

تعیین پتانسیل فشارندگی به کمک روش‌های آماری و ارائه راهکار بهینه جهت عبور از زون گسله پورکان - وردیج واقع در مسیر تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تهران

محمد رضا جاری^{۱*}، سید یحیی روحانی^۲، پرویز رفعتی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امام حسین

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امام حسین

۳- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه امام حسین

(دریافت آبان ۹۲، پذیرش اسفند ۹۲)

چکیده

یکی از عوامل مهم در حفاری تونل‌های مکانیزه انتخاب مسیر مناسب است. در این تحقیق به بررسی چگونگی انتخاب مسیر قطعه دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تهران پرداخته شده است. با توجه به وجود گسل‌های متعدد در طول مسیر این تونل از جمله گسل فعال پورکان - وردیج و احتمال وقوع پدیده فشارندگی و تبعات ناشی از آن، پیش بینی احتمال وقوع این پدیده بر اساس روش‌های موجود شامل روش سینگ، جتوا، گوئل و هوک و مارینوس در مسیرهای پیشنهادی شامل مسیر مستقیم و مسیر قوسی (مسیر با طول بیشتر به منظور دور شدن از هسته مرکزی گسل) در دستور کار قرار گرفت و با تخصیص درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی بر اساس طبقه بندی‌های پیشنهادی توسط محققین فوق‌الذکر، محاسبه درصد ریسک میانگین وقوع پدیده فشارندگی در دو مسیر مستقیم و قوسی با استفاده از تحلیل‌های آماری انجام شد. نتایج گویای آن است که درصد ریسک میانگین احتمال وقوع پدیده مذکور در حین حفاری مسیر اجرا شده فعلی (مسیر قوسی) در قیاس با مسیر مستقیم در حدود ۴۲/۶۹٪ کمتر می‌باشد. همچنین با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه می‌توان دریافت که طول زون گسل پورکان - وردیج در حین حفاری در مسیر مستقیم ۱۲۵ متر است که تقریباً ۵/۲ برابر مسیر قوسی بوده است. بنابراین با توجه به افزایش احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری در مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی و نیز با لحاظ طول محدوده گسله، محاسبه نسبت احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی انجام و مشخص گردید که نسبت مذکور ۱۷/۴ بوده که گویای میزان درصد ریسک بسیار بالا در حین حفاری مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی است. بنابراین با در نظر گرفتن ریسک حفاری مسیر مستقیم و احتمال گیر کردن و یا مدفون شدن دستگاه حفاری TBM در حین حفاری مسیر مذکور، اجرای عملیات حفاری مسیر قوسی به منظور جلوگیری از بروز مخاطرات احتمالی در دستور کار قرار گرفت.

کلمات کلیدی

فشارندگی، درصد ریسک احتمال وقوع فشارندگی، نسبت احتمال وقوع پدیده فشارندگی، مسیر مستقیم، مسیر قوسی

۱- مقدمه

مطالعات زمین‌شناسی در پروژه‌های عمرانی نقش بسزایی در کاهش ریسک، صرفه‌جویی در زمان و هزینه اجرای پروژه‌های عمرانی داشته و عامل تعیین‌کننده در نحوه اجرای این گونه پروژه‌ها است.

پروژه تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تهران یکی از پروژه‌های در حال ساخت، جهت تأمین آب مورد نیاز شهر تهران است. در مسیری از تونل قطعه دوم انتقال آب کرج-تهران، بررسی‌های میدانی و صحرایی شواهدی را مبنی بر وجود یک گسل رو رانده با پهنای خردشدگی زیاد به نام گسل پورکان-وردیج به ثبت رسانیده است. این گسل از لحاظ پارامترهای ژئومکانیکی و نحوه برهم‌کنش آن با دستگاه TBM فعال در تونل، تردیده‌های زیادی از لحاظ وجود خطرات فشارندگی، ریزش و هجوم آب به داخل تونل را ایجاد کرده بود. به منظور کاهش ریسک حفاری ناشی از برخورد با زون گسله پورکان وردیج و نیز کاهش درصد احتمال وقوع پدیده فشارندگی، مسیرهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت دو گزینه حفاری مسیر مستقیم و نیز مسیر قوسی به منظور دوری جستن از هسته مرکزی گسل (مطابق شکل ۱) به عنوان گزینه‌های مناسب‌تر مورد ارزیابی ویژه قرار گرفتند که گزینه مسیر قوسی دارای طول بیشتری بوده است ولیکن طول زون گسله متقاطع با مسیر تونل در حین حفاری این مسیر بسیار کمتر از مسیر قوسی اجرا شده بوده است. مشخصات ژئومکانیکی و هندسی محدوده گسل خورده متقاطع با تونل در مسیرهای اجرا شده و مسیر مستقیم در جدول (۱) ارائه شده است. در ادامه، به بررسی اجمالی احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری مسیرهای قوسی و مستقیم پرداخته شده است.

۲- بررسی احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیر اجرا شده

در این قسمت سعی بر آن است تا با استفاده از برخی روابط موجود نظیر روابط سینگ، گوئل، جتوا و هوک و مارینوس به بررسی احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیرهای اجرا شده و مستقیم پرداخته شود.

۲-۱- روش سینگ و همکاران

سینگ در سال ۱۹۹۲ بر پایه مطالعات انجام شده روی ۳۹ تونل در حال حفاری و با استفاده از شاخص طبقه بندی بارتن (Q) و نیز با داشتن ارتفاع روباره تونل‌ها (H) رابطه (۱) را به منظور تشخیص مناطق مستعد فشارندگی، ارائه نمود بر این اساس فشارندگی در تونل زمانی رخ می‌دهد که ارتفاع روباره از ارتفاع ارائه شده بر اساس رابطه (۱) بیشتر باشد [۷].

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

با توجه به اینکه شاخص طبقه بندی بارتن در محدوده متقاطع با گسل در حین حفاری مسیرهای قوسی (مسیر اجرا شده) و مستقیم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۲۸ است، با استفاده از رابطه ارائه شده توسط وی، ارتفاع حداقل روباره مستعد بروز پدیده فشارندگی در مسیرهای قوسی و مستقیم به ترتیب برابر ۴۰۸/۷۲ و ۳۷۹/۷ متر بدست می‌آید که با توجه به ارتفاع روباره ۴۰۰ و ۴۵۰ متری در محدوده گسله متقاطع با مسیر تونل در مسیر قوسی و مستقیم، احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری مسیر قوسی وجود ندارد ولی احتمال وقوع پدیده مذکور در حین حفاری مسیر مستقیم، وجود دارد.



شکل ۱: نمایی از مسیر مستقیم و اجرا شده تونل (مسیر K-BR) [۲].

جدول ۱: مشخصات ژئومکانیکی محدوده متقاطع گسل پورکان - وردیج با مسیر مستقیم و مسیر اجرا شده و خصوصیات مسیرهای مورد بررسی [۱].

مشخصات	مسیر اجرا	مسیر مستقیم
طول مسیر (m)	۱۳۴۵۵	۱۲۰۷۸
ارتفاع حداکثر روباره در مسیر (m)	۸۰۰	۱۲۲۰
ارتفاع روباره در محدوده گسل (m)	۴۰۰	۴۵۰
زون خرد شده ناشی از فعالیت گسل (m)	۲۰	۱۲۵
پهنه زون اغتشاش	۲۵۰	۳۰۰
GSI	۲۵	۳۵
فاکتور اغتشاش ناشی از نوع حفاری	۰	۰
چسبندگی (MPa)	۱/۵۱	۱/۷۴
زاویه اصطکاک داخلی (deg)	۴۱/۱۶	۴۵/۹۶
تنش کششی (MPa)	-۰/۰۴۷	-۰/۱
مقاومت فشاری محوری (MPa)	۲/۰۹	۲۱/۴
مدول دگر شکل پذیری (MPa)	/۳۷	۴۲۱۶/۹۷
شاخص طبقه بندی بارتن	۱/۲۸	۱/۶

۲-۲- روش گوئل و همکاران (۱۹۹۵)

روش ساده تجربی دیگر، روشی است که توسط گوئل و همکاران در سال ۱۹۹۵ بر پایه عدد توده سنگ (N) در شرایطی که فاکتور کاهش تنش معادل یک باشد ارائه شده است [۲]:

$$N = (Q)_{SRF=1} \quad (2)$$

گوئل و همکاران در سال ۱۹۹۵ با بررسی وضعیت فشارندگی در ۹۹ تونل، نموداری لگاریتمی را مطابق شکل (۲) جهت تعیین وضعیت فشارندگی ارائه کردند که در آن، معادله خط مرزی بین شرایط فشارنده و غیر فشارنده به صورت رابطه (۳) تعیین می‌شود [۳]:

$$H = (275N^{0.33})B^{-0.1} [m] \quad (3)$$

پارامترهای این معادله عبارتند از:

H: عمق تونل

B: دهانه یا قطر تونل

N: عدد توده سنگ

با محاسبه عدد توده سنگ (N) در محدوده گسله متقاطع تونل در مسیرهای قوسی و مستقیم به ترتیب برابر ۱/۶۳ و ۱/۳ است و نیز با در اختیار داشتن قطر تونل (B) برابر ۴/۶۶ متر، عمق مرزی مستعد وقوع پدیده فشارندگی بر اساس رابطه گوئل و همکاران در مسیر قوسی و مستقیم به ترتیب برابر با ۲۷۵/۳ و ۲۵۷ متر است. بنابراین با توجه به (شکل ۲) احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیرهای قوسی و مستقیم، کم و متوسط خواهد بود.

۲-۳- روش جتوا و همکاران

درجه فشارندگی در سال ۱۹۸۴ توسط جتوا و همکاران به صورت رابطه (۴) ارائه شد:

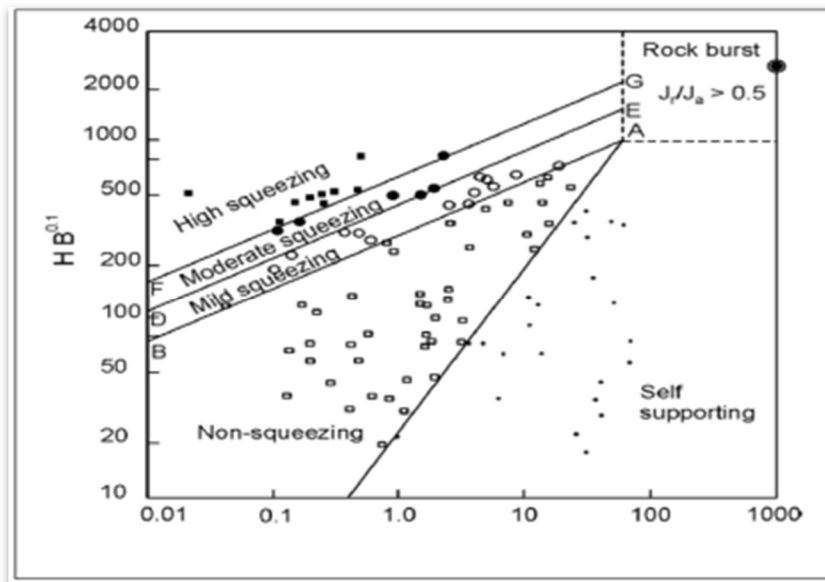
$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad (4)$$

که در آن σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ، H عمق تونل از سطح زمین و γ وزن مخصوص توده سنگ است. همچنین طبقه بندی فشارندگی بر اساس نظر وی مطابق جدول (۲) است [۶].

جدول ۲- طبقه بندی فشارندگی مطابق با نظریه جتوا و همکاران.

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

با محاسبه درجه فشارندگی بر اساس رابطه جتوا در مسیرهای قوسی و مستقیم، مقدار پارامتر مذکور به ترتیب برابر با ۰/۴۲ و ۰/۱۸۵ بدست می‌آید که با توجه به جدول (۲)، توده سنگ محدوده گسله متقاطع با مسیر تونل در مسیرهای قوسی و مستقیم به ترتیب در محدوده فشارندگی متوسط و زیاد قرار می‌گیرد.



شکل ۲: روش پیش بینی وضعیت فشارندگی توسط گوئل و همکاران [۲].

رابطه (۶) را جهت محاسبه کرنش محوری سینه کار (ϵ_f) بر حسب درصد ارائه شد.

$$\epsilon_f = 0.1 \left(1 - \frac{P_i}{P_0} \right) \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \frac{(3^{P_i/P_0+1})}{(3.8^{P_i/P_0+0.54})} \quad (6)$$

بر اساس ملاحظات فوق و تجربیات بدست آمده از تونلسازی در کشورهای ونزوئلا، تایوان و هندوستان، هوک در سال ۲۰۰۰ منحنی شکل (۳) را جهت تخمین اولیه وضعیت فشارندگی ارائه نمود [۵].

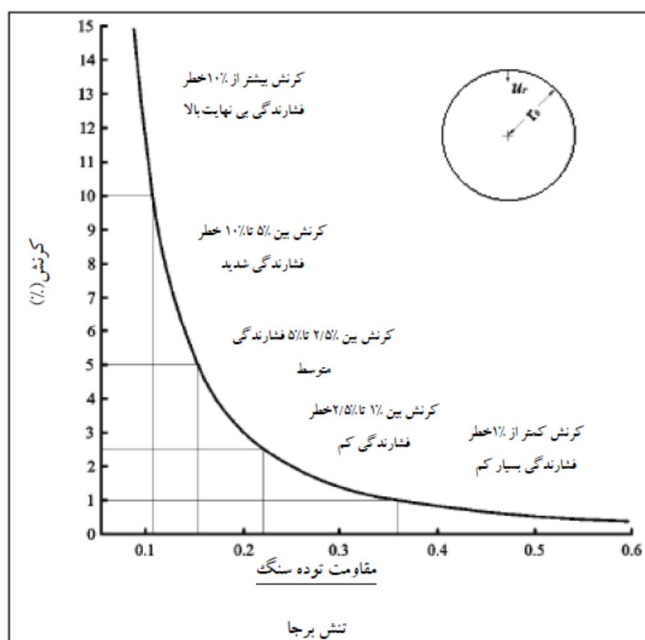
با توجه به اینکه مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ در محدوده گسله متقاطع با مسیر تونل در مسیرهای قوسی و مستقیم به ترتیب برابر $4/21$ و $2/09$ و مقدار تنش برجا 10 و $11/25$ مگاپاسکال است، نسبت مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ به تنش برجا به ترتیب برابر $0/421$ و $2/71$ درصد بوده و کرنش شعاعی جداره تونل، (ϵ_t) طبق رابطه (۵) در مسیر قوسی برابر $0/74$ درصد و در مسیر مستقیم برابر $2/71$ درصد است. بنابراین مطابق شکل (۳) محدوده گسله متقاطع با مسیر تونل در مسیر قوسی در رده فشارندگی بسیار کم و در مسیر مستقیم در رده فشارندگی شدید قرار دارد.

۲-۴- 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 شاخصی جهت تعیین پتانسیل فشارندگی در تونل‌ها استفاده کرد و در سال ۲۰۰۰ به همراه مارینوس نمودار کار آمدی را جهت ارزیابی فشارندگی در تونل‌ها ارائه نمودند. در این نمودارها کرنش شعاعی جداره تونل و همچنین کرنش محوری جبهه کار تونل با توجه به نیروهای داخلی مختلف اعمالی از سیستم نگهداری در مقابل نسبت مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ به تنش بر جا، ترسیم شده است [۴]. هوک در سال ۲۰۰۰، با ارائه مقاله‌ای تحت عنوان «تونل‌های بزرگ در سنگ‌های بد» به کمک تحلیل‌های اجزای محدود با تقارن محوری و بررسی طیف وسیعی از سنگ‌ها و نیز با بررسی تنش‌های برجا و نیروی وارد بر سیستم نگهداری (P_i) رابطه تقریبی (۵) را برای محاسبه کرنش شعاعی جداره تونل (ϵ_t) بر حسب درصد ارائه کرد [۴]:

$$\epsilon_t = 0.15 \left(1 - \frac{P_i}{P_0} \right) \frac{\sigma_{cm}}{P_0} \frac{(3^{P_i/P_0+1})}{(3.8^{P_i/P_0+0.54})} \quad (5)$$

به طور مشابه، با توجه به اهمیت کنترل رفتار جبهه کار در حال پیشروی تونل بر شرایط فشارندگی توده سنگ،



شکل ۳: طبقه بندی رفتار فشارندگی بر اساس نسبت مقاومت توده سنگ به تنش برجا [۴].

جدول ۳: درصد احتمال وقوع پدیده فشارندگی با لحاظ کلاس‌های تعریف شده در طبقه بندی‌های ارائه شده توسط محققین مختلف

درصد ریسک تخصیص یافته	روش سنگ	درصد ریسک تخصیص یافته	روش گوئل	درصد ریسک تخصیص یافته	روش جتوا	درصد ریسک تخصیص یافته	روش هوک و مارینوس
۱۰۰	شرایط فشارندگی	۶۶-۱۰۰	فشارندگی زیاد	۶۶-۱۰۰	فشارندگی زیاد	۸۰-۱۰۰	فشارندگی بی نهایت بالا
						۶۰-۸۰	فشارندگی شدید
۰	شرایط غیر فشارنده	۳۳-۶۶	فشارندگی متوسط	۳۳-۶۶	فشارندگی متوسط	۴۰-۶۰	فشارندگی متوسط
						۲۰-۴۰	فشارندگی کم
						۰-۲۰	فشارندگی بسیار کم

مشخص شد که احتمال بروز پدیده فشارندگی در حفاری مسیر قوسی نسبت به مسیر مستقیم، ۴۲/۶۹٪ کمتر است. درصد احتمال وقوع پدیده فشارندگی در دو مسیر مستقیم و قوسی به ترتیب در جدول‌های (۴) و (۵) ارائه شده است.

۳- محاسبه درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی

درصد ریسک احتمال فشارندگی را می‌توان با لحاظ کلاس‌های تعریف شده توسط محققین مذکور از صفر تا ۱۰۰ مطابق جدول (۳) تخصیص داد.

با تخصیص مقادیر درصد احتمال وقوع پدیده مذکور و با انجام تحلیل‌های آماری، میانگین درصد احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیرهای مستقیم و قوسی محاسبه گردید و

جدول ۴: درصد احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری در مسیر مستقیم

معیار پیش‌بینی	نوع رفتار	درصد ریسک
روش سینگ	فشارنده	۱۰۰
روش گوئل	فشارندگی زیاد	۴۱
روش جتوا	فشارندگی زیاد	۸۳/۷۳
روش هوک و مارینوس	فشارندگی زیاد	۴۱/۶۸
میانگین		۶۶/۶

جدول ۵: درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری در مسیر اجرا شده

معیار پیش‌بینی	نوع رفتار	درصد ریسک
روش سینگ	غیر فشارنده	صفر
روش گوئل	فشارندگی ملایم	۱۶/۵
روش جتوا	فشارندگی متوسط	۶۴/۳۵
روش هوک و مارینوس	فشارندگی بسیار کم	۱۴/۸
میانگین		

۴- تأثیر طول زون گسل پورکان وردیج بر درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیر مستقیم و اجرا شده

یکی دیگر از عوامل تأثیر گذار در انتخاب مسیر قطعه دوم تونل انتقال آب کرج به تهران طول زون گسله متقاطع با مسیر تونل در مسیرهای اجرا شده و مستقیم است، به گونه‌ای که با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه می‌توان دریافت که طول زون گسل پورکان - وردیج در حین حفاری در مسیر مستقیم ۱۲۵ متر که تقریباً ۵/۲ برابر مسیر قوسی بوده است [۱]. بنابراین با توجه به افزایش احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری در مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی و نیز با لحاظ طول محدوده گسله و با محاسبه نسبت احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی مطابق با رابطه زیر، می‌توان چنین بیان نمود که نسبت مذکور ۱۷/۴ است که گویای میزان درصد ریسک بسیار بالا در حین حفاری مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی است.

$$(۷) \quad \text{نسبت احتمال وقوع پدیده فشارندگی} = \frac{\text{طول مسیر مستقیم متقاطع با زون گسله} \times \text{احتمال وقوع پدیده فشارندگی}}{\text{طول مسیر قوسی متقاطع با زون گسله} \times \text{احتمال وقوع پدیده فشارندگی}}$$

$$\text{نسبت احتمال وقوع پدیده فشارندگی} = \frac{۱۲۵ \times ۶۶/۶\%}{۲۰ \times ۲۳/۹۱\%} = ۱۷/۴$$

۵- تبعات ناشی از اجرای حفاری مسیر مستقیم

همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره شد با توجه به افزایش احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری مسیر مستقیم و در نتیجه افزایش درصد ریسک انجام عملیات حفاری، احتمال مدفون شدن دستگاه TBM و یا گیر کردن آن به مدت طولانی بسیار زیاد است که باعث تحمیل هزینه‌های بسیار زیادی به پروژه خواهد شد. بنابراین با در نظر گرفتن ریسک حفاری مسیر مستقیم و احتمال بروز مشکلات فوق‌الذکر در حین حفاری این مسیر، حفاری مسیر قوسی به دلیل ریسک کمتر و نیز طول کمتر محدوده گسله در مقایسه با مسیر مستقیم در دستور کار قرار گرفت.

۶- نتیجه گیری

۱- با بررسی احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیرهای مستقیم و قوسی بر اساس روابط ارائه شده توسط سینگ، گوئل، جتوا و هوک و مارینوس مشخص گردید که احتمال وقوع پدیده مذکور در مسیر مستقیم به مراتب بیشتر از مسیر قوسی است.

۲- با تخصیص درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی بر اساس طبقه بندی‌های پیشنهادی توسط محققین مذکور و با میانگین گیری درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی، مشخص گردید که درصد ریسک میانگین احتمال وقوع پدیده مذکور در مسیر مستقیم حدود ۴۲/۶۹٪ از مسیر قوسی بیشتر است.

۳- با لحاظ طول محدوده گسله در مسیر قوسی نسبت به مسیر مستقیم و با توجه به درصد ریسک احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیرهای مذکور، نسبت احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیر مستقیم به قوسی محاسبه گردید. نتایج گویای آن است که احتمال وقوع پدیده فشارندگی در حین حفاری مسیر مستقیم، ۱۷/۴ برابر مسیر قوسی است.

۴- با توجه به افزایش احتمال وقوع پدیده فشارندگی در مسیر مستقیم نسبت به مسیر قوسی و به منظور کاهش ریسک عملیات حفاری تونل و جلوگیری از بروز مخاطرات احتمالی نظیر گیر کردن و یا مدفون شدن دستگاه TBM، که منجر به تحمیل هزینه و بروز تاخیرات ناخواسته در حین اجرای پروژه خواهد شد، حفاری مسیر قوسی با طول بیشتر به منظور دوری جستن از هسته مرکزی گسل در دستور کار قرار گرفت.

۷- مراجع

- [1] Gholamreza khanlari, reza ghaderi meybody, ehsan mokhtari . 2012. Engineering geological study of the second part of water supply karaj to tehran tunnel with emphasis on squeezing problems. Engineering geology, 145-146(2012) 9-17
- [2] Goel.R.K., Jethwa J.L., 1991. Prediction of support pressure using RMR classification. Proc. Indian Getech. Conf.,Surat, India, 203-205.
- [3] Goel.R.K., Jethwa J.L., Dhar B.B., 1996. Effect of tunnel size on support pressure. Technical Note. Int. J. Rock Mech.and Min. Sci. &Geomech. Abstr.,Pergamon, 33(7), 749-755.
- [4] Hoek E., Big tunnels in bad rock. 2001. J geotechnical and geoenv eng. 127(9):726-740.
- [5] Hoek E, Marinos.P. 2000 Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and tunneling international.32 (11):45-51, 32(12), 34-36.
- [6] Jethwa JL, Singh B, Singh Bhawani (1984) Estimation of ultimatelrock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions a new approach. In: Proceedings of the ISRM Symposium onDesign and Performance of Underground Excavations, Cambridge,UK, 3-4 September.
- [7] Singh M, Singh B, Choudhari J. 2007. Critical strain and squeezing of rock mass in tunnels. Tunneling and Underground Space Technology 22:343-350