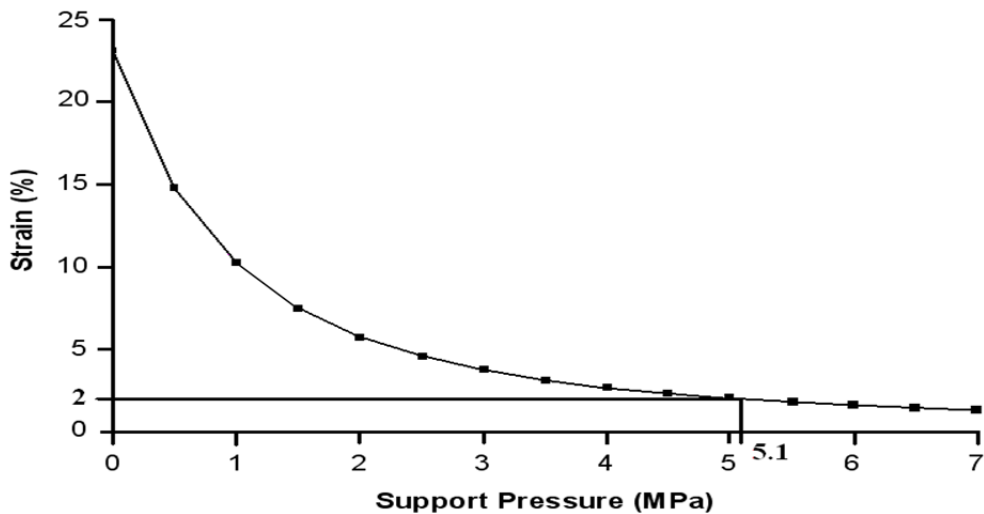


شکل ۵- نمودار هوک و مارینوس (۲۰۰۰) و محل مقطع بحرانی در قطعه دوم تونل آزاد بر روی آن

تعیین عمق شروع لهیدگی

به منظور تعیین مقاطعی از تونل که دارای استعداد ایجاد لهیدگی می‌باشند، با توجه به روش‌های تجربی ارائه شده در این مقاله، نسبت به تخمین عمق شروع این پدیده در سنگ میزبان، اقدام شد. این میزان در روش جتوا (برای لهیدگی مسئله‌دار) ۳۷ متر، در روش سینگ ۲۲۰ متر، روش گوئل ۳۹۹ متر و در روش هوک و مارینوس برای شروع لهیدگی با.

شماره دو در حد ۲ درصد، نموداری تهیه شده که در شکل ۶ ارائه شده است. این نمودار، با استفاده از رابطه هوک-مارینوس و با قرار دادن فشارهای نگهدارنده مختلف در رابطه و به دست آوردن کرنش محوری متناسب با آن، رسم گردیده است. با توجه به نمودار ترسیم شده، حداقل فشار نگهدارنده لازم برای نگه داشتن نسبت تغییرشکل دیواره به شعاع تونل به مقدار کم‌تر از ۲ درصد، برابر با ۵/۱ مگاپاسکال می‌باشد.



شکل ۶- تغییر شکل دیواره تونل آزاد در مقطع بحرانی بر اساس رابطه هوک و مارینوس

از روش‌های بررسی لهیدگی در حین حفاری تونل‌ها اشاره گردید. با بررسی اجمالی این روش‌ها مشخص شد که وقوع این پدیده به دو فاکتور اساسی یعنی عمق نسبتاً زیاد تونل و دیگری ضعیف بودن توده سنگ در برگیرنده از لحاظ خصوصیات ژئومکانیکی، وابسته است. با توجه به نتایج حاصل از این روش‌های تجربی، این تونل با پدیده لهیدگی مواجه خواهد شد و عمق شروع پدیده لهیدگی در قطعه دوم تونل آزاد به طور میانگین حدود ۱۸۰ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به این مساله در مترهاژ ۴۷۰ تا ۶۱۵۰ تونل احتمال وقوع این پدیده وجود دارد. این بخش از تونل باید در مراحل بعدی با دقت بیشتری مطالعه شود. با توجه به تفاوت زیاد اعداد به دست آمده توسط روش‌های تجربی برای تعیین عمق شروع لهیدگی، پیشنهاد می‌شود از روش‌های تحلیل عددی برای بررسی دقیق‌تر این مساله، استفاده شود. میزان تغییر شکل دیواره تونل در مقطع بحرانی، بدون فشار نگهدارنده ۲۳/۱ درصد محاسبه شده که نشان‌دهنده مشکلات زیاد از لحاظ لهیدگی است. برای رساندن این مقدار به ۲ درصد، حدود ۵/۱ مگاپاسکال فشار نگهداری لازم است.

مشکلات جدی، حدود ۶۵ متر به دست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود، دامنه عمق شروع لهیدگی در روش‌های تجربی مختلف، بسیار متفاوت است. این مساله به دلیل فاکتورهای متفاوتی است که توسط هرکدام از این روش‌ها، برای ارزیابی این پدیده در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر فوق، در نهایت عمق حدود ۱۸۰ متر با میانگین‌گیری به عنوان عمق شروع این پدیده در مسیر تونل در نظر گرفته شد. در نتیجه تخمین زده می‌شود که مترهاژ ۴۷۰ تا ۶۱۵۰ تونل دارای استعداد بروز این پدیده باشد. ضمناً این نکته لازم به یادآوری است که روش سینگ در میان روش‌های تجربی ذکر شده هم‌خوانی بیشتری با روش تحلیل عددی داشته که این امر نیاز به بررسی بیشتر و مقایسه نتایج به دست آمده در بررسی‌های میدانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله استعداد ایجاد لهیدگی در قطعه دوم تونل انتقال آب آزاد که از توده سنگ‌های غیر مقاوم اسلیتی و فیلیتی عبور می‌کند، مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور به تعدادی

منابع

- شریف زاده، م.، س. م.، دلبری. (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، ص ۳۶۰-۳۴۹
- قائم پناه، م. ص. (۱۳۸۷) تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهدارنده قطعات اول و دوم از مجموعه تونل های سامانه انتقال آب آزاد- روانسر، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- مهندسین مشاور گمانه کاو (۱۳۸۶) گزارش نهایی آزمایش های ژئومکانیکی تونل آزاد
- مهندسین مشاور مهتاب قدس (۱۳۸۵) گزارش مقدماتی زمین شناسی مهندسی سامانه انتقال آب آزاد- روانسر
- میرمحرابی، ح. (۱۳۸۴) تحلیل پایداری و تعیین سیستم نگهدارنده تونل انتقال آب کسلیان، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد
- Daligic, S. (2002) Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian motorway, Turkey, *Engineering Geology*, 67, 73-96
- Einstein, H. (1996) Tunneling in difficult ground-swelling behavior and identification of swelling rock, *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, 113-124
- 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
- Hoek, E. (1998) Tunnel support in weak rock, *Symposium of Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan, November 20- 22
- Hoek, E. (2001) Big tunnels in bad rock, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 726-740
- Hoek, E. (2007) *Practical Rock Engineering*, available online in WWW.Rocscience.com/Hoek/pdf/Practical_Rock_Engineering.
- Hoek, E., Marinos, P. (2000) Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, *Tunnels and Tunneling International*.
- 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
- Shalabi, F.I. (2005) FE analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models, *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 20, 271-279
- 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
- Singh, M., Singh, B., Choudhari, J. (2007) Critical strain and squeezing of rock mass in tunnels, *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, 22, 343-350