

راهکار اجرایی تزریق در سد با استفاده از لوژان و شاخص نفوذپذیری ثانویه

سید سجاد کراری

کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

رسول اجل لوئیان

استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۶

karrarysajjad@yahoo.com

چکیده

تزریق در توده‌های سنگی جهت کاهش نفوذپذیری و تحکیم ساختگاه سد از امور مهم در صنعت سدسازی می‌باشد. جهت انجام عملیات تزریق به برنامه‌های جامع و مبتنی بر مشخصات زمین شناسی مهندسی توده سنگ مورد نیاز است که در این راستا برنامه‌های براساس اطلاعات موجود در مورد طراحی تزریق ارائه می‌گردد. برنامه ارائه شده به صورت فلوچارت برای وضعیت‌های مختلف ساختگاه طراحی شده است. در این فلوچارت‌ها پس از تعیین وضعیت تزریق‌پذیری توده‌های سنگی، راهکار بهسازی آن‌ها به طور کلی ارائه شده است. نهایتاً پارامترهای اساسی تزریق هم چون غلظت دوغاب تزریق (طرح اختلاط)، روش محاسبه حجم و فشار ماکزیمم تزریق با استفاده از نتایج لوژان، SPI و RQD پیشنهاد گردیده است. در خصوص برنامه ریزی عملیات تزریق دیدگاه نسبتاً معقولی در زمینه حجم تزریق، فشار تزریق و راهکاری در رابطه با غلظت ماده تزریقی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: تزریق، لوژان، شاخص نفوذپذیری ثانویه، حجم دوغاب، فشار تزریق

مقدمه

تزریق در سنگ یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای کاهش نفوذپذیری و مواردی افزایش خصوصیات مقاومتی توده سنگ است. تزریق شامل عملیاتی جهت پرکردن ناپیوستگی‌ها و حفرات سنگ با دوغاب به منظور تشکیل توده-سنگی پایدار و یکپارچه و یا ایجاد یک پرده با نفوذپذیری اندک جهت کنترل نشت در پی و یا تکیه‌گاه‌های سد می‌باشد. به طور کلی پارامترهای بازشدگی، فراوانی، پرشدگی، زبری، جهت و زاویه درزه‌ها نسبت به هم و بویژه نسبت به محور سد از عوامل موثر در عملیات تزریق محسوب می‌شوند. از بین این پارامترها بازشدگی و فراوانی درزه‌ها تاثیر بیشتری در تزریق‌پذیری توده‌های سنگی دارند (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲). ایجاد پرده آب بند برای ساختگاه سد بدون داشتن طرح جامع عملیات تزریق می‌تواند باعث عدم موفقیت در آب بندی و تحکیم، افزایش هزینه‌ها و طولانی شدن زمان اتمام پروژه شود. برای جلوگیری از این نقیصه‌ها اجرای عملیات تزریق با یک طرح جامع عملیات تزریق مشخص می‌تواند باعث اجرای بهینه تزریق گردد.

روش کار

در این مقاله اطلاعات کلی مربوط به جزئیات عملیات تزریق جمع آوری گردیده است. این جزئیات شامل: میزان غلظت دوغاب (نسبت آب به سیمان)، فشار تزریق، حجم دوغاب تزریقی، لوژان، شاخص نفوذپذیری ثانویه، جذب ویژه، چسبندگی دوغاب و بلین (Blain) سیمان تزریقی می‌باشد. جهت انجام این عملیات از تمامی اطلاعاتی که می‌تواند به طراحی یک برنامه تزریقی جامع کمک کند استفاده شده است. بدین منظور جهت تعیین میزان نفوذپذیری توده‌های سنگی از آزمایش فشار آب (WPT) استفاده می‌شود. از این آزمایش می‌توان به منظور تعیین تزریق‌پذیری توده‌های سنگی و تشخیص ویژگی‌های

هیدرولیکی سنگ‌ها استفاده کرد. این ویژگی‌ها شامل میزان خوردن آب، بازشدگی درزه‌ها و فاصله‌داری آنها، فرسایش‌پذیری مواد پرکننده درون درزه‌ها، مقاومت و زبری سطح درزه‌ها، نوع جریان و الگوی خوردن آب در سنگ و میزان گسترش مناطق نفوذپذیر می‌باشد (اجل لوئیان و همکاران، ۱۳۹۲).

محققین مختلفی در خصوص استفاده از نتایج لوژان جهت چگونگی نفوذپذیری و تزریق‌پذیری زمین اظهار نظرهای گوناگون و متفاوتی نموده‌اند. از جمله این محققین (Kutzner, 1985) می‌باشد که معتقد است توده سنگ‌های با لوژان کمتر از ۵ نفوذناپذیرند و در مقابل توده سنگ‌های با لوژان بیش از ۲۵ نفوذپذیر و قابل تزریق می‌باشند. از طرفی از نقطه نظر اجرایی آزمایش فشار آب تحت برخی شرایط مثل وجود درزه‌های انحلال یافته شبه کارستیک در سنگ‌های آهک و گچ، فاقد نتایج واقع بینانه جهت تحلیل الگوی جذب آب در یک مقطع می‌باشد. به طور کلی از آنجایی که در عمل مقادیر WPT با میزان خوردن دوغاب سیمان تطابق زیادی ندارند، بدین لحاظ تصمیم‌گیری برای تزریق از نظر غلظت دوغاب و فشار تزریق براساس تفسیر نتایج لوژان نمی‌تواند منطقی باشد. بدین لحاظ لازم است تزریق‌پذیری ویژه سنگ‌ها که برای هر نوع سنگ، متفاوت می‌باشد، در نظر گرفته شود. این پارامتر به تعداد درزه‌ها و میزان بازشدگی آنها، نوع و ارتباط آنها و همچنین مقاومت توده سنگ که رفتار شکست هیدرولیکی و فشار ماکزیمم تزریق را کنترل می‌کنند، بستگی دارد. به این ترتیب تمام سنگ‌ها دارای قابلیت تزریق یکسانی نیستند، بلکه هر یک تزریق‌پذیری ویژه خود را داشته که تنها اجازه یک کاهش خاصی از نفوذپذیری را می‌دهد (طاهری، ۱۳۸۱).

در مقاله حاضر به مقوله جنس سنگ توجهی نشده و صرفاً یک الگوی کلی برای تزریق ارائه شده است. در ارزیابی تزریق‌پذیری بر پایه مقادیر جذب ویژه،

تحت تاثیر حداکثر اندازه ذرات سیمان است. البته تزریق های آزمایشی که در ادامه به آن پرداخته می شود تاثیرگذاری هر دو عامل را تأیید می کند (Haulsby, 1990). با توجه به متوسط بازشدگی درزه در خصوص نسبت آب به سیمان پیشنهاد می کند که اگر میزان بازشدگی درزه ها کمتر از یک میلی متر باشد، از نسبت ۳:۱، اگر حدود یک میلی متر باشد از نسبت ۲:۱ و اگر بیش از یک میلی متر باشد، از نسبت ۱:۱ آب به سیمان برای دوغاب استفاده شود (Kutzner, 1996). در پروژه هایی که افزون بر آب بندی، تزریق نقش تحکیم کننده نیز به عهده دارد مقدار سیمان در نسبت آب به سیمان افزایش می یابد و دوغاب غلیظ تر می شود. در این شرایط بطور تجربی ثابت شده است که در صورتی که توده سنگ دارای درزه های با بازشدگی محدود باشد، می توان با افزودن مقدار معینی روان کننده نقیصه نفوذ کم دوغاب به دلیل گرانیوی را تا حد معینی بر طرف نمود. به طور کلی در توده سنگ هایی که بازشدگی ناپیوستگی های آنها کمتر از حدود ۰/۲۵ میلی متر است، استفاده از دوغاب های سیمانی مناسب نیست. زیرا در چنین ترک هایی استفاده از دوغاب سیمانی سبب بسته شدن آنها و کاهش اثر تزریق می گردد. معمولاً از سیمان میکروفاين برای تزریق در درزه های بسیار باریک استفاده می شود. توصیه شده است در نواحی با لوژان کمتر از ۵، سیمان میکروفاين و نواحی با لوژان بیشتر از آن سیمان پورتلند معمولی استفاده شود (Weaver, 1993). در نواحی که لوژان بین ۳ تا ۱۰ می باشد توصیه می گردد از سیمان میکروفاين و نواحی که لوژان بیش از ۱۰ می باشد از سیمان پورتلند معمولی استفاده شود. نواحی که میزان لوژان کمتر از ۳ می باشد تزریق ناپذیرند (Chan man piu, 2005). در مورد غلظت، پارامتر مقدار آب اندازی دوغاب دارای اهمیت چشمگیری می باشد به نحوی که در آزمایشگاه کنترل کیفیت، مقدار دقیق این پارامتر باید برای نسبت های مختلف دوغاب معین شود. هرچه دوغاب رقیق تر باشد مقدار آب اندازی دوغاب بیشتر می شود به نحوی که در نسبت های رقیق تر از ۲:۱ پس از انجام عملیات تزریق و فشار گرفتن مقطع، آب اندازی دوغاب سبب انقباض دوغاب و شکل گیری تخلخل می شود. به علت در نظر نگرفتن آب اندازی در پیش بینی های نخستین و علیرغم فشار گرفتن مقاطع در حین تزریق، نمونه مغزه های گمانه های چک هول (Chek hole) در برخی بخش ها در بردارنده فضای خالی می باشد که این وضعیت مغایر با اهداف پروژه جهت آب بندی سد می باشد. به طور کلی اندازه ذرات سیمان در میزان تزریق پذیری دوغاب در بازشدگی ها نقش مهمی را ایفا می کند. مقدار بازشدگی درزه ها جهت انجام تزریق می بایستی ۳ برابر D_{85} ذرات سیمان باشد. در صورتی که میزان بازشدگی کمتر از ۲ برابر D_{85} ذرات سیمان باشد امکان تزریق وجود ندارد (Dalmalm, 2004). هر چه ذرات سیمان ریزانه تر باشد، درجه بلین (سطح ویژه) آن افزایش می یابد. درجه بلین سیمان نباید از ۳۲۰۰ کمتر باشد و نباید حاوی بیش از ۰/۵ درصد ذرات درشت تر از الک ۲۰۰ باشند. سیمان با بلین ۳۲۰۰ تا ۴۵۰۰ سانتی متر مربع برگرم برای نفوذ مناسب دوغاب کاربرد دارد. بهتر است برای تزریق درزه هایی که بازشدگی کمتر از ۰/۲ تا ۰/۳ میلی متر دارند، از سیمان میکروفاين استفاده نمود (Lombardi, 1985).

جهت موفقیت در آب بندی سد می بایستی براساس وضعیت بازشدگی، پرشدگی و زبری درزه ها اقدام به پهنه بندی ناپیوستگی های محل عملیات تزریق نمود و سپس طول مقاطع عملیات تزریق بر اساس تغییرات زون ها محاسبه و معین گردد. لازم به ذکر است که با تغییر زون در طول عملیات حفاری و تزریق می بایستی از سیمان با بلین متناسب با وضعیت درزه های زون جدید استفاده

مقدار جذب آب در مقطع یک متری از گمانه اهمیت چندانی ندارد، بلکه میزان آب جذب شده از طریق یک مسیر منفرد، اهمیت دارد (Ewert, 1985). با توجه به ناهمسان بودن مسیرهای هیدرولیکی و خصوصیات مختلف جریان، همواره نمی توان ارتباط مستقیمی بین مقادیر حاصل از آزمایش فشار آب و خوردن دوغاب ارائه نمود. (Ewert, 1997) علت این تفاوت را وجود درزه هایی می داند که در آن ها آب به سهولت جریان می یابد در صورتیکه برای دوغاب امکان چنین جریانی وجود ندارد و یا اینکه شکست هیدرولیکی ناشی از فشار تزریق باعث شسته شدن ذرات داخل درزه می شود. البته بسته به مشخصات ناپیوستگی های توده سنگ بویژه مقادیر پارامترهای بازشدگی، پرشدگی و زبری، سهولت جریان دوغاب در درزه ها ممکن است نسبت به سهولت جریان آب در درزه ها دارای اختلاف ناچیز تا چشمگیر باشد.

شاخص نفوذپذیری ثانویه

به منظور تخمین تزریق پذیری با استفاده از نتایج آزمایش لوژان، به طور مستقیم نمی توان از واحد لوژان استفاده نمود و مقدار ضریب نفوذپذیری بطور کاملاً تخمینی از روابط تجربی محاسبه می گردد. شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) جهت تعیین کیفیت توده سنگ می باشد و معیاری برای بیان نفوذپذیری توده سنگ است. امروزه از شاخص نفوذپذیری ثانویه برای ارزیابی تزریق پذیری توده سنگ استفاده می شود. این شاخص برحسب پارامترهای کلاسیک مانند فشار و جذب آب بنا نهاده شده و براساس درجه درزه داری میزان غلظت دوغاب را تعیین می کند (Foyo et al., 2004). به طور کلی، به علت تطابق بیشتر بازشدگی درزه ها با میزان خوردن دوغاب، میزان غلظت دوغاب را براساس بازشدگی واقعی درزه ها (به کمک لاک های حفاری) می توان مشخص نمود. به هر حال در طرحی که در مقاله حاضر ارائه خواهد شد از هر دو معیار برای تعیین غلظت دوغاب استفاده شده است. ایرادی که می توان به این شاخص وارد نمود، نداشتن جنبه اجرایی و ابهام در مورد بهسازی زمین می باشد. در بهسازی زمین در این شاخص به حجم بهسازی زمین به صورت کمی اشاره ای نشده است.

غلظت دوغاب

جهت انجام عملیات تزریق از سیمان پورتلند که از سیلیکات های کلسیم تشکیل یافته، استفاده می شود. این نوع سیمان، متداول ترین نوع سیمان در عملیات تزریق یا ملات های ساخته شده از سیمان می باشد. برای تعیین غلظت دوغاب تزریق از نسبت وزنی آب به سیمان استفاده می شود. امکان ایجاد جک هیدرولیکی و شکست هیدرولیکی زمانی که از سوسپانسیون رقیق استفاده می شود بیشتر است در حالی که هنگام استفاده از سوسپانسیون غلیظ احتمال این پدیده کمتر است که علت آن را می توان چسبندگی دوغاب پایدار دانست. به هر حال سوسپانسیون ها در شروع کار تزریق نباید رقیق تر از نسبت ۳W:۱C باشند. پس از شروع عملیات تزریق بسته به خوردن گمانه، غلظت دوغاب به مرور افزایش می یابد. در بیشتر توده سنگ ها، دوغابی با نسبت حجمی ۲W:۱C برای تزریق مناسب است. برای ترک هایی با عرض ۰/۷۵ میلی متر و ریزتر، تزریق با نسبت ۳W:۱C آغاز می شود. برای ترک هایی با عرض بین ۱/۲ تا ۲/۵ میلی متر، تزریق با نسبت ۱W:۱C آغاز می شود (فهیمی فر، ۱۳۸۴). در خصوص غلظت دوغاب تزریق نظرات گوناگونی وجود دارد که در ذیل به مهمترین آن ها اشاره می شود. براساس نظر (Lombardi, 1985) پیشنهاد می کند که حتی شکاف های باریک با سوسپانسیونی با نسبت ۰/۶W:۱C تزریق شوند. او اعتقاد دارد که گردش سوسپانسیون در شکاف ها تحت تاثیر گرانیوی آنها نیست، بلکه

نمود تا درصد موفقیت عملیات افزایش یابد.

فشار تزریق

جهت انجام عملیات تزریق می بایستی فشار تزریق به گونه‌ای باشد که بتوان دوغاب را به داخل درز و شکاف‌های سنگ تزریق نمود و شعاع تاثیر مناسبی را ایجاد کرد. فشار تزریق باید از فشار لازم جهت شکستن سنگ و ایجاد ترک‌های جدید کمتر باشد. گروه مهندسی ارتش ایالات متحده (۱۹۸۴) یک قاعده محافظه کارانه یعنی مقدار 1 Psi را برای هر فوت در بالای گمانه ارائه کردند که می‌تواند به صورت قابل اعتماد در بسیاری از موارد استفاده شود؛ اما باعث محدودیت در نفوذ دوغاب می‌شود. رفتار جک هیدرولیکی به واسطه افزایش جذب آب و به صورت تناسب بالارونده در مقابل افزایش فشار قابل تشخیص است. هنگامی که در مسیرهای موجود فشار آزمایش از فشار روباره بیشتر شود و یا به حدی برسد که مقدار آن برای تراکم سنگ در طول مسیر باز شده کافی باشد، فرایند جک هیدرولیک آغاز می‌شود. درزه‌های افقی در اعماق

کم برای جک هیدرولیکی مستعدترند. بنابراین جک هیدرولیکی یا اتساع پدیده مثبتی است و دوغاب فاصله بیشتری را طی خواهد کرد و شعاع نفوذ دوغاب در اطراف گمانه افزایش می‌یابد (قبادی و همکاران، ۱۳۹۲) (Ewert, 2005).

بحث

با توجه به موارد ذکر شده بالا، مقاله حاضر بیشتر به جنبه‌های اجرایی عملیات تزریق توجه نموده که در ادامه به تشریح گام‌های مختلف این طرح پرداخته می‌شود.

مرحله اول: در اولین مرحله از طرح مقادیر لوژان تعیین می‌شود. طبقه بندی زیر براساس نظر لوژان ارائه شده است (جدول ۱).

مرحله دوم: با استفاده از نتایج آزمایش فشار آب در این مرحله کلاس توده سنگ براساس SPI تعیین می‌شود. پس از آن تعیین می‌شود که مقادیر SPI در دامنه چه کلاسی از لوژان قرار می‌گیرند (جدول ۲).

جدول ۱. توصیف نفوذپذیری سنگ بر حسب واحد لوژان

توصیف کیفی	لوژان (Lugeon) (لیتر/دقیقه. متر)
نفوذناپذیر	۱-۳
نفوذپذیری کم	۳-۱۰
نفوذپذیری متوسط	۱۰-۳۰
نفوذپذیری زیاد	۳۰-۱۰۰

جدول ۲. رده‌بندی توده‌سنگ بر اساس SPI (Foyo et al., 2004)

شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) (لیتر/ثانیه. متر)	$2/14 \times 10^{-14} \leq SPI$	$1/72 \times 10^{-13} < SPI \leq 2/14 \times 10^{-14}$	$< SPI \leq 1/72 \times 10^{-13}$ $1/72 \times 10^{-12}$	$1/72 \times 10^{-12} < SPI$
کلاس سنگ	A	B	C	D
طبقه بندی توده سنگ	عالی	متوسط - خوب	ضعیف	خیلی ضعیف
بهبودی زمین	احتیاج نیست	به طور محلی نیاز است	مورد نیاز است	به طور گسترده نیاز است
لوژان معادل	< ۱	۱-۸	۸-۸۰	> ۸۰

درزه). بر اساس تجربیاتی که (Ewert, 1985) از چندین برنامه تزریق کسب نموده است، برای چنین حالتی و با ضریب ایمنی بالا می‌توان تعداد درزه در واحد طول را معادل ۱ ($n_w=1$) در نظر گرفت.

گروه ۲ (سنگ با صفحات انفصالی و با فاصله‌داری متوسط): در این گروه فاصله بین ناپیوستگی‌ها ۲۰-۱۰ سانتیمتر و تعداد درزه‌ها در هر متر گمانه بین ۱۰-۶ عدد (بسته به جهت ناپیوستگی‌ها و گمانه نسبت بهم) تغییر می‌کند. در این حالت $n_w=3$ (جهت بالابردن ضریب ایمنی معقول) در نظر گرفته می‌شود.

گروه ۳ (سنگ با صفحات انفصالی و بسیار نزدیک به هم):

فاصله بین ناپیوستگی‌ها تقریباً حدود ۵ سانتیمتر است و بطور متوسط در هر متر گمانه به طور میانگین حدود ۲۰ ناپیوستگی وجود دارد. در این حالت به منظور ایمنی بیشتر عدد $n_w=6$ قرار داده می‌شود.

مطابق با (جدول ۲) کلاس‌های A و B شاخص نفوذپذیری ثانویه در محدوده لوژان ۱-۳ قرار می‌گیرند. کلاس‌های B و C در محدوده لوژان ۳-۱۰ قرار می‌گیرند. کلاس C در محدوده لوژان ۱۰-۳۰ قرار می‌گیرد. کلاس‌های C و D در محدوده لوژان ۳۰-۱۰۰ قرار می‌گیرند.

مرحله سوم: تعیین درجه درزه داری که براساس نظر (Ewert, 1985) در سه کلاس طبقه بندی شده است. با در نظر گرفتن میزان درزه‌شدگی (درزه در متر $J/m = J/m$)، امکان ارزیابی دقیق‌تری از تزریق‌پذیری فراهم خواهد شد. با توجه به (J/m) سنگ‌ها را می‌توان براساس تزریق‌پذیری آن‌ها به سه گروه اصلی زیر تقسیم‌بندی نمود:

گروه ۱ (سنگ با صفحات انفصالی و با فاصله‌داری زیاد):

این صفحات معمولاً در فواصل چند دسیمتری ظاهر می‌شوند. بنابراین، مقطع یک متری از گمانه، تنها تعداد محدودی ناپیوستگی را قطع می‌کند (۱-۵

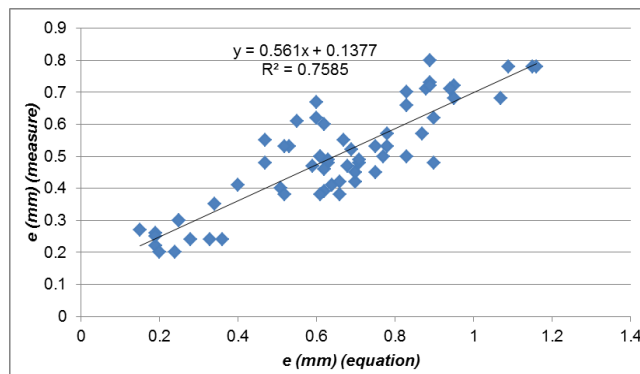
مرحله چهارم: میزان RQD در این مرحله تعیین می‌شود. درجه درزه‌داری بالا بیانگر RQD کمتر از ۵۰، درجه درزه داری متوسط بیانگر RQD بین ۷۵ تا ۹۰ و درجه درزه داری پایین بیانگر RQD بیش از ۹۰ می‌باشد.

پس از تعیین تزریق پذیری توده سنگ اقدام به بهسازی زمین می‌گردد. در این بهسازی میزان بازشدگی درزه‌ها براساس میزان لوژان و فاصله‌داری درزه‌ها تعیین می‌شود. در این راستا از (رابطه ۲) استفاده گردید (Barton, 2007). به دلیل عدم نزدیکی (رابطه ۳) با شرایط واقعی فرمول جدیدی پیشنهاد گردید. این فرمول با سعی و خطا و به طور تجربی در گمانه‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت که نشان دهنده ارتباط نزدیکتر (رابطه ۳) فرمول با شرایط واقعی می‌باشد. در (شکل ۱) دیاگرام مربوط به اثبات ارتباط نزدیک فرمول پیشنهادی با شرایط واقعی آورده شده است:

$$e_{(mm)} = (6.Lu.S.10^{-8})^{0.33} \rightarrow \text{(رابطه ۲)}$$

$$e_{(mm)} = 0.03748(Lu.S)^{0.33} \rightarrow \text{(رابطه ۳)}$$

که Lu: لوژان میانگین و S: فاصله داری درزه‌ها بر حسب میلی‌متر می‌باشند.



شکل ۱. ارتباط بین بازشدگی تئوری (معادله پیشنهادی) با بازشدگی اندازه گیری شده (لاگ‌های حفاری)

بین ۰/۱ تا ۰/۱۲ میلی متر بوده و نشان دهنده تناسب آن با بازشدگی درزه و لوژان بیشتر از ۱۰ می‌باشد. مقایسه این مقادیر (اندازه ذرات سیمان D_{85}) با اندازه ذرات سیمان پورتلند بالا (Hpc) که بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۷ میلی‌متر بوده و متناسب با بازشدگی درزه و لوژان ۳ تا ۱۰ می‌باشد. و در نهایت مقایسه این مقادیر (اندازه ذرات سیمان D_{85}) با اندازه ذرات سیمان میکروفاین که بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۳۵ میلی‌متر بوده و متناسب با بازشدگی درزه و لوژان کمتر از ۳ می‌باشد. بنابراین جهت تزریق در مقاطعی که لوژان بیشتر از ۱۰ می‌باشد از سیمان پرتلند معمولی، در مقاطع با لوژان ۳ تا ۱۰ از سیمان پرتلند بالا و در مقاطع با لوژان کمتر از ۳ در صورت تزریق پذیر بودن از سیمان میکروفاین می‌توان استفاده نمود.

ضمناً جهت محاسبه فاصله‌داری درزه‌ها (S) می‌توان از (رابطه ۵) استفاده نمود. در این رابطه از تعداد متوسط درزه‌های موجود در یک متر (λ) از مغزه حفاری مقدار RQD را می‌توان تخمین زد (Palmstrom, 2005).

$$RQD = 100 e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \text{ (رابطه ۵)}$$

در حقیقت با داشتن RQD می‌توان مقدار (λ) را بدست آورد و با استفاده از رابطه (۲) مقدار بازشدگی را تخمین زد.

مرحله پنجم: تعیین میزان بلین سیمان جهت تزریق می‌باشد. با توجه به اینکه اندازه ذرات سیمان متناسب با بلین سیمان می‌باشد، براساس اطلاعات از

پایه‌گذاری معیار قطعی جهت اجرای عملیات تزریق بر حسب توزیع مقادیر جذب ویژه در ۰.۶، ۳ و ۱ منتهی به ایجاد یک بهسازی اساسی و محکم خواهد شد، زیرا ارزیابی تزریق‌پذیری بطور قابل ملاحظه‌ای واقع بینانه‌تر خواهد بود (Ewert, 1985).

از آنجاییکه مسیرهای هیدرولیکی عامل اصلی انتقال آب و دوغاب هستند از پارامتر جذب ویژه استفاده شده است. این پارامتر براساس میزان خوردند آب (بر حسب لیتر بر دقیقه در واحد طول) تقسیم بر تعداد درزه در نظر گرفته می‌شود. شاخص مقدار جذب ویژه آب بصورت (رابطه ۱) قابل محاسبه است.

$$Q_S = Q_{WPT}/n_w \text{ (رابطه ۱)}$$

به‌طور کلی براساس تجربیات بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت:

الف- در شرایطی که سنگ به گروه ۱ تعلق دارد اگر $Q_S > 1$ باشد، سنگ تزریق‌پذیر است.

ب- در شرایطی که سنگ به گروه ۲ تعلق دارد اگر $Q_S > 1/5$ باشد، سنگ تزریق‌پذیر است.

ج- در شرایطی که سنگ به گروه ۳ تعلق دارد اگر $Q_S > 2$ باشد، سنگ تزریق‌پذیر است.

با توجه به (شکل ۱)، در واقع می‌توان بدون تعیین بازشدگی درزه‌های لاگ‌های حفاری با استفاده از فرمول پیشنهادی این بازشدگی‌ها را با ضریب اطمینان خوب تخمین زد. از این فرمول جهت محاسبه بازشدگی در فلوجارت‌ها استفاده شده است.

از آنجایی که میزان بازشدگی درزه‌ها در نفوذ دوغاب بسیار موثر می‌باشد به ارتباط بین بازشدگی درزه‌ها با اندازه ذرات سیمان پرداخته می‌شود. با توجه به بازشدگی‌های بدست آمده از طریق (رابطه ۳) و قرار دادن آن‌ها در (رابطه ۴) می‌توان اندازه ذرات سیمان تزریقی (میزان ۸۵ درصد عبوری ذرات سیمان D_{85}) را بدست آورده و سپس با توجه به اندازه ذرات سیمان نوع سیمان پورتلند مناسب برای تزریق در درزه‌ها را تعیین نمود (Dalmalm, 2004).

$$D_{85} = e/3 \text{ (رابطه ۴)}$$

براساس محاسبات انجام شده از طریق روابط (۲) و (۳) و در نظر گرفتن اندازه ذرات سیمان و مقادیر لوژان در چارت‌های ارائه شده نتایج زیر حاصل می‌شود. مقادیر لوژان ۱ تا ۳ که تقریباً نفوذناپذیر می‌باشد میزان اندازه ذرات سیمان D_{85} بین ۰/۰۶۷ تا ۰/۱ میلی‌متر، در لوژان ۳ تا ۱۰ بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۶۷ میلی‌متر، در لوژان ۱۰ تا ۳۰ بین ۰/۱۶۷ تا ۰/۲۶۷ میلی‌متر و لوژان ۳۰ تا ۱۰۰ مقدار آن ۰/۲ تا ۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. مقایسه مقادیر بدست آمده (اندازه ذرات سیمان D_{85}) با اندازه ذرات سیمان پورتلند معمولی (OpC) که

پیش شرح داده شده، برای لوژان کمتر از ۳ از سیمان میکروفاين (۸۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰ سانتی متر مربع بر گرم) و برای لوژان بیش از ۳ از سیمان پورتلند بالا و معمولی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه لوژان بین ۳ تا ۱۰ نفوذپذیری کمی را نشان می‌دهد توصیه شده از سیمان با بلین بیش از ۵۴۰۰ سانتی متر مربع بر گرم استفاده شود. برای لوژان ۱۰ تا ۳۰ از سیمان با بلین حدود ۳۸۰۰ تا ۵۴۰۰ سانتی متر مربع بر گرم و با لوژان ۳۰ تا ۱۰۰ از سیمان با بلین ۳۸۰۰ تا ۳۲۰۰ سانتی متر مربع بر گرم در نظر گرفته شده است (Weaver, 1993). البته در بسیاری موارد جهت صرفه جویی در هزینه، مقاطع با لوژان بیش از ۱۰ همگی با یک بلین در محدوده ۳۲۰۰ تا ۳۸۰۰ تزریق می‌شود. این نکته قابل ذکر است که بلین‌ها بدون توجه به نوع سیمان پیشنهاد گردیده است. در صورتی که کیفیت آب رودخانه یا آب زیرزمینی ایجاب می‌کند که از سیمان نوع خاصی استفاده شود می‌بایستی پارامتر کیفیت آب زیرزمینی را مقدم بر میزان بلین پیشنهادی در نظر گرفت.

مرحله ششم: در این مرحله میزان غلظت سیمان تزریقی تعیین می‌شود. مقادیر نسبت آب به سیمان براساس بازشدگی درزه‌ها و درجه درزه‌داری تعیین شده است. میزان بازشدگی در لوژان‌های پایین و درجه درزه‌داری در لوژان‌های بالا نقش بسزایی بازی می‌کنند. مقادیر نسبت آب به سیمان براساس نظر (Foyo et al., 2004) معتقد است در درجه داری پایین از نسبت آب به سیمان غلیظ (۱W:۰/۶C)، در درجه درزه‌داری متوسط از نسبت آب به سیمان متوسط (۱W:۱C) و در درجه درزه‌داری بالا از نسبت آب به سیمان رقیق (۱W:۲C) بکار رود استفاده شده است. در لوژان کمتر از ۳۰ مقدار غلظت دوغاب بیشتر تحت تاثیر بازشدگی درزه‌ها بوده که در فلوجارت مد نظر قرار گرفته است. استفاده از نسبت آب به سیمان بیشتر از ۲ به دلیل آب اندازی توصیه نمی‌شود. در صورت نیاز می‌توان از بنتونیت (۲-۴٪ وزنی سیمان) جهت نفوذ بیشتر دوغاب استفاده نمود.

مرحله هفتم: در این مرحله تعیین چسبندگی دوغاب سیمان انجام می‌شود. این پارامتر براساس نسبت آب به سیمان و بلین آن تعیین می‌گردد. مقدار چسبندگی معمولاً بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ پاسکال برای غلظت‌های مختلف سیمان متغیر است. مقدار عددی چسبندگی به دلیل نوع دستگاه میکسر و سرعت آن متفاوت بوده و به طور مشخص تعیین نشده است. بدین لحاظ در محل کارگاه از طریق آزمایش چسبندگی به کمک صفحه فلزی ۱۵ در ۱۵ سانتی متر قابل تعیین می‌باشد.

مرحله هشتم: در این مرحله فشار ماکزیمم تزریق تعیین می‌شود. در این دیگرام برای سه نوع سنگ با مقاومت بالا، متوسط و ضعیف فرمول‌هایی ارائه شده، که در فلوجارت بر حسب ψ آورده شده است. جهت محاسبه روباره که در میزان فشار وارده به توده سنگی نقش دارد فرمولی ارائه شده است (Houlsby, 1990). نوع درجه درزه داری در میزان فشار مورد نیاز در تزریق نقش دارد. بنابراین مجموع فشارهای روباره، توده سنگی و فشار ناشی از تاثیر درجه درزه‌داری میزان فشار ماکزیمم تزریق را تعیین می‌کند. در تعیین میزان فشار تزریق جهت یابی درزه‌ها نقش دارند. هر چه درزه‌ها افقی‌تر باشند میزان برد تزریق هم بیشتر خواهد شد. در صورتیکه درجه درزه‌داری بیشتر باشد فشار تزریق هم بیشتر گردیده و در نتیجه برد تزریق افزایش می‌یابد. با درجه درزه‌داری کمتر فشار تزریق هم کمتر و در نتیجه برد تزریق هم کاهش می‌یابد (Ewert, 1985). این شرایط تابع میزان شیب درزه‌ها نسبت به سطح افق تغییر خواهد کرد. در (شکل ۲) نحوه محاسبه فشار ماکزیمم آورده شده است.

مرحله نهم: در این مرحله میزان حجم دوغاب تزریقی تعیین می‌شود. با داشتن مقادیر فشار ماکزیمم، چسبندگی دوغاب و بازشدگی متوسط درزه‌ها حجم دوغاب ماکزیمم قابل محاسبه می‌باشد (Lombardi, 1999). حجم دوغاب بدست آمده در این مرحله با حدود ۲۰ لیتر نوسان تخمین زده می‌شود. در (شکل ۲) فرمول محاسبه حجم ماکزیمم آورده شده است.

لازم به ذکر است از بین پارامترهای موثر در حجم دوغاب تزریقی، پارامتر بازشدگی درزه و ناهمواری سطح درزه‌ها تاثیر ویژه‌ای در حجم دوغاب تزریقی دارند. در حقیقت میزان زبری درزه‌ها در نفوذپذیری توده سنگ موثر می‌باشد. تاثیر این پارامتر به کمک (رابطه ۶) محاسبه شده است (Barton, 2001).

$$e = E^2 / (JRC)^{2.5} \quad (\text{رابطه ۶})$$

e: بازشدگی هیدرولیکی (mm)

E: بازشدگی مکانیکی (mm)

JRC: ضریب زبری درزه

در این رابطه مقدار بازشدگی مکانیکی یک میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضریب زبری درزه در حالت هموار در نظر گرفته شده که عدد معادل آن ۲ می‌باشد. در این حالت میزان بازشدگی هیدرولیکی حدود ۰/۲ میلی متر می‌باشد. مقدار بازشدگی هیدرولیکی را می‌توان به بازشدگی درزه‌ها (غیرهیدرولیکی) که از طریق (رابطه ۲) بدست آمده و در چارت‌ها آورده شده افزود. از مجموع بازشدگی‌های هیدرولیکی و غیرهیدرولیکی به منظور محاسبه حجم دوغاب تزریقی (شکل ۲) استفاده کرده تا حجم واقعی‌تری از دوغاب تزریق بدست آید. مقادیر ضریب زبری درزه در حالات دیگر تاثیر ناچیزی بر روی بازشدگی هیدرولیکی دارند؛ بنابراین محاسبه نشده اند. در چارت‌های ارائه شده سعی گردیده که تمامی نظرات و قوانین رایج در مورد عملیات تزریق و مباحث اجرایی آن مد نظر قرار گیرد.

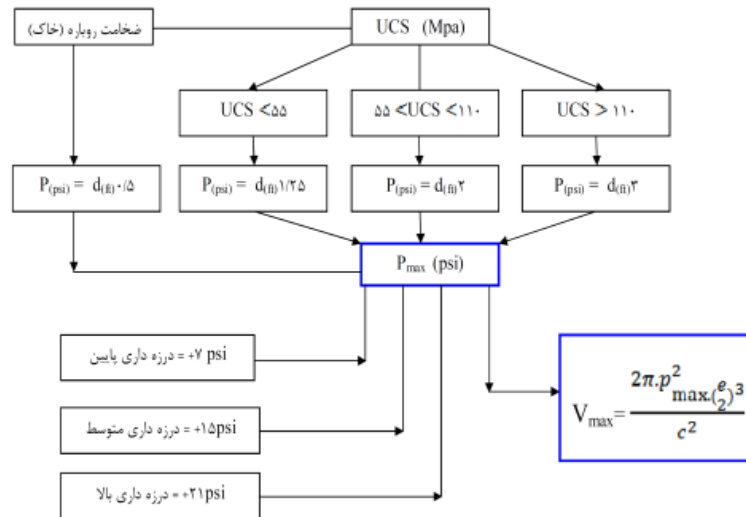
در (اشکال ۳ تا ۶) خصوصیات تزریق از جمله: میزان لوژان، کلاس SPI، درجه درزه داری، تزریق پذیری و یا تزریق ناپذیری توده سنگ و در نهایت پارامترهای پیشنهادی مربوط به غلظت دوغاب و بلین سیمان مربوط به لوژان های ۱ تا ۳، ۱۰، ۱۰۰، ۳۰ تا ۳۰۰ و ۱۰۰ آورده شده است. در این اشکال مراحل اول تا هفتم مورد بحث قرار گرفته در بالا به صورت پیوسته به شکل نمودار آورده شده است.

در (شکل ۳) خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۱ تا ۳ آورده شده است. کمترین بازشدگی درزه و بیشترین بلین سیمان در این لوژان پیشنهاد شده است. در این شکل لوژان ۲ تا ۳ در کلاس SPI B با درجه درزه داری پایین تزریق پذیر می‌باشد. لوژان ۱ تا ۳ در کلاس SPI B با درجه درزه داری متوسط و بالا تزریق ناپذیر می‌باشد.

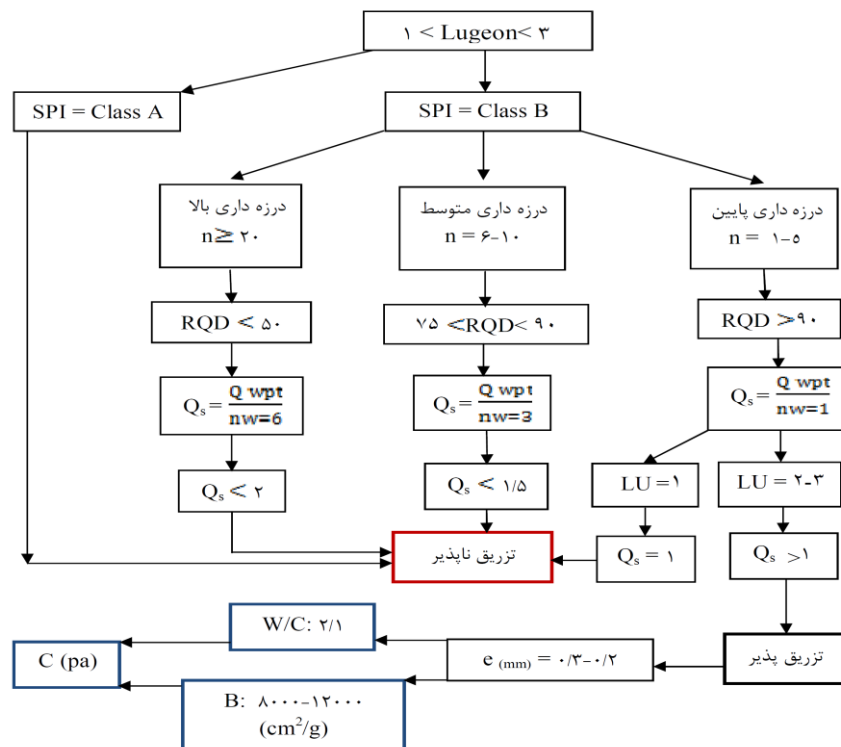
در (شکل ۴) خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۳ تا ۱۰ آورده شده است. در این شکل لوژان ۵ تا ۸ در کلاس SPI B با درزه داری متوسط و لوژان ۳ تا ۱۰ در کلاس SPI B با درزه داری پایین تزریق پذیر می‌باشند. لوژان ۸ تا ۱۰ در کلاس SPI C با درزه داری متوسط و لوژان ۳ تا ۱۰ در کلاس SPI C با درزه داری پایین نیز تزریق پذیر می‌باشند. لوژان ۳ تا ۱۰ در کلاس SPI B با درجه درزه داری بالا، لوژان ۳ تا ۴ در کلاس SPI B با درجه درزه داری متوسط و لوژان ۳ تا ۱۰ در کلاس SPI C با درجه درزه داری بالا تزریق ناپذیر می‌باشند.

پیشنهاد شده است. در این شکل لوژان ۳۰ تا ۱۰۰ در کلاس C و SPI D در شرایط درزه داری بالا، متوسط و پایین تزریق پذیر می باشند. در لوژان ۳۰ تا ۱۰۰ تزریق ناپذیری وجود ندارد.

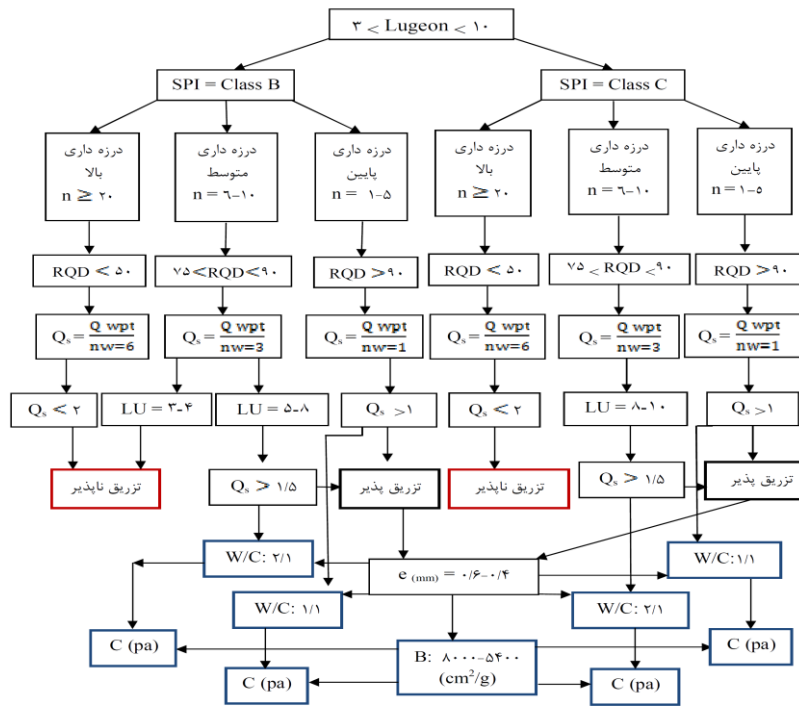
در (شکل ۵) خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۱۰ تا ۳ آورده شده است. در این شکل لوژان ۱۳ تا ۳۰ در کلاس SPI C با درزه داری بالا و لوژان ۱۰ تا ۳۰ در کلاس SPI C با درزه داری متوسط و پایین تزریق پذیر می باشند. لوژان ۱۰ تا ۱۲ در کلاس SPI C با درزه داری بالا تزریق ناپذیر است. در (شکل ۶) خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۳۰ تا ۱۰۰ آورده شده است. در این حالت میزان بازشدگی درزه ها بیشترین مقدار و سیمان با کمترین بلین



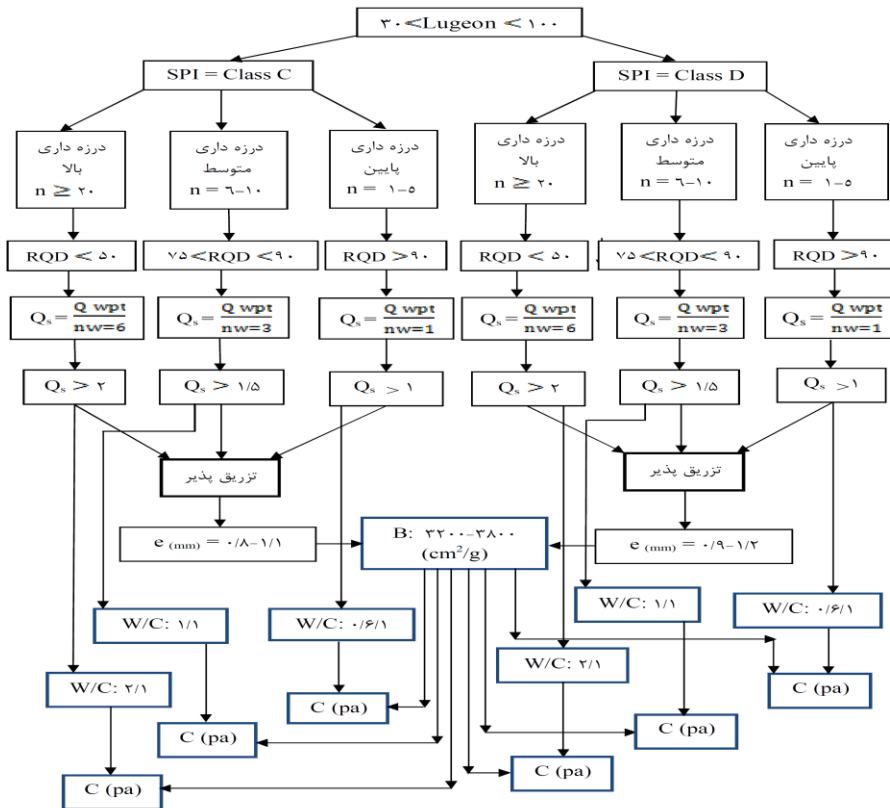
شکل ۲. تعیین فشار و حجم ماکزیمم تزریق (Lombardi, 1985) and; (Houlsby, 1990) and; (Ewert, 1985)



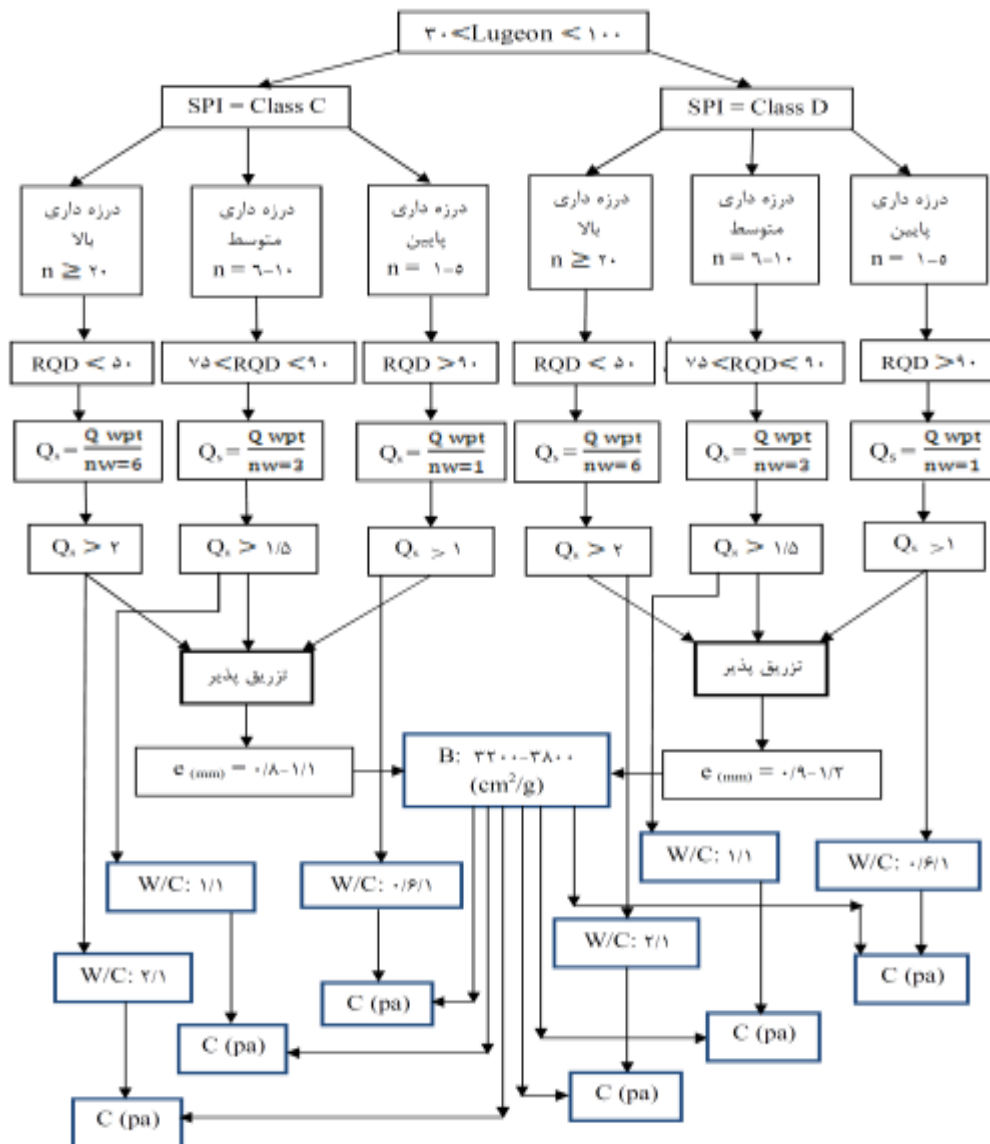
شکل ۳. تعیین خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۱ تا ۳



شکل ۴. تعیین خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۳ تا ۱۰



شکل ۵. تعیین خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۳۰ تا ۱۰۰



شکل ۶. تعیین خصوصیات تزریق مربوط به لوژان ۳۰ تا ۱۰۰

نتیجه گیری

ذرات سیمان و تعیین غلظت متناسب با شرایط درزه ها از مسائل مهم مورد توجه قرار گرفته در مقاله حاضر می باشد. ارائه یک روند ارزیابی معقول از شرایط زمین با توجه به اطلاعات موجود که می تواند به تصمیم گیری درست و سریع در مورد تزریق بیانجامد. در خصوص برنامه ریزی عملیات تزریق دیدگاه نسبتاً معقولی در زمینه حجم و فشار تزریق هم چنین راهکاری در رابطه با غلظت ماده تزریقی ارائه می دهد. واحد کنترل و برنامه ریزی پروژه جهت تعیین میزان مصالح مصرفی، برآورد هزینه آن و برنامه زمان بندی مربوط به اتمام پروژه می تواند از آن بهره برداری نماید. این مقاله جنبه های اجرایی عملیات تزریق را مد نظر قرار داده است.

در عملیات تزریق با داشتن پارامترهای مورد نیاز می توان در هزینه و زمان اجرای پروژه صرفه جویی نمود. بر این اساس با ارائه یک طرح مشخص برای عملیات تزریق می توان این اهداف را تامین نمود. در مقاله حاضر با ارائه یک طرح جامع سعی شده تا به این اهداف بیش از پیش نائل گردید. بدین لحاظ با توجه به شرایط زمین می توان تخمین معقولی از فشار، غلظت و حجم دوغاب ارائه نمود و شرایط فنی و بهینه اقتصادی را در نظر گرفت. به لحاظ فنی عدم نیاز به تغییرات متوالی غلظت دوغاب (از غلیظ به رقیق در روش کلاسیک) که منجر به صرف هزینه و زمان بیشتری می شود. توجه به بازشدگی درزه ها، اندازه

منابع:

- اجل لوئیان.ر.، پسندی.م.، فروغی.ر.ا.، ۱۳۹۲، تخمین خوردن سیمان پرده آب بند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۷، ص ۳۲-۴۳.
- طاهری.د.، ۱۳۸۱، بررسی ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی ساختگاه سد بختیاری و ارزیابی تزریق پذیری پی سنگ و تکیه گاه‌های آن به منظور طراحی پرده آب بند، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱-۱۸۴.
- فهیمی.ف.ا.، ۱۳۸۴، اصول طراحی پی در سدسازی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ص ۱-۴۶۷.
- قبادی.م.ح.، حیدری.م.، رفیعی.ب.، موسوی.س.، آریافرن.، ۱۳۹۲، مطالعه خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه سنگ های سازند آغاچاری در شرق و جنوب شرق اهواز، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۸، ص ۲۱-۳۳.
- Barton.N., 2001, An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol:38, No:3, p:317-329.
- Barton.N., 2007, Rock quality, Seismic velocity, Attenuation and anisotropy, Talor & Francis, p:1-729.
- Chan man.Piu., 2005, Analysis and modeling of grouting and its application in civil engineering, Bachelor of Engineering, p:28-30.
- Dalmalm.T., 2004, Choice of grouting method for jointed hard rock based on sealing time predictions, Division of Soil and Rock Mechanics, p:82-87.
- Ewert.F.K., 1985, Rock grouting with emphasises on dam sites, Springer Verlag, Berlin- New York-Tokyo, p:1-428.
- Ewert.F.K., 1997, Permeability, Groutability and grouting of rocks related to dam site, Part:1, Dam Engineering, Vol:8 ,No:1 ,p:31-77.
- Ewert.F.K., 2005, Hydrofracturing of latent discontinuities in rock and implication for successful and economical execution of grouting, Dam Engineering, Wilmington Publishing Ltd, Vol:16, No:1, p:5-56.
- Foyo.A.C., Sanchez.M.A., Tomillo.C., 2004 , A Proposal for a Secondary Permeability Index obtained from water pressure tests in dam foundations, Engineering Geology, Vol: 77, p:69-82.
- Houlsby.A.C., 1990, Construction and design of cement grouting, New York, John Willy & Sons, p:1- 442.
- Houlsby.A.C., 1999, www.Mining life. com/Miner/Rock mech/Grouting/Rock grout.
- Kutzner.C., 1996, Grouting of rock and soil, A. Balkema, Rotterdam, Book Field, p: 1-271.
- Kutzner.C., 1985, Consideration on rock permeability and grouting criteria, Fifteenth International Congress on large Dams, International Commission on large Dams, Paris, Vol: 3, p:315-328 and Vol:5, p:415-417.
- Lombardi.G., 1985, The role of cohesion in cement grouting of rock, 15th, ICOLD, Lausanne, Vol: 3,p:235-262.
- Lombardi.G., 1999, Grouting of rock with cement mixes, ICOLD-SYMPOSIUM, Dam Foundations Problems and Solutions, Antalya Turkey, p:1-18.
- Palmstrom.A., 2005, Measurements of and relations between block size and rock quality designation (RQD), Tunneling and Underground Space Technology, Vol: 20, p:362-377.
- Weaver.K.D., 1993, Selection of grout mixes grouting in rock:Grouting in rock and concrete,