

ارزیابی تزریق پذیری با هدف آب بندی به روش SPI در گنگلومرای پلیوسن

(مطالعه موردی)

داود محمدی^۱، عبدالرضا نوریزدان^{۲*}

دریافت مقاله: ۹۵/۰۷/۰۵ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۷/۳۰

چکیده

راه آهن دورود- خرم آباد با طول ۱۱۴ کیلومتر، در ۵ فاز جداگانه در دست ساخت می باشد. از نظر زمین شناسی، بخش زیادی از طول این مسیر، از زون زاگرس خرد شده و راندگی چغلودی عبور می کند. فاز ۵ از کیلومتر ۷۲ تا ۹۸، و با طول ۲۶ کیلومتر، حدفاصل بیران شهر، تا منطقه ده پیر در شمال شهر خرم آباد، دارای دو دستگاه تونل با طول بیش از ۷۵۰۰ متر می باشد. با توجه به اقلیم منطقه و بالا بودن سطح آب زیر زمینی در مسیر، مطالعات توده سنگی با هدف آب بندی تونل ضروری است. به این منظور، شناخت ویژگی گنگلومرای پلیوسن شامل ویژگی های مکانیکی و فیزیکی در مسیر تونل، از اهمیت خاصی برخوردار است. به این منظور ابتدا میزان نفوذپذیری توده سنگ با استفاده از آزمایش های فشار آب (Water pressure tests) تعیین شده است. سپس، میزان تزریق پذیری این واحد سنگی بر اساس شاخص SPI مشخص شده است. بر اساس نتایج SPI، رفتار توده سنگ در ۱۹٪ موارد در کلاس C، در ۶۷٪ از موارد در کلاس B و در ۱۴٪ از موارد در کلاس A قرار می گیرد. همچنین ۸۶ درصد از توده سنگ در محل های مورد مطالعه نیاز به بهسازی با استفاده از سیمان دارد. همچنین می توان گفت، به علت شرایط یکسان زمین شناسی در این منطقه، تونل های در دست ساخت در گنگلومرای میوسن نیاز به عملیات بهسازی دارند.

کلید واژه ها: شاخص نفوذپذیری ثانویه، لوژان، راه آهن دورود- خرم آباد، گنگلومرای پلیوسن.

۱- عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان s_d_mohammadi@yahoo.com

۲- دانشجویان دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

توان به مقاومت، تنش های موجود در منطقه، هوازدهگی و سلامت سنگ اشاره کرد. در بحث تزریق با وجود تنش های فعال در محل، کار با مشکل روبرو می شود. همچنین در سنگهای مقاوم نسبت به سنگ های ضعیف و نرم تزریق مناسب تر انجام می گیرد. این موضوع رابطه مستقیم با درجه هوازدهگی درزه دارد که در سنگهای سخت و مقاوم مقدار آن کمتر می باشد، چون با افزایش هوازدهگی به علت ریزش دیواره درزه در هنگام تزریق مقدار تزریق کاهش می یابد (خانلری ۱۳۸۹). نفوذپذیری توده های سنگی درزه دار به خصوصیات درزه ها از جمله درجه درزه داری، بازدهی، تداوم درزه و حضور مواد هوازده بستگی زیادی دارد (Foyo et al., 2005). عمده پژوهش ها و مطالعات انجام گرفته در زمینه انجام تزریق پذیری با توجه به نتایج آزمایش لوژان و شاخص نفوذپذیری ثانویه SPI (Secondary Permeability Index) در مورد پی سنگ سدهای خاکی و بتنی صورت گرفته است و در زمینه موضوع این پژوهش تحقیقات اندکی انجام شده است. کیفیت توده سنگ می تواند توسط شاخص نفوذپذیری ثانویه بر آورد گردد. این موضوع می تواند با مطالعه جعبه مغزه های ناشی از حفاری انجام گردد (Foyo et al., 2005). مشکل تراوش فرار آب از پی سد بختیاری به واسطه وجود حفرات کارستی در سازند سروک با استفاده از آزمون لوژان و نفوذپذیری ثانویه (SPI) و استفاده از روش طبقه بندی توده سنگ بارتون (Q-System) بررسی شد و نتایج لزوم تحقیقات بیشتر برای تعیین نوع و مقدار سیمان را نشان می دهد (Shohrabi- Bidar et al., 2016). با هدف ارزیابی موضوع آب بندی گالری دسترسی به هسته رسی سد رودبار لرستان، با انجام حفاری ۳ گمانه و انجام آزمون های لوژان، شاخص RQD و SPI، تعیین و توده های سنگی محل به منظور تزریق به روش G.I.N طبقه بندی شدند (عطایی ۱۳۹۲). همچنین با ارزیابی نتایج عملیات تزریق شیمیایی جهت تقویت آب بندی پرده آب بند سیمانی در پی سنگ های گنگلومرایی تونل ۹۵۰ سد مخزنی کرخه،

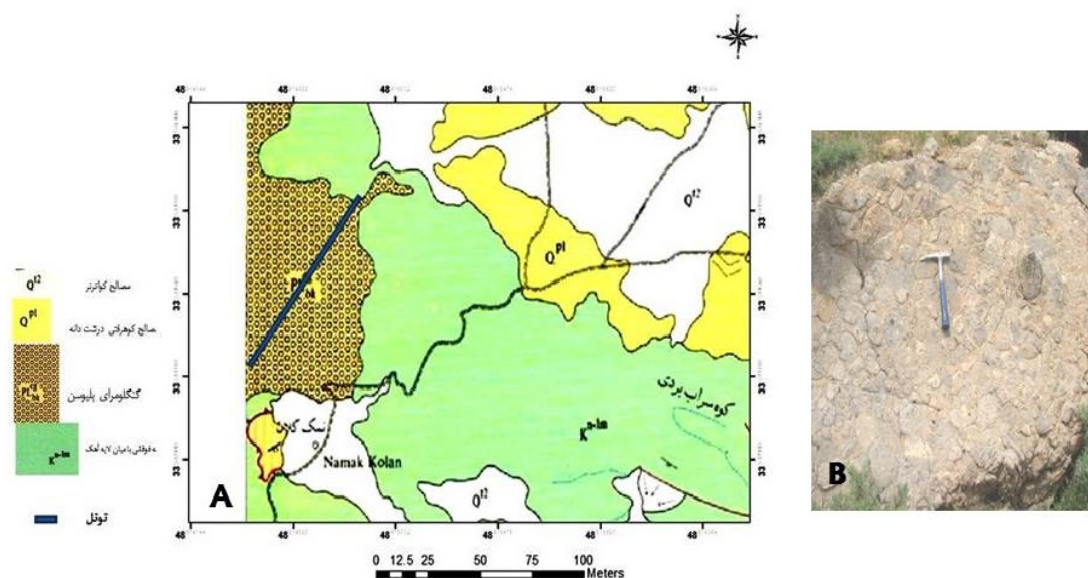
آب بندی در تونل های ترابری مستلزم شناخت دقیق از شرایط زمین شناسی توده های سنگی در بر گیرنده تونل می باشد. مهمترین عوامل زمین شناسی تاثیر گذار بر آب بندی تونل ها به ویژه با استفاده از دوغاب سیمان عبارت از: سنگ شناسی، وضعیت درزه داری، شرایط آب زیر زمینی و سطحی، شرایط اقلیمی، توپوگرافی، کیفیت و مقاومت توده سنگ و شاخص مقاومت زمین شناختی (GSI) می باشند. ویژگی های فیزیکی سیستم های ناپیوستگی شامل بازدهی، فاصله داری، نوع ماده پرکننده، زاویه و جهت ناپیوستگی نسبت به محور گمانه های تزریق، درجه هوازدهگی و شرایط رطوبتی در میزان و کیفیت تزریق پذیری تاثیر زیادی دارند. مطالعه و بررسی ویژگی های زمین شناسی یک منطقه می تواند در شناخت و معرفی سیستم های ناپیوستگی که رفتار مهندسی توده سنگ را کنترل می کنند، بسیار موثر باشد. نتایج این مطالعات می تواند در طراحی گمانه های تزریق و نوع دوغاب به کار آید. داشتن اطلاعات کافی از شیب و امتداد درزه ها در جهت یابی حفر گمانه های تزریق موثر است. تعداد و فاصله داری درزه ها در انتخاب محل حفر گمانه ها و تعداد گمانه ها تاثیر دارد. مطالعات انجام گرفته نشان می دهد با افزایش فاصله داری امکان انجام تزریق، آسان تر، و با کاهش میزان فاصله داری به علت افزایش تعداد درزه عمل تزریق به کندی صورت می گیرد، که این می تواند به دلیل ریزش دیواره گمانه در حین عملیات تزریق یا نشست از سطح باشد. از طرفی نتایج نشان می دهد در درزه های با بازدهی ۶-۵٪ میلی متر عملیات تزریق به خوبی صورت می پذیرد، و با کاهش یا افزایش مقدار بازدهی بیش از دامنه فوق امکان تزریق دوغاب یا تثبیت آن با چالش جدی مواجه می شود (خانلری ۱۳۸۹). با وجود بازدهی در محدوده ۶-۵٪ میلی متر علاوه بر کاهش تعداد گمانه تزریق راندمان کار نیز بهتر خواهد شد. همچنین با وجود شیب بین صفر تا ۶۰ درجه نسبت به محور گمانه فرآیند تزریق بهتر صورت می گیرد. از دیگر فاکتورهای موثر در تزریق پذیری سنگ می

آب (Water pressure tests) به بررسی میزان تزریق پذیری نقاط مساله دار مسیر تونل پرداخته شده است.

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی

منطقه مورد نظر بخشی از قطعه ۵ از کیلومتر ۷۲ تا ۹۸ و شامل تونل کیلومتر ۶۰۶+۷۶ تا ۳۷۵+۸۰ راه آهن در دست احداث دورود- خرم آباد در استان لرستان است. از لحاظ زمین شناسی در زون ساختاری و رورانده چغلودندی (مجموعه ای از سنگ های کرتاسه فوقانی رانده شده بر روی مارن های میوسن زیرین)، قرار دارد. توده گنگلومرای مورد بحث در این پژوهش که در بر گیرنده طول کامل تونل کیلومتر ۷۶ تا ۸۰ می باشد، شامل ذرات گرد و مدور با ابعاد مختلف (جور شدگی ضعیف) می باشد که توسط یک سیمان آهکی به هم متصل شده اند. گنگلومرای فوق که در نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بروجرد (شکل ۱) با علامت PL_{bk}^{cg} معرفی شده شباهت های زیادی با سازند بختیاری دارد. این واحد سنگی به ضخامت بیش از ۳۰۰ متر در مکان های ارتفاع ساز مسیر تونل دارای رخنمون سطحی و زیر سطحی می باشد. این توده با یک مرز ناپیوسته بر روی مارن ها و آهک های کرتاسه فوقانی قرار گرفته است، اما به تبع راندگی چغلودندی این واحد سنگی نیز به مرور متحمل بهم ریختگی و درزه داری شده است. با توجه به نقشه زمین شناسی مسیر و بازدید های صحرائی انجام گرفته مشاهده می گردد تونل مورد مطالعه کاملاً در توده گنگلومرای پلیوسن احداث خواهد شد. واحد سنگی K^{nl-m} شامل مارن های سبز رنگ با سن کرتاسه فوقانی می باشد که در افق های زیرین این واحد به چشم می خورد که در مطالعات میدانی تنها بخش های انتهایی گمانه های شماره ۱۰ و ۱۱ در ورودی و خروجی تونل با آن برخورد می کنند. از جمله ویژگی های مهندسی این مارن ها قابلیت دوام (I_{d2}) کم و خواص پلاستیسته بالای آن می باشد.

مشخص گردید که با انجام عملیات تزریق شیمیایی مقدار لوژان از ۲۰ به ۲/۵ کاهش می یابد (میر شکرایی ۱۳۸۹). به منظور ارزیابی آب بندی تونل انتقال آب قطعه شماره ۱ کرج- تهران که در سنگ های سخت حفر گردیده است، تزریق با استفاده از دوغاب سیمان پرتلند توانسته است ۷۰ تا ۸۰ درصد نشت آب را کاهش دهد (جلالی ۱۳۹۲). با انجام یک تحقیق با عنوان کنترل نشست سطحی ناشی از تونل سازی در مناطق شهری با استفاده از بهبود مشخصات زمین، روش های مختلف بهسازی زمین از جمله تزریق تراکمی، نفوذی و جت مورد بررسی قرار گرفته و روش تزریق موثرترین روش کنترل نشست در مناطق شهری معرفی شده است (نیکزاد ۱۳۹۲). با توجه به بررسی های انجام گرفته بر روی ساختگاه سد نرگسی در جنوب غرب ایران، وجود یک ارتباط بین شاخص SPI و RQD برای تعیین نوع پرده تزریق ارائه و بر این اساس ارتباطی منطقی بین میزان باز شدگی های هیدرولیکی و مقدار آبخوری وجود ندارد، هر چند در برخی گمانه ها می توان یک ارتباط منطقی را مشاهده کرد (Ajalloeian and Azimian, 2014). موضوع آب بندی در تونل ها، که اغلب توسط تزریق دوغاب صورت می پذیرد، ارتباط نزدیکی با نتایج آزمایش های فشار آب (WPT) و لوژان دارد (Ewert, 1997). در بررسی هایی که بر روی آهک های مناطق کارستی انجام شد مشخص گردید، با اجرای پرده آب بند برخی درزه های در زیر پرده آب بند به سرعت عریض شده و تاثیر عملیات تزریق کاهش می یابد (Romanov et al., 2003). در این پژوهش با توجه به اینکه شناخت ویژگی های فیزیکی و مکانیکی واحد های سنگی در مسیر تونل ها از اهمیت خاصی برخوردار است، ابتدا ویژگی های فیزیکی و مکانیکی توده گنگلومرای در بر گیرنده تونل کیلومتر ۷۶، قطعه ۵ راه آهن دورود- خرم آباد تعیین و سپس با ارزیابی میزان نفوذپذیری این واحد سنگی با استفاده از آزمایش های فشار



شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت تونل (A) (منوچهری، ۱۳۷۰)) و تصویر توده گنگلومرای (B).

۳. مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی خصوصیات زمین شناسی توده های سنگی گنگلومرای میوسن با هدف آب بندی در برابر نشت آب و جریان های زیر زمینی، ابتدا ضمن مطالعه خصوصیات فیزیکی توده سنگ، از منطقه مورد مطالعه یک مقطع طولی تهیه شده است. سپس با استفاده از داده های به دست آمده از گمانه های احداث شده توسط مهندسين مشاور هرازراه و مطالعه کلیه مغزه های به دست آمده در عملیات حفاری و کنترل نتایج، ضمن اصلاح برخی اشکالات یا حذف برخی داده های مشکوک پتانسیل تزریق پذیری توده سنگی مورد نظر ارزیابی شده است.

به منظور تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده گنگلومرای و موثر در نفوذپذیری و تزریق پذیری برجا در طول مسیرحفر تونل قطعه ۵،۳ حلقه گمانه با قطر ۷۶ میلی متر حفر گردیده است (جدول ۱) (مهندسين مشاور هراز راه، ۱۳۹۴). با مطالعه مغزه های به دست آمده از این گمانه ها که به ترتیب در ابتدا، مرکز و انتهای مسیر تونل حفر شده اند، پروفیل زمین شناسی مسیر تونل ترسیم شده است (شکل ۲). مطالعات میدانی و مغزه های به دست آمده، وجود حداقل ۴ زون خرد شده گسلی در مسیر تونل را تایید می نماید که با توجه به بالا بودن سطح ایستابی، بررسی نفوذپذیری و تزریق پذیری این مناطق از اهداف این پژوهش می باشد.

۴. ویژگی های زمین شناسی مهندسی توده سنگ

جدول ۱. مشخصات گمانه های حفر شده در مسیر تونل

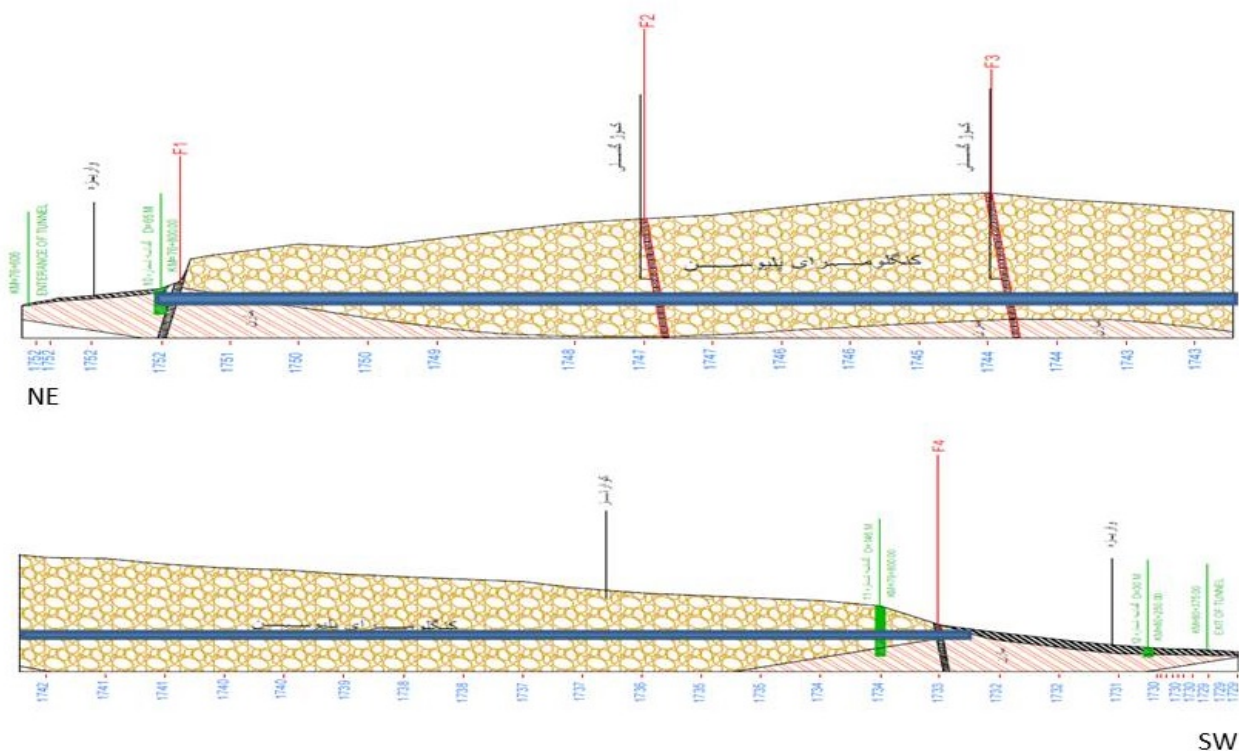
شماره گمانه	عمق (متر)	موقعیت
۱۰	۶۵	ورودی تونل کیلومتر ۷۶
۱۱	۱۴۶	کیلومتر ۷۹
۱۲	۳۰	خروجی تونل کیلومتر ۸۰

پلیوسن در محل مورد مطالعه تعیین و نتایج در جدول ۲ ارائه گردیده است. از آنجایی که شاخص کیفی توده سنگ و مقاومت سنگ دو پارامتر موثر در نفوذپذیری و تزریق پذیری توده سنگ

با توجه به اطلاعات کسب شده از گمانه های حفر شده در طول مسیر و آزمایش های انجام شده بر روی مغزه های اخذ شده از گمانه ها، مهمترین ویژگی های زمین شناسی مهندسی گنگلومرای

گنگلومرای محل تونل و لایه های مارنی زیر کف تونل طبقه بندی شده اند، که در ادامه به شرح این عوامل پرداخته شده است.

می باشد، با توجه به داده های اخذ شده از گمانه های ۳ گانه مورد نظر، فاکتورهای فوق تعیین، و با توجه به کلیه فاکتورهای موثر در طبقه بندی توده سنگ در روش ژئومکانیکی، توده



شکل ۲. مقطع طولی زمین شناسی مسیر تونل در راستای شمال شرق- جنوب غرب

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی گنگلومرای پلیوسن در مسیر مورد مطالعه (مهندسین مشاور هراز راه، ۱۳۹۴)

واحد	کمینه	بیشینه	ویژگی مکانیکی/فیزیکی
گرم بر سانتی متر مکعب	۲/۶۶	۲/۶۹	وزن واحد حجم خشک
گرم بر سانتی متر مکعب	۲/۷	۲/۷۲	وزن واحد حجم اشباع
مگاپاسکال	۰/۱۲	۰/۱۶	چسبندگی
درجه	۳۰/۸	۳۲/۹	زاویه اصطکاک داخلی
مگاپاسکال	۳۳/۹	۴۷/۲	مقاومت تک محوری اشباع

های مهندسی توده سنگ را بیان نمی کند، اما از نتایج آن می توان در بحث نفوذپذیری و فرآیند تزریق استفاده کرد. با توجه به مغزه های سنگی به دست آمده در حفاری های انجام گرفته میزان تغییرات این شاخص در مسیر تونل در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اطلاعات به دست آمده از مطالعه جعبه های مغزه اخذ شده، مشاهد می گردد لایه های مارنی

۴-۱. شاخص کیفی توده سنگ (RQD)

یکی از اصلی ترین پارامترهای تعیین کننده در نفوذپذیری توده های سنگی شاخص کیفی توده سنگ می باشد. این شاخص بیان کننده وضعیت درزه داری و توزیع سیستم های ناپیوستگی در توده سنگ است. هر چند این شاخص به شدت تابع برخی عوامل محیطی و انسانی می باشد و تمام ویژگی

تمام مصالح از جمله توده های گنگلومرایي امکان اخذ مغزه ممکن نیست. بنابراین و برای برطرف کردن این مشکل، سیستم طبقه بندی توده سنگ یا روش RMR (Bieniawski, 1995) و شاخص مقاومت زمین نیز پیشنهاد شده اند (Hoek et al., 1995). در این پژوهش از هر دو روش به منظور طبقه بندی توده گنگلومرایي پلیوسن، استفاده شده است، که نتایج در جدول ۳ ارائه گردیده است. با توجه به نتایج کسب شده از مطالعه مغزه های به دست آمده، مقدار میانگین $GSI=65$ برای توده گنگلومرایي نشان از یک سنگ با شکستگی های بلوکی و کیفیت خوب می باشد.

موجود در عمق محل تونل علاوه بر شاخص RQD کم (رده سنگ های ضعیف) از نظر طبقه بندی ژئومکانیکی نیز در رده سنگ های ضعیف قرار می گیرند. اما توده گنگلومرایي در برگیرنده تونل علاوه بر بالا بودن شاخص RQD نسبت به بخش مارنی از نظر عوامل فیزیکی و مکانیکی از کیفیت بهتری برخوردار می باشد. افت موجود در شاخص های مکانیکی این توده سنگی نسبت به موارد مشابه در مناطق اطراف بیشتر به دلیل فعالیت های تکتونیکی موجود در منطقه می باشند.

۲-۴. شاخص مقاومت زمین شناختی (GSI) و طبقه بندی توده سنگ

روش استاندارد تعیین مقاومت مصالح سنگی، استفاده از مغزه های اخذ شده با طول بیش از ۱۰ سانتی متر می باشد. اما در

جدول ۳. رده بندی مهندسی و کیفیت توده گنگلومرایي در مقاطع طولی تونل در کیلومتر ۷۶ تا ۸۰ مسیر تونل (مهندسی مشاور هراز راه، ۱۳۹۴)

طول مقطع	از کیلومتر	تاکیلومتر	واحد سنگی	ضخامت	RQD%	GSI	RMR
۴۸۷	۷۷+۰۱۸	۷۷+۵۲۶	گنگلومرای پلیوسن	۲۰۰	۵۹	۶۰-۷۰	۵۹
۴۶۹	۷۷+۵۲۶	۷۸+۰۳۴	گنگلومرای پلیوسن	۳۰۰	۵۴	۶۰-۷۰	۵۴
۹۱۱	۷۸+۰۳۴	۷۸+۹۶۵	گنگلومرای پلیوسن	۲۸۰	۵۹	۶۰-۷۰	۵۹
۸۰۲	۷۸+۹۶۵	۷۹+۷۶۷	گنگلومرای پلیوسن	۱۶۰	۵۲	۶۰-۷۰	۵۲

۵. معیارهای تزریق پذیری سنگ

ورنر (Werner, 2004) و شاخص SPI از مهمترین این معیارها می باشند. در این پژوهش به منظور ارزیابی نرخ تزریق پذیری توده سنگی گنگلومرایي پلیوسن در محل تونل کیلومتر ۷۶ راه آهن در دست اجرای دورود- خرم آباد از معیار SPI استفاده شده است. همچنین سعی شده است، نتایج این روش با معیار های لوژان مقایسه گردد.

۵-۱. معیار شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI)

به منظور ارزیابی فرایند تزریق در توده های سنگی با هدف بهسازی زمین و اصلاح شاخص های مقاومتی سنگ یا کاهش نفوذپذیری، معیار های متعددی توسط افراد مختلف ارائه شده است.

معیارهای لوژان (Lugeon and Barrage, 1933) کونتر (Kutzner, 1996)، هـولزی (Wavve, 1991)،

بر اساس معیار SPI و میزان نفوذپذیری، سنگها را به ۴ گروه تقسیم بندی می شوند (جدول ۴). در این معیار شاخص های مقاومتی و ژئومکانیکی سنگ بیان نمی گردد. با تلفیق نتایج شاخص SPI و درجه درزه داری به دست آمده از مطالعه مغزه های اخذ شده از گمانه ها، RQD می تواند یک ایده و طرح مناسب بهسازی توده های سنگی را ارائه دهد. مقدار SPI توده های سنگی از رابطه ۱ بدست می آید (Ajallouian and Azimian, 2013).

$$SPI = C \frac{\ln\left(\frac{2le}{r} + 1\right)}{2\pi le} \times \frac{Q}{Ht} \quad (1)$$

C: ثابت وابسته به گرانیوی آب در دمای ۱۰ درجه سانتیگراد و معادل $10^{-10} \times 1/4$: Le: طول مقطع آزمایش (m): r: شعاع گمانه (m): Q: آب جذب شده توسط توده سنگی در مدت آزمایش (Lit): t: مدت زمان انجام آزمایش (s): H: فشار کل ستون آب (m) می باشند. (در این پژوهش شعاع گمانه های حفاری شده ۰.۳۸ متر و طول مقاطع مورد آزمایش ۵ متر می باشد).

نفوذپذیری یکی از شاخص های مهم توده های سنگی است که بر فشار آب بین شکافی، سطح آب زیر زمینی، مقدار جریان و سرعت لغزش سطوح شیب دار توده های سنگی، نقش مهمی دارد (وتوکوی و کاتسویاما، ۱۹۹۴). آزمون های فشار آب (WPT) پرکاربردترین روش های تعیین نفوذپذیری توده سنگ در امتداد سطوح ضعف می باشند (Ewert, 1997). نتایج آزمایش نفوذپذیری به شدت به ویژگی های هندسی و درجه هوازدگی مسیر های جریان آب بستگی دارد. آزمون های فشار آب می تواند باعث تغییرات زیادی در ویژگی های درزه در توده های سنگی گردد (Foyo and Sanchez, 1996, Shibata et al., 1981, 2002, Kutzner, 1996). سنگ های درزه دار با ویژگی های ناپیوستگی ها از جمله، درجه درزه داری، میزان بازشدگی، پیوستگی درزه، و مواد پرکننده و نوع آنها در ارتباط می باشد. بررسی جعبه های مغزه (Core Box) به دست آمده از حفاری گمانه ها این امکان را می دهد، که نرخ درزه داری و باز شدگی تخمین زده شود، هرچند تداوم و پرکننده را نمی توان تشخیص داد. از این رو کیفیت توده سنگ از روی شاخص SPI تشخیص داده می شود.

جدول ۴. طبقه بندی توده های سنگی بر اساس مقدار SPI (Foyo et al., 2005).

گروه	SPI(Lit/s×m ²)	نفوذپذیری معادل لوژان	نفوذ ناپذیری	بهسازی
A	$<2/16 \times 10^{14}$	کمتر از یک لوژان	عالی	نیاز ندارد
B	$2/16 \times 10^{14} < SPI < 1/72 \times 10^{13}$	بین ۱ تا ۸ لوژان	نسبتاً خوب	به شکل محلی
C	$1/72 \times 10^{13} < SPI < 1/72 \times 10^{12}$	بیشتر از ۸ لوژان	ضعیف	بهسازی جدی
D	$>1/72 \times 10^{12}$	بیشتر از ۸۰ لوژان	خیلی ضعیف	بهسازی گسترده

نمودار تیپ B: این تیپ نمودار رفتار مشابه با حالت آبهستگی در آزمون لوژان دارد و شاخص SPI در فشار های نزولی بیش از فشار های صعودی می باشد. در این حالت بیشترین مقدار SPI بر روی نمودار SPI-Pt برای طبقه بندی سنگ از لحاظ خوردند دوغاب استفاده می شود.

با مشخص کردن مقدار SPI و با ترسیم نمودار SPI-Pt می توان ۴ نوع منحنی را استخراج نمود. نمودار تیپ A: در این تیپ مقادیر SPI بالا رونده (گام های افزایشی فشار آزمون) و مقادیر نزولی (گام های کاهش فشار آزمایش) مشابه هم بوده، بنابراین فشار مورد نظر به منظور تزریق پذیری سنگ، معادل فشار بیشینه در نظر گرفته می شود.

میلی متر) مقاطع آزمایش (۵ متر)، مدت زمان آزمایش (۱۵) مرحله با گام های ۵ دقیقه ای از ۵ دقیقه تا ۷۵ دقیقه، و فشار تزریق پلکانی (۱۵ مرحله افزایشی و کاهش) مقادیر مختلف شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) برای مقاطع مختلف ۳ گمانه ۱۰،۱۱ و ۱۲ که کاملاً در توده سنگی گنگلومرایی به عمق های ۶۵، ۱۴۶ و ۳۰ متر حفر شده اند، به دست آمده و برای این مقاطع، منحنی SPI-Pt ترسیم شده است (شکل های ۴،۵ و ۶).

این نمودارها بین ۳ پارامتر عمق محل آزمون، مقدار آبخوری مقطع بر حسب لوژان و شاخص نفوذ پذیری ثانویه (SPI) ارتباط برقرار می کنند. همانگونه که مشاهده می گردد از لحاظ شاخص SPI توده سنگی مورد نظر در افق های مختلف در ۳ کلاس A، B، و C قرار می گیرد. در این نمودارها با کاهش مقدار آبخوری توده سنگ مقدار SPI نیز کاهش و توده سنگ در کلاس توده های سنگی که نیاز به بهسازی ندارند، قرار می گیرد. این موضوع به بسته بودن درزه ها توسط مواد هوازده مربوط می شود. جنس غالب پرکننده درزه ها در گمانه های حفر شده رس و سیلت می باشد، اما با افزایش فشار تزریق و افزایش مقدار آبخوری به علت شسته شدن پرکننده درزه ها، یا شکست هیدرولیکی (شکل ۷) شاخص SPI افزایش و توده سنگ را نیازمند به بهسازی توسط تزریق سیمان می نماید. با توجه به نمودارهای مورد نظر (شکل ۴ و ۵)، مشاهده می گردد که هیچ گونه ارتباطی بین عمق و رفتار توده سنگ از لحاظ تزریق پذیری وجود ندارد. در واقع می توان گفت فاکتور تعیین کننده و اصلی در مقدار آبخوری و تزریق پذیری توده سنگی مورد بحث، تعداد و عرض بازشدگی و جنس پرکننده درزه بوده و ارتباطی با عمق توده سنگ در این محل ندارد. تغییر تعداد بازشدگی ها در طول گمانه (n_w) و تغییر زاویه بین سطح بازشدگی و محور گمانه ها در محل مورد مطالعه، به شدت بر روی مقدار SPI توده سنگ تاثیر دارد. با توجه به جدول ۵ و مطالعه مغزه های اخذ شده در عملیات حفاری در محل مورد مطالعه، تعداد ۴ تا ۷ درزه در واحد طول با زاویه ۶۰ درجه نسبت به محور گمانه،

نمودار تیپ C: این نمودار رفتار شکست هیدرولیکی را در طول آزمون نشان می دهد. فشار قبل از شکست هیدرولیکی برای تزریق در توده سنگ در نظر گرفته می شود.

نمودار تیپ D: رفتار نمودار SPI-Pt مانند منحنی های تیپ پرشدگی در آزمون لوژان می باشد. در طول مرحله رفت مقادیر SPI کاهش نشان می دهد که حداقل این مقدار در طبقه بندی رفتار سنگ در عملیات تزریق مورد استفاده قرار می گیرد.

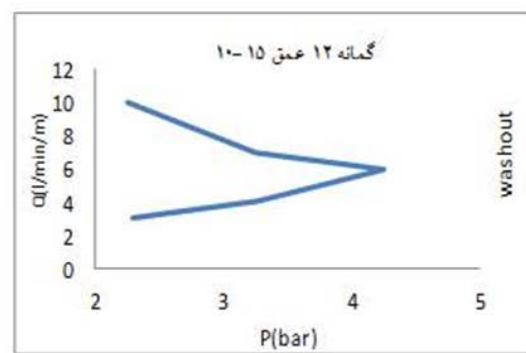
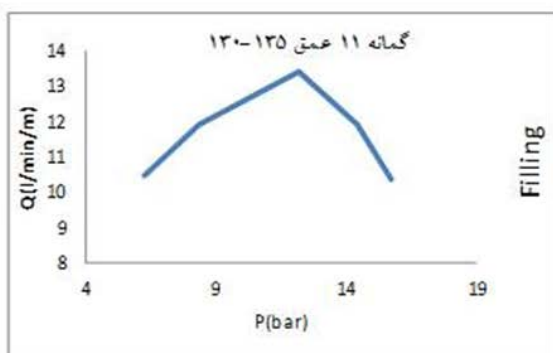
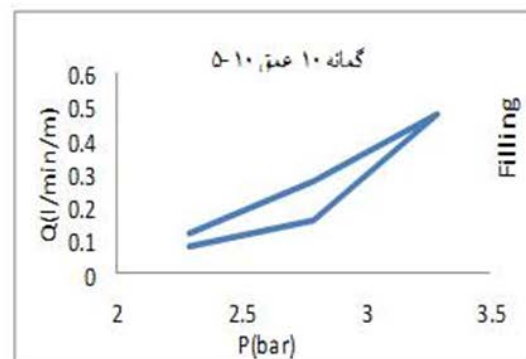
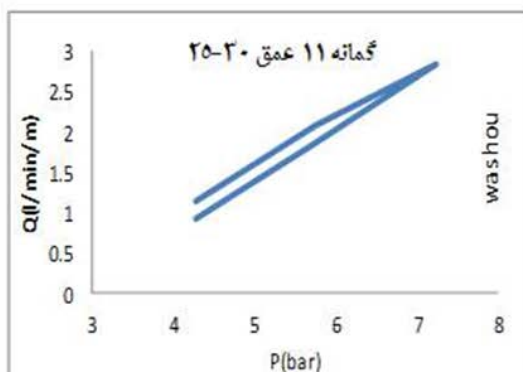
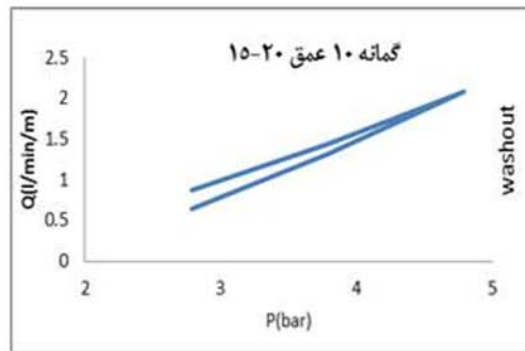
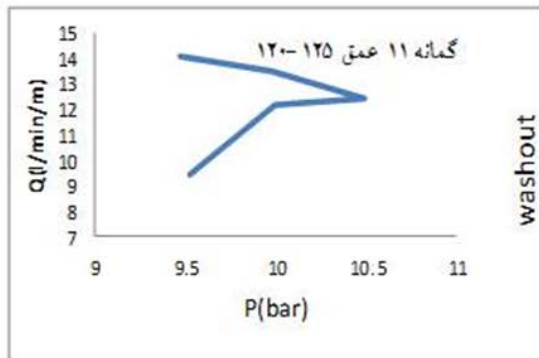
به منظور تعیین رفتار توده سنگ گنگلومرایی پلیوسن در محل مورد مطالعه در طول ۳ گمانه شماره ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مبادرت به انجام آزمون لوژان شده است (جدول ۵). با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می گردد مقادیر آب خوری این توده سنگی در بخش های مختلف گمانه ها با هم کاملاً متفاوت می باشد که این تغییرات به ویژه در محل زون های برشی شدیدتر نیز می گردد. با استفاده از نتایج آبخوری در مقاطع ۵ متری (بر حسب لیتر بر دقیقه در متر) و مقادیر فشار موثر (بر حسب بار) منحنی های کلاس آبخوری توده سنگ بر حسب لوژان ترسیم شده است (شکل ۳). همانگونه که ملاحظه می گردد تیپ غالب منحنی های لوژان در مقاطع آزمایشی در گمانه های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ از نوع آبشستگی (Washout) می باشد. باز شدگی زیاد درزه ها و پرکننده غالباً سیلتی رسی می تواند در اثر فشار تزریق به راحتی از محل خود حمل و باعث افزایش مقادیر آبخوری در مراحل برگشت آزمون گردد. همچنین در برخی مقاطع به علت کاهش تعداد درزه در واحد طول یا تغییر در مقدار بازشدگی منحنی نوع پر شده (Filling) نشان از انسداد درزه ها در فشار بالا در اثر انتقال و رسوب گذاری مجدد در نقاط دور تر از محور گمانه می باشد. نتایج مطالعه مغزه های اخذ شده از گمانه های مورد مطالعه در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

۶. بحث

با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمون WPT و در اختیار داشتن سایر پارامترها از جمله قطر گمانه (در این محل ۷۶

خواهد شد. این موضوع می تواند، به دلیل ناپایداری دیوار گمانه در اثر تراکم در سطح درزه ها، یا وجود جریان های نفوذی محلی باشد.

افزایش مقدار SPI را به دنبال خواهد داشت. این موضوع به دلیل پایداری دیواره گمانه و سالم بودن سنگ و جریان خوب دوغاب در درزه ها می باشد. افزایش بیشتر تعداد درزه در واحد طول و کاهش مقدار RQD، باعث کاهش مقدار SPI



شکل ۳. منحنی های لوژان بدست آمده در آزمون WPT در ۳ گمانه ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در مسیر تونل

جدول ۵. نتایج انجام آزمایش لوژان در شعاع ۲۰ متری از تونل در گمانه های ۱۰، ۱۱، ۱۲ (مهندسین مشاور هراز راه، ۱۳۹۴).

گمانه شماره ۱۰				گمانه شماره ۱۱				گمانه شماره ۱۲	
عمق(متر)	لوژان	عمق(متر)	لوژان	عمق(متر)	لوژان	عمق (متر)	لوژان	عمق (متر)	لوژان
۱۵-۲۰	۲	۲۵-۳۰	۲	۱۲۰-۱۲۵	۱۰	۱۳۰-۱۳۵	۶	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۳	۲۵-۳۰	۲	۱۲۰-۱۲۵	۱۰	۱۳۰-۱۳۵	۷	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۳	۲۵-۳۰	۳	۱۲۰-۱۲۵	۱۲	۱۳۰-۱۳۵	۷	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۴	۲۵-۳۰	۳	۱۲۰-۱۲۵	۱۲	۱۳۰-۱۳۵	۹	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۴	۲۵-۳۰	۴	۱۲۰-۱۲۵	۱۲	۱۳۰-۱۳۵	۱۲	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۴	۲۵-۳۰	۴	۱۲۰-۱۲۵	۱۴	۱۳۰-۱۳۵	۱۲	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۴	۲۵-۳۰	۴	۱۲۰-۱۲۵	۱۴	۱۳۰-۱۳۵	۱۲	۵-۱۰	۱
۱۵-۲۰	۳	۲۵-۳۰	۴	۱۲۰-۱۲۵	۱۴	۱۳۰-۱۳۵	۱۵	۵-۱۰	۰
۱۵-۲۰	۳	۲۵-۳۰	۳	۱۲۰-۱۲۵	۱۵	۱۳۰-۱۳۵	۱۵	۵-۱۰	۰
۲۰-۲۵	۱			۱۲۰-۱۲۵	۳	۱۴۰-۱۴۵	۳	۱۰-۱۵	۳
۲۰-۲۵	۱			۱۲۰-۱۲۵	۳	۱۴۰-۱۴۵	۳	۱۰-۱۵	۳
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۳	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۴
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۴
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۴
۲۰-۲۵	۳			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۶	۱۰-۱۵	۶
۲۰-۲۵	۳			۱۲۵-۱۳۰	۵	۱۴۰-۱۴۵	۶	۱۰-۱۵	۶
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۵	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۷
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۷
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۷
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۱۰
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۴	۱۰-۱۵	۱۰
۲۰-۲۵	۲			۱۲۵-۱۳۰	۴	۱۴۰-۱۴۵	۲	۱۰-۱۵	۱۰

جدول ۶. مشخصات سیستم های درزه در طول گمانه شماره ۱۱ (مهندسین مشاور هراز راه، ۱۳۹۴).

RQD%	شیب متوسط درزه نسبت به محور گمانه	تعداد متوسط در واحد طول	تعداد درزه در ۵ متر	مترای گمانه
۹۰	۹۰	۲	۱۲	۰-۵
۷۵	۱۰	۵	۲۳	۵-۱۰
۶۳	۹۰	۱۰	۴۸	۱۰-۱۵
۷۹	۱۵	۳	۱۷	۱۵-۲۰
۷۳	۶۰	۶	۲۹	۲۰-۲۵
۶۴	۲۰	۶	۳۱	۳۰-۳۵
۸۴	۲۰	۴	۲۰	۳۵-۴۰
۶۴	۱۰	۴	۱۹	۴۳-۴۵
۷۰	۶۰	۶	۳۰	۴۵-۵۰
۹۰	۲۰	۴	۲۰	۵۰-۵۵
۹۰	۱۵	۲	۱۰	۵۵-۶۰
۵۳	۶۰	۷	۳۴	۶۰-۶۵
۶۴	۱۵	۶	۳۰	۶۵-۷۰
۷۵	۶۰	۶	۳۰	۷۰-۷۵
۵۸	۶۰	۷	۳۷	۷۵-۸۰
۹۲	۴۰	۵	۲۷	۸۰-۸۵
۸۲	۸۰	۶	۳۰	۸۵-۹۰
۸۵	۶۰	۴	۱۹	۹۰-۹۵
۸۵	۲۰	۵	۲۴	۹۵-۱۰۰
۴۰	۲۰	۶	۳۲	۱۰۰-۱۰۵
۴۰				۱۰۵-۱۰۸
۶۶	۶۰	۳	۱۶	۱۰۸-۱۱۰
۵۸	۶۰	۷	۳۷	۱۱۰-۱۱۵
۸۵	۳۰	۳	۱۷	۱۱۵-۱۱۹
۶۳				۱۱۹-۱۲۰
۸۲	۶۰	۴	۲۲	۱۲۰-۱۲۵
۸۷	۶۰	۴	۲۱	۱۲۵-۱۳۰
۴۹	۹۰	۷	۳۳	۱۳۰-۱۳۵
۷۶	۳۰	۵	۲۴	۱۳۵-۱۴۰
۸۵	۶۰	۶	۳۰	۱۴۰-۱۴۵



شکل ۷. تصویر جعبه مغزه مقطع ۲۵-۲۰ متری گمانه شماره ۴، درزه های ناشی از شکست هیدرولیکی با خط تیره مشخص شده.

رقیق که با استفاده از سیمان با High Blain (۵۰۰۰) تهیه می شود، و در صورت درزه داری شدید از دوغاب با گرانیروی بالا به منظور تثبیت آن در درزه استفاده کرد. بخش هایی از توده سنگی که در مجاورت تونل قرار می گیرد، از نظر تزریق پذیری دوغاب در رده C قرار می گیرند. مطالعه تغییرات مقدار آبخوری در این نقاط نیز نشان دهنده رفتار آبشستگی در سیستم های ناپیوستگی در آزمون لوژان می باشد. با توجه به اینکه در محل مورد نظر تراز آب زیرزمینی به طور متوسط در عمق ۱۱ متری از سطح زمین می باشد و با توجه به محل قرار گیری تونل نیاز به بهسازی توده سنگ در بر گیرنده تونل ضروری می باشد.

به منظور ارزیابی دقیق بین شاخص تزریق پذیری سنگ در محل با شاخص کیفی توده سنگ، نمودار خطی بین ۳ مقدار RQD، SPI و مقادیر لوژان با عمق، در شعاع ۲۰ متری در گمانه های ۱۱ و ۱۲، از دیواره تونل، ترسیم شده است (شکل های ۸ و ۹). با توجه به این نمودار ها مشاهده می گردد مقادیر SPI و شاخص RQD در اکثر حالات با هم نسبت عکس دارند یعنی با افزایش هر کدام دیگری کاهش می یابد. این موضوع به دلیل تراکم درزه داری می باشد. افزایش تعداد درزه و کاهش فاصله داری در دیواره گمانه باعث نشت آب در این نقاط و ناپایداری آن و بروز مشکل در تزریق پذیری

با مطالعه تغییرات مقادیر SPI و RQD که نشان دهنده کیفیت درزه داری توده سنگ می باشد، می توان بر اساس قابلیت تزریق پذیری، توده های سنگی را در ۴ گروه مختلف قرار داد (Ajalloeian and Azimian, 2013).

۱- کلاس A: این گروه از سنگ ها، به لحاظ وجود تعداد درزه کم در واحد طول گمانه، فاصله داری زیاد، و سایر عوامل کاهش دهنده میزان آبخوری، نیاز به بهسازی ندارند. در گمانه شماره ۱۰ توده گنگلومرای در عمق ۵ تا ۱۰ متری در این رده قرار می گیرد.

۲- کلاس B: سنگ های این رده بسته به میزان درزه داری، (بین ۱ تا ۲ درزه)، تزریق پذیری به آسانی صورت می گیرد، لیکن اگر درزه داری زیاد باشد با توجه به فاصله داری کم و ناپایداری دیواره گمانه، یا نشت آب به شکل موضعی، انجام عملیات تزریق با مشکل مواجه می شود. در مطالعات انجام گرفته بر روی مغزه های به دست آمده از گمانه های حفر شده مشاهده می گردد که با تعداد ۴ تا ۷ درزه در واحد طول مقدار تزریق پذیری افزایش می یابد که این موضوع به علت باز شدگی زیاد درزه ها یا ناپایداری مواد پر کننده (سیلتی، رسی) می باشد.

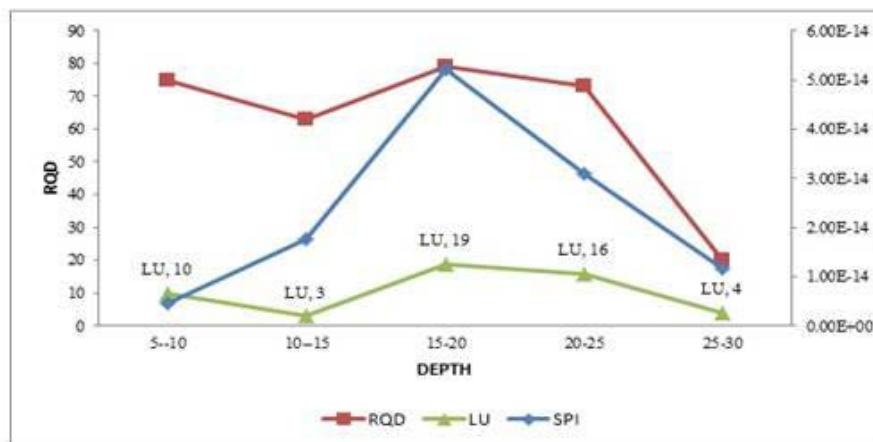
۳- کلاس های C, D: نشان دهنده آسیب پذیری بالای توده سنگ می باشد، در شرایط درزه داری کم بایستی از دوغاب

است (شکل های ۱۱ و ۱۲). با توجه به این اشکال مشاهده می گردد که تغییرات شاخص کیفی توده سنگ در اعماق مختلف تابع شرایط محیطی بوده و بسته به میزان خرد شدگی و حضور زون های خرد شدگی مقادیر آن تغییر می کند ولی می توان گفت در ۶۳ درصد حالات (گمانه ۱۱) و ۸۵ درصد (گمانه ۱۰) مقدار RQD از ۷۵ درصد کمتر بوده که نشان می دهد کیفیت متوسط توده سنگ می باشد.

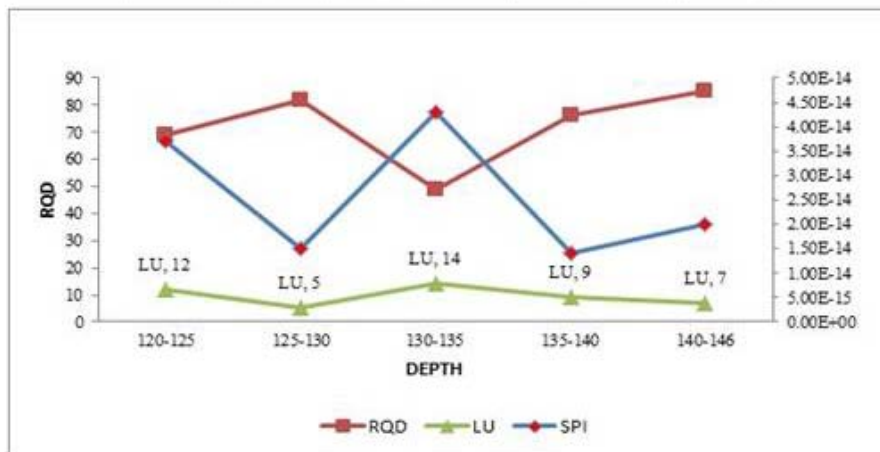
لذا می توان گفت توده سنگی مورد نظر یعنی گنگلومرای پلیوسن که نسبت به عمق دانه ریزتر می گردد، به واسطه تنش های تکتونیکی وارد شده به آن می بایستی در حین و پس از اجرای تونل بهسازی و آب بندی گردد. این توصیه به ویژه در ۴ زون گسلی شناسایی شده در طول گمانه های شماره ۱۱ و ۱۲ و مناطق حدفاصل آنها اجتناب ناپذیر است.

می شود. البته همانگونه که در شکل ۸ مشخص است، در افق ۲۵-۳۰ متر از گمانه شماره ۱۲ این ارتباط صادق نیست. بررسی های انجام گرفته بر روی نمونه مغزه های به دست آمده نشان می دهد در این مقطع از گمانه یک زون خرد شده به چشم می خورد (شکل ۱۰). خرد شدگی شدید باعث می گردد تا به علت کثرت سیستم های درزه با بازشدگی کم، مقدار SPI و تزریق پذیری توده سنگ کاهش یابد. دلیل اصلی کاهش تزریق پذیری در این مقاطع ریزش دیواره گمانه در اثر فشار تزریق است. این حالت در چندین مقطع از گمانه شماره ۱۱ نیز ایجاد می گردد. از سویی با توجه به نمودارهای ۸ و ۹ مشاهده می گردد که بین شاخص کیفی توده سنگ و مقدار لوژان یک رابطه عکس وجود دارد. به عبارت دیگر با کاهش مقدار RQD مقدار لوژان افزایش می یابد. این موضوع نیز به دلیل ارتباط مستقیم مقدار آبخوری با درزه داری می باشد، که با افزایش درزه داری (کاهش RQD) مقدار آبخوری نیز افزایش می یابد.

به منظور شناخت بهتر رفتار توده گنگلومرای در فرایند تزریق پذیری شاخص کیفی توده سنگ در افق های مختلف با توجه به جعبه های مغزه به دست آمده از گمانه های ۱۰ و ۱۱ مطالعه و نمودار تغییرات RQD در طول گمانه ترسیم شده



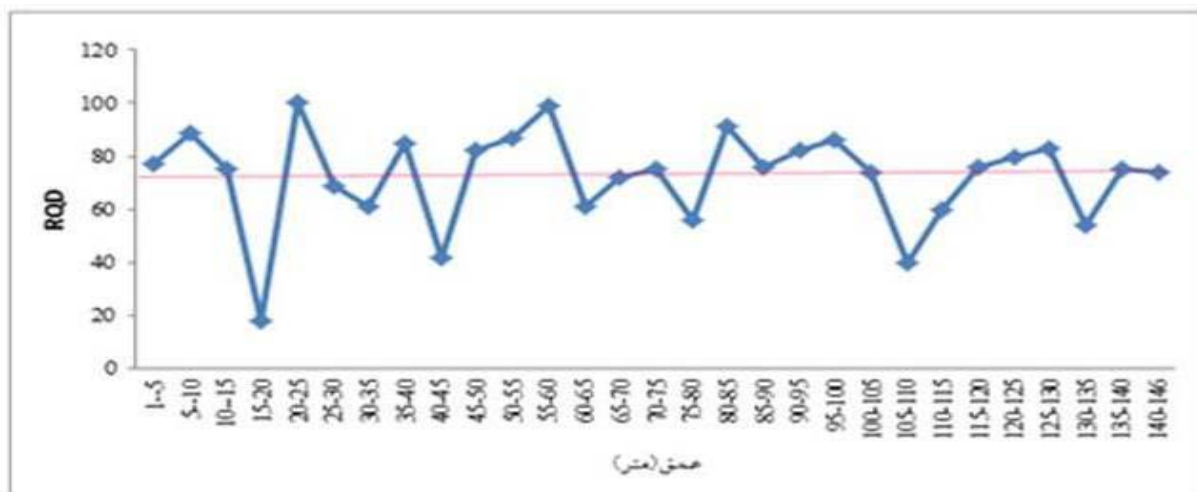
شکل ۸. تغییر مقادیر SPI، RQD، Lugeon با عمق حفاری در گمانه شماره ۱۰



شکل ۹. تغییر مقادیر SPI، RQD، Lugeon با عمق حفاری در گمانه شماره ۱۱



شکل ۱۰. وجود زون خردشدگی در عمق ۲۰-۲۵ گمانه شماره ۱۲



شکل ۱۱. نمودار خطی تغییرات شاخص کیفی توده سنگ با عمق در گمانه شماره ۱۱ به عمق ۱۴۶ متر



شکل ۱۲. نمودار خطی تغییرات شاخص کیفی توده سنگ با عمق در گمانه شماره ۱۰ به عمق ۶۵ متر

۷. نتیجه گیری

تزیق پذیری در افق مختلف ترسیم شده است. با توجه به نتایج کسب شده از این پژوهش در ۸۶ درصد از مقاطع مطالعه شده توده سنگی دارای قابلیت تزیق پذیری رده های C و D می باشد. این شرایط نیاز به بهسازی توده سنگی گنگلومرای در اطراف تونل را ضروری می کند. لذا با توجه به این که ویژگی های توده سنگی مورد بحث در منطقه غالباً مشابه مقاطع مطالعه شده می باشد، ضرورت عملیات آب بندی تونل فوق و سایر تونل هایی که در این توده در کل مسیر حفر می گردند، احساس می گردد. عملیات آبدی پیشنهادی ترجیحاً دوغاب سیمان با نسبت های مختلف آب به سیمان (با توجه به ویژگیهای فیزیکی درزه) می باشد. این فرآیند بایستی در شعاع مناسب و اقتصادی در اطراف جداره تونل در جهت کاهش تبعات حضور آب در محیط تونل در حین اجرای پروژه، یا پس از بهره برداری، و در جهت کاهش تاثیرات منفی آب بر تاسیسات تونل، از جمله پوشش داخلی تونل اجرا گردد.

با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل و تفسیر داده ها و اطلاعات کسب شده از نمودار های تهیه شده، و مقادیر SPI و ارتباط آن با پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده گنگلومرای پلیوسن در محل مورد مطالعه، می توان گفت، به علت قرار گیری توده گنگلومرای به شکل برجا بر روی واحدهای نابرجای منطقه، حرکات و جابجایی های سنگ بستر بر روی این واحد سنگی نیز تاثیر داشته است. این حرکات به نوبه خود باعث درزه داری، و در افق هایی خرد شدن شدید گنگلومرای پلیوسن شده اند. به منظور ارزیابی قابلیت نفوذپذیری و تزیق پذیری این توده سنگی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده های به دست آمده از مطالعات میدانی، و آنالیز مغزه های اخذ شده از گمانه ها، پارامتر RQD به عنوان مهمترین شاخصی که وضعیت درزه داری در افق های مختلف را نشان می دهد تعیین گردیده است. با توجه به مقادیر محاسبه شده SPI در مقاطع آزمایشی، و در اختیار بودن مقادیر شاخص کیفی توده سنگ منحنی های قابلیت

منابع

- جلالی، س. ا.؛ رمضان زاده، ا.؛ شریف زاده، م. و شمسی، غ. ۱۳۹۲. بررسی فرآیند تزیق آب بند در تونل های سنگ سخت، مطالعه موردی تونل انتقال آب کرج - تهران (قطعه ۱)، ارائه شده در دهمین کنفرانس تونل ایران.
- خانلری، غ. ۱۳۸۹. اصول مکانیک سنگ (برای مهندسين زمین شناسی، عمران و معدن). انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان (۱۳۸۹)

عطایی، م.؛ گلدی کتله، ع. و سرشکی، ف. ۱۳۹۲. انتخاب و طراحی سیستم تحکیم و آب بندی گالری دسترسی به زیر هسته رسی، مطالعه موردی سد خاکی رودیاری لرستان. ارائه شده در دهمین کنفرانس تونل ایران.

میرشکرایی، ش. و کمالی، غ. ۱۳۸۹. بررسی تحلیل عملیات تزریق شیمیایی جهت تقویت آب بندی پرده آب بند سیمانی در پی سنگ گنگلومرای، مطالعه موردی تونل ۹۵۰ سد مخزنی کرخه، ارائه شده در اولین سمینار تخصصی آب بندی تونل.

منوچهری، ۱۳۷۰ نقشه زمین شناسی شماره ۵۷۵۷ با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی بروجرد. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

نیکزاد، م. و تائبی، و. ۱۳۹۳. کنترل نشست سطحی ناشی از تونل سازی در مناطق شهری با استفاده از بهبود مشخصات زمین، ارائه شده در اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه ایران.

وتوکوری، وی، اس و کاتسویاما، ک. ۱۹۹۴. در آمدی بر مکانیک سنگ (ترجمه محمد فاروق حسینی)، انتشارات مرکز فرهنگی سالکان، ۱۳۷۸.

مهندسین مشاور هراز راه. گزارش زمین شناسی پروژه طرح و ساخت راه آهن دورود- خرم آباد ۱۳۹۴.

- Ajalloeian, R. and Azimian, A., 2013. Geotechnical Engineering Assessment of the Nargesi Dam Site, Southwest Iran: Geotechnig Geology Engineering, 31(3) pp: 1369-1392.
- Ajalloeian, R. and Azimian, A., 2014. Permeability and grout ability appraisal of the Nargesi Dam Site in Iran based on the Secondary Permeability Index, Joint Hydraulic aperture and Lugeon tests: Engineering Geology Environment, 74 PP: 845-859.
- Bieniawski, Z., 1989. Engineering rock mass classification. , New York: Wiley Press, 123p.
- Ewert, F. k. ,1997. Permeability grout ability and grouting of rocks related to dam sites. Part 2, Dam Engineering 8 (2) (1997) pp: 123-176
- Foyo A, Sánchez MA, Tomillo C (2005) A proposal for a Secondary Permeability Index obtained from water pressure tests in dam foundations. Eng Geol 77:69-82
- Foyo, A. and Sánchez, MA. 2002. Permeability tests for rock mass a proposal for a new expression for the equivalent Lugeon unit (ELU) Dam Engineering. 8 (3) pp: 199-218
- Hoek, E.; Kaiser, P. and Bawden, W., 1995. Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: Balkema Press, 134p.
- Houlsby, A., 1992. Construction and design of cement grouting: guide to grouting in rock foundation. , New Jersey: Wiley Press.
- Kutzner, C., 1996. Grouting of rock and soil. Netherlands: Balkema Press.
- Lugeon, M., Barrage ET. , 1933. Geologie. Paris: Dunod Press.
- Romanov D.; Gabrovsek, F. and Dreybrodt, W., 2003. Dam sites in soluble rock a model of increasing leakage by, dissolution widening of fractures beneath a dam :Engineering Geology, 70 (1-2) pp: 17-35.
- Shibata, L.; Lida, R. and Matsumoto, N., 1981. Procedures for the investigations of permeability and seepage control in oft rock foundations for dams. In: International symposium on weak rock: 1 pp: 503-508.
- Shohrabi, A., Rastegari, A., Zolfaghari, A. 2016. Estimation of the grout take using empirical relationships (case study: Bakhtiari dam site). Bulletin of Engineering geology and the environment. Volum 75. Issue 2: 425-438.s
- Warner, J., 2004. Practical Handbook of Grouting. New Jersey: Wiley Press.
- Weaver, K., 1991. Dam foundation grouting. New York: American Society of Civil Engineers.