Archive of SID

فصلنامه‌ی علمی و پژوهشی شریف
پاییز ۱۳۸۶، شماره‌ی سی و نهم، ص. ۹۳-۱۰۰، (یادداشت فنّی)

تحلیل عددی تأثیر پارامترهای مؤثر در فرایند تزریق در محیط‌های سنگی ناپیوسته

صمد ولی‌پورشکوهی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
علی مرتضوی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تزریق دوغاب سیمان یکی از روش‌های معمول در به‌سازی شرایط بستر سدها است که به‌منظور بهبود پارامترهای ژئومکانیکی و قابلیت باربری توده‌سنگ بستر یا کاهش تراوایی آن انجام می‌شود. همچنین در محیط‌های سنگی تزریق دوغاب به پشت پوشش بتنی تونل‌ها به‌منظور اتصال بهتر بین پوشش و زمین به‌کارگرفته می‌شود. تزریق در محیط‌های سنگی به‌دلیل نوع و مشخصات ناپیوستگی‌ها، و ارتباط آنها با یکدیگر، با تزریق در خاک متفاوت است. در این روش، دوغاب تحت فشار معینی تزریق می‌شود و این مخلوط در سرتاسر بازشدگی‌ها و درزه، و شکاف‌های موجود حرکت کرده و باعث کاهش اثر ناپیوستگی‌ها خواهد شد.

نوع مسیرهای هیدرولیکی در سنگ، متناظر با شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منطقه است. همچنین مشخصه‌های هندسی این مسیرها، به دلیل آن که مسیرهای انتقال دوغاب تزریقی را نیز تشکیل می‌دهند، بر روند تزریق مؤثر خواهند بود. عمق نفوذ دوغاب به درون درزه‌ها، علاوه بر خواص ناپیوستگی‌ها و ویژگی‌های دوغاب، به فشار تزریق نیز بستگی دارد. در این نوشتار سعی بر آن است که پس از انتخاب مدل رفتاری مناسب برای دوغاب سیمان، تأثیر فشار تزریق و پارامترهای مؤثر بر رفتار و قابلیت نفوذ دوغاب (نظیر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، جهت‌داری و تداوم ناپیوستگی‌ها، و...) مورد مطالعه قرار گیرند.

در این تحقیق، روش عددی به‌عنوان ابزاری مناسب برای تشریح فرایند تزریق به‌کارگرفته شده است. ابتدا نظریه‌ی مسئله مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد، و در مرحله‌ی دوم رفتار دوغاب (با در نظرگرفتن پارامترهای ژئومکانیکی حاکم) در محیط‌های سنگی ناپیوسته با استفاده از روش‌های عددی شبیه‌سازی شده است. به‌منظور تحلیل عددی فرایند تزریق از برنامه‌ی UDEC[1] استفاده شده است. این نرم‌افزار دوبعدی است و لذا با توجه به ماهیت سه‌بعدی مسئله نتایج تحقیق از محدودیت‌های ناشی از تحلیل‌های دوبعدی برخوردار است.

۱. مقدمه

«تزریق» روشی است که با استفاده از آن دوغاب سیمان به داخل خلل و فرج و درز، شکاف، یا حفره‌های محیط‌های سنگی و خاکی نفوذ می‌کند و موجب بهبود خواص مقاومتی محیط می‌شود. با انجام عملیات تزریق، نفوذپذیری محیط کم شده و مقاومت کلی آن افزایش می‌یابد، و در نتیجه تغییرشکل‌پذیری محیط کم می‌شود. تزریق دوغاب در محیط‌های ژئومکانیکی از اواخر سده‌ی نوزدهم شروع شده و پس از مدت زمان نه‌چندان طولانی به یکی از مهم‌ترین روش‌های به‌سازی زمین تبدیل شده و روز به روز گونه‌های وسیعی از روش‌های تزریق برای شرایط مختلف توسعه یافته‌اند. تزریق در سنگ به‌سبب نوع ناپیوستگی‌ها و ارتباط میان آنها با تزریق در خاک تفاوت اساسی دارد. چون بیشتر سنگ‌ها نفوذپذیری کمی دارند، رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ فقط توسط الگوی درزه‌داری که دارای هدایت هیدرولیکی جهت‌داری هستند تأمین می‌شود. برای این منظور، گمانه‌هایی را حفر، و سپس ماده‌ی تزریق را با فشار در تشکیلات تزریق می‌کنند. در انجام این عملیات، شناسایی فاصله‌داری گمانه‌های تزریق، فشار تزریق دوغاب، و نهایتاً مخلوط دوغاب مناسب، از مسائل اساسی تزریق هستند که نیاز به دانش زمین‌شناسی ناحیه، فناوری دوغاب و شناخت روش‌های تزریق دارد.[۱] در حالت کلی تزریق در محیط‌های سنگی به دو منظور انجام می‌شود:

الف) بهبود مشخصه‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ؛

ب) کاهش نفوذپذیری محیط سنگی.

به دست آوردن درک کامل از فرایند تزریق دشوار به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های تحقیق درباره‌ی تزریق استفاده از روش‌های عددی به‌منظور تحلیل فرایند نفوذ دوغاب در شکستگی‌ها است. در این تحقیق پس از انتخاب رفتار رئولوژیکی مناسب برای دوغاب و بیان مشخصه‌ی مسیرهای هیدرولیکی، تأثیر پارامترهای مؤثر بر فرایند تزریق (فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، تداوم ناپیوستگی‌ها، بازشدگی درزه‌ها و خواص دوغاب تزریق) با استفاده از روش‌های عددی مورد مطالعه قرار گرفته است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲. مواد مورد استفاده در تهیه‌ی دوغاب تزریق

ماده‌ی مورد تزریق که اصطلاحاً «دوغاب» نامیده می‌شود، ترکیبی از مواد مختلف است. اجزا تشکیل‌دهنده‌ی دوغاب عموماً آب، سیمان، و انواع مواد شیمیایی افزودنی را شامل می‌شود. حرکت دوغاب مبتنی بر اصول مکانیک سیالات و رئولوژی (روانش‌شناسی) است و چسبندگی، مقاومت و گیرش دوغاب از اصول علم شیمی پیروی می‌کند. دوغاب مناسب باید دارای حد بهینه از مواد تشکیل‌دهنده‌ی خود باشد به‌طوری که نزدیک‌ترین رفتار را نسبت به خواص طراحی شده و مورد انتظار از خود نشان دهد. به‌طور کلی دوغاب تزریقی از مواد و افزودنی‌های زیادی تشکیل شده است. در این تحقیق دوغاب سیمانی که یکی از معمول‌ترین دوغاب‌ها در فرایند تزریق است، مورد مطالعه قرار گرفته و از ذکر دیگر انواع دوغاب‌ها خودداری شده است.

۱.۲. دوغاب سیمانی

سیمان اصلی‌ترین ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی این دوغاب است. از جمله مشخصه‌های مهم سیمان ریزدانگیِ بالای آن است. با استفاده از سیمان می‌توان دوغاب پایداری به‌وجود آورد که توانایی نفوذ در درزه‌های بسیار باریک را داشته باشد. مشخصات سیمان استاندارد براساس مقادیر افزودنی پوزولانی، ترکیبات اکسیده (منیزیم، آهن، آلومینیوم، کلسیم، سیلیس) و خواص فیزیکی آن (ریزدانگی آن براساس درصد ابعاد دانه‌های بزرگ‌تر از ۰٫۹ میلی‌متر سنجیده می‌شود)، سطح ویژه، جرم مخصوص، زمان شروع و خاتمه‌ی گیرش سیمان، مقاومت‌های ۳، ۷ و ۲۸ روزه و... ارزیابی می‌شود. سیمان پرتلند موجود در بازار (انواع I، II، III) اکثراً ریزدانه‌اند و برای استفاده در تزریق هیچ محدودیتی ندارند. سیمان نوع III بسیار ریزدانه‌تر از انواع دیگر است و دوغاب تهیه شده از آن نیز گران‌روی کم‌تری دارد. در تزریق تحکیمی بیشتر از سیمان نوع III استفاده می‌شود. همچنین سیمان نوع V از نوع پوزولانی بوده و در برابر محیط‌های سولفاته مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهد.

یکی دیگر از اجزاء اصلی دوغاب سیمانی «آب» است. آب مورد استفاده در تزریق دوغاب باید خالی از مواد آلی و ذرات ریز و به‌عبارت دیگر از لحاظ ظاهری باید بسیار زلال باشد. به‌عنوان یک قاعده‌ی کلی هر گونه آب قابل شرب را می‌توان در تهیه‌ی دوغاب به‌کار برد. وجود ذرات خارجی در آب باعث مسدود شدن شیرها و رسوب‌ها و حتی ناکارآمد شدن دوغاب در پرکردن شکستگی‌ها می‌شود. از نظر شیمیایی نیز باید آب مورد استفاده عاری از یون‌های مضر و رسوبات محلول باشد. از نظر فنی نیز آب محتوی بیشتر از ۰٫۱ درصد سولفات و بیش از ۰٫۵ درصد کلراید همراه مواد قندی و موادی که بر درصد قلیایی بودن آب می‌افزایند، نامناسب است. آب مورد استفاده در تزریق باید حتی‌المقدور کیفیتی مناسب نوشیدن داشته باشد.[۲]

۳. رفتار رئولوژیکی دوغاب تزریق

رفتار رئولوژیکی دوغاب نقش مهمی در تزریق دارد، زیرا تعیین کننده‌ی رابطه‌ی میان فشار و آهنگ جریان است. افزون بر این، ویژگی‌هایی مانند «تنش تسلیم» و «شعاع نفوذ دوغاب» را محدود خواهد کرد. تنش تسلیم بیان‌گر رفتار جریان سیال، حین نفوذ دوغاب در درزه و شکاف تا زمانی است که به نقطه‌ی گسیختگی برسد. در جدول ۱ خلاصه‌یی از مدل‌های رفتاری رئولوژیکی سیالات آورده شده است. ساده‌ترین مدل برای بیان رفتار رئولوژیکی سیال (دوغاب پایه‌سیمانی) در نظر گرفتن آن به‌عنوان یک مدل بینگهام با شرایط تنش تسلیم و گران‌روی اولیه است.[۳و۴] ویژگی رئولوژیکی دوغاب تابعی از ساختمان داخلی ــ یعنی نوع سیمان و نسبت آب به سیمان ــ است و برای محدوده‌ی کاربرد هریک از انواع سیمان‌ها مدل رفتاری خاصی باید در نظر گرفته شود. جدول ۱ ارائه‌دهنده‌ی مدل‌های رفتاری مناسب برای انواع دوغاب‌های سیمانی با نسبت آب به سیمان (W/C) متفاوت است.

با آگاهی بر این که هدف اصلی در این تحقیق، تحلیل عددی فرایند تزریق در سنگ‌های درزه‌دار است و از نسبت‌های بالای ۱ برای نسبت آب به سیمان (W/C) استفاده می‌شود، از رفتار رئولوژیکی بینگهام برای مدل‌سازی جریان دوغاب‌های سیمانی در تحلیل عددی استفاده شده است.[۴و۵]

۴. تحلیل عددی فرایند تزریق در توده‌سنگ‌های درزه‌دار

۱.۴. اهداف تحقیق

دانش تزریق زمینه‌های تحقیقاتی مختلفی را شامل می‌شود. به‌عنوان مثال، جریان دوغاب در شکستگی‌های سنگ و رفتار رئولوژیکی مواد تزریقی از مهم‌ترین جنبه‌های فناوری تزریق به‌شمار می‌رود. امروزه روش‌های عددی از معمول‌ترین روش‌های محاسباتی در علوم مهندسی هستند. اساس این روش‌ها، تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود است. هدف از این نوشتار شبیه‌سازی فرایند تزریق با استفاده از روش «تحلیل عددی» است. لازم به توضیح است که چون برنامه‌ی UDEC از قابلیت مدل‌سازی جریان سیال در داخل درزه‌های سیستم‌های بلوکی برخوردار است، در

جدول ۱. نوع مدل رفتاری دوغاب برحسب نسبت آب به سیمان (W/C).[۵]

نوع مدل رفتاری	نسبت آب به سیمان (W/C Ratio)
سیال نیوتنی	$W/C > ۲٫۵$
سیال بینگهام	$۰٫۷۵ < W/C < ۲٫۵$
سیال شبه‌پلاستیکی	$W/C < ۰٫۷۵$

www.SID.ir

Archive of SID

این تحقیق برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا که عوامل زیادی در امر تزریق توده‌سنگ دخیل‌اند، سعی شده است تا به‌نحوی این عوامل مورد بررسی و تحلیل قرارگیرند و در نهایت اهمیت هر کدام از پارامترها سنجیده شوند. فرضیات مورد استفاده در تحقیق حاضر عبارت‌اند از:

الف) ماده‌سنگ نفوذناپذیر است و فقط جریان دوغاب در درزه‌ها انجام می‌گیرد.

ب) ضخامت درزه‌ها در مقایسه با فاصله‌داری درزه‌ها ناچیز است.

ج) مدل بینگهام بیانگر رفتار رئولوژیکی دوغاب سیمانی است.

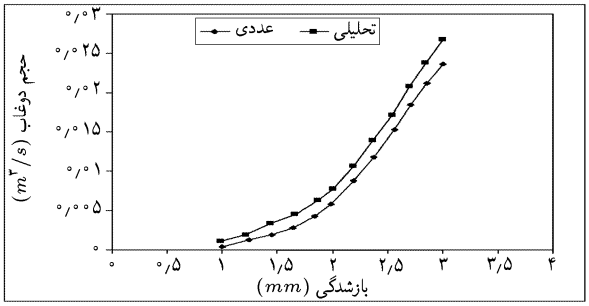
د) فشار تزریق به حدی پایین است که پدیده‌ی شکست هیدرولیکی در ماده‌سنگ اتفاق نمی‌افتد.

به علت عدم دسترسی به نتایج آزمایشگاهی و میدانی، نتایج حاصله از تحلیل عددیِ انجام شده با نتایج منتشر شده از سوی دیگر مراجع مقایسه شده است.[۶و۷] در شکل ۱ نتایج ارائه شده برای هر دو حالت آزمایشگاهی و عددی، به‌منظور نشان دادن دقت نتایج تحلیل عددی فرایند تزریق آورده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود نتایج عددی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند.

۲.۴. پارامترهای مورد استفاده در تحلیل عددی

پارامترها و مقادیر استفاده شده در تحلیل عددی فرایند تزریق برای ناپیوستگی‌ها در جدول ۲، و برای ماده‌سنگ در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به در دسترس نبودن اطلاعات راجع به شرایط تزریق در پروژه‌های داخل کشور این اطلاعات از دیگر مراجع موجود، که موضوع آن هم‌راستای تحقیق ارائه شده است،[۸] استفاده شد.

برای انتخاب خواص دوغاب تزریقی از نتایج پروژه‌ها و مقالات مختلف منتشر شده بهره گرفته شده است. همچنین سعی برآن بوده تا مقادیر انتخاب شده برای دوغاب به خواص دوغاب‌های استفاده شده در پروژه‌های عملی نزدیک باشد. در جدول ۴ مقادیر و پارامترهای مورد استفاده برای بیان خواص دوغاب تزریقی در تحلیل عددی ارائه شده است.



شکل ۱. میزان دوغاب مصرفی برای یک درزه‌ی واحد با توجه به نتایج آزمایشگاهی و عددی.

جدول ۲. پارامترهای ناپیوستگی مورد استفاده در تحلیل عددی.

پارامتر	مقدار
زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	۲۵
زاویه‌ی اتساع (درجه)	۱۵
چسبندگی (MPa)	۱٫۸
مقاومت کششی (MPa)	۰٫۶
سختی نرمال (GPa/m)	۳
سختی برشی (GPa/m)	۲
بازشدگی باقی‌مانده (mm)	۰٫۱
بازشدگی در تنش صفر (mm)	۲
نفوذپذیری درزه $Pa^{-1}s^{-1}$	۸٫۳۳

جدول ۳. پارامترهای ماده‌سنگ مورد استفاده در تحلیل عددی.

پارامتر	مقدار
چگالی (kg/m۳)	۲۴۰۰
مدول یانگ (GPa)	۳۴
ضریب پواسون	۰٫۲
مدول برشی (GPa)	۱۴
مدول حجمی (GPa)	۲۰

جدول ۴. داده‌های مورد استفاده برای دوغاب سیمانی (سیمان استاندارد).

پارامتر	مقدار
نسبت آب به سیمان (W/C)	۱-۱٫۵
چگالی (kg/m۳)	۱۶۰۰
گران‌روی (Pa.sec)	۰٫۰۱
نقطه‌ی تسلیم (Pa)	۵

۳.۴. تحلیل عددی پارامترهای مؤثر بر میزان نفوذ دوغاب در توده‌سنگ

الگوی طراحی شبکه گمانه‌های تزریق بسته به هدف تزریق متفاوت است، اما معیار فاصله‌داری نهایی گمانه‌ها مستقل از این موضوع است و به نفوذپذیری اولیه‌ی تشکیلات زمین‌شناسی، سیستم ناپیوستگی‌ها، ترکیب ماده‌ی تزریقی، فشار تزریق و معیار اشباع شدگی بستگی دارد.[۲]

در زمینه‌ی انجام عملیات تزریق باید مطمئن بود که محدوده‌ی تزریق هیچ‌یک از چال‌های حفاری شده بر چال تزریقی مجاور تأثیر نداشته، و حفاری چال‌های سری دوم پس از تکمیل حفاری و تزریق چال‌های اولیه انجام می‌گیرد.[۹] چنانچه در بالا ذکر شد در این نوشتار تأثیر چهار پارامتر هندسی (مربوط به درزه‌های توده‌سنگ درزه‌دار)، دو پارامتر دوغاب (مربوط به خواص رئولوژیکی دوغاب تزریقی) و فشار تزریق روی شعاع نفوذ دوغاب مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای نشان‌دادن تأثیر فشار تزریق در موفقیت عملیات تزریق در هر یک از حالات مختلف تحلیل عددی (همراه با تغییر پارامترهای هندسی) مقدار فشار تزریق در هشت پله افزایش داده شده است. نکته‌یی که باید متذکر شد نحوه‌ی انتخاب شعاع نفوذ دوغاب تزریق است. برای

www.SID.ir

Archive of SID

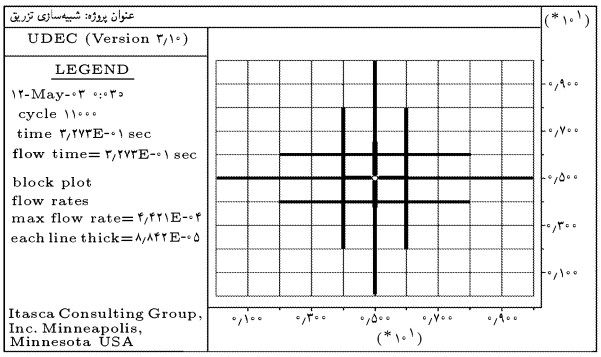
تعیین شعاع (عمق) نفوذ دوغاب از تعریف احتمال تجمعی استفاده شده است. میزان احتمال ۸۵٪ به‌عنوان احتمال مقبول در انتخاب عمق نفوذ دوغاب درنظر گرفته شده است.

۱.۳.۴ تأثیر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بر فرایند تزریق

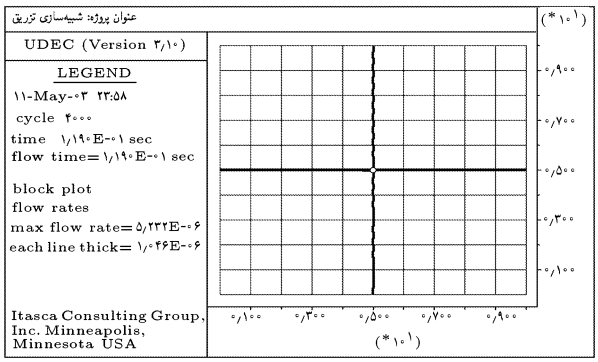
در تحلیل عددی مرحله‌ی اول محدوده‌یی از توده‌سنگ به ابعاد ۱۰×۱۰ متر شبیه‌سازی شده و یک چال تزریقی به قطر ۲۰ سانتی‌متر در مرکز مدل در نظر گرفته شده است. با توجه به این که نسبت طول به قطر چال تزریق بزرگ است، مسئله را با تقریب قابل قبول می‌توان به‌صورت کرنش صفحه‌یی فرض کرد. لذا نتایج نشان داده شده، حاصل شبیه‌سازی یک مقطع افقی در میان ارتفاع چال تزریق هستند. فرض بر این بوده است که محدوده‌ی مورد تزریق در عمق ۵۰۰ متری (عمق متوسط برای بیشتر پروژه‌های تونلی ایران) قرار دارد. لذا با توجه به چگالی سنگ میزان تنش‌های برجای قائم حدود ۱۲ مگاپاسکال برآورد شده و به مدل اعمال شده است. محدوده‌ی مورد مطالعه توسط دو دسته ناپیوستگی عمود بر هم قطع شده است. در تحلیل‌ها، فشار بیشینه‌ی تزریق تا حدی در نظرگرفته شده است که فراتر از فشار مورد نیاز برای شکست ماده‌سنگ (تحت اثر سیال) نباشد، چون هدف تحقیق شبیه‌سازی اثر ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در فرایند تزریق بوده است. چنانچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش فشار از ۱٫۲ به ۹٫۶ بار، اختلاف قابل ملاحظه‌یی در عمق نفوذ دوغاب مشاهده می‌شود که مؤید تأثیر فشار تزریق در نفوذ دوغاب است. شکل ۳ خلاصه‌یی از نتایج تحلیل را برای فاصله‌داری‌های مختلف درزه‌ها نشان می‌دهد. چنان که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، بسته به فشار تزریق، شعاع نفوذ دوغاب روند رو به افزایش دارد. در فشارهای بالا با افزایش فاصله‌داری شعاع نفوذ سریع‌تر به مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد و پس از آن افزایش فاصله‌داری تأثیری در افزایش شعاع نفوذ دوغاب نخواهد داشت. این در حالی است که در فشارهای پائین هنوز شعاع نفوذ با فاصله‌داری رابطه‌ی مستقیم و افزایشی خود را حفظ کرده است و دیرتر به مقدار ثابت می‌رسد. علت انطباق منحنی‌های مربوط به دو فشار ۱٫۲ و ۴٫۸ بار ماهیت عملکرد محیط‌های سنگی درزه‌دار و ناپیوسته است. در فشار بالاتر به‌علت تراکم اولیه‌ی توده‌سنگ بلوکی مسیر درزه‌ها متراکم‌تر و بسته‌تر شده و ابتدا مقاومت بیشتری در برابر نفوذ ایجاد خواهد شد. نهایتاً براثر افزایش فشار، لغزش و بازشدگی در ناپیوستگی‌ها اتفاق افتاده و میزان نفوذ افزایش می‌یابد.

۲.۳.۴. تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بر فرایند تزریق

در انجام فرایند تزریق در طول گمانه، جهات درزه‌ها به‌عنوان یک پارامتر مهم محسوب می‌شود که تغییرات این پارامتر در حالات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای نشان‌دادن تغییرات جهت‌داری درزه‌ها

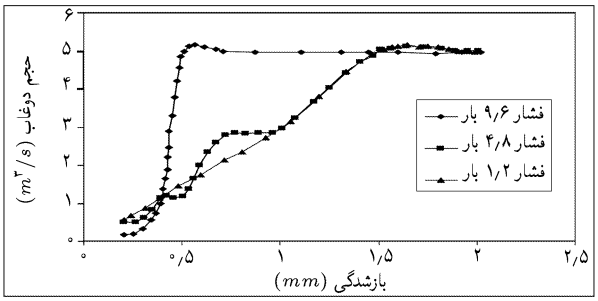


الف) تحت فشار تزریق ۱٫۲ بار؛



ب) تحت فشار تزریق ۹٫۶ بار.

شکل ۲. نتایج حاصله از تحلیل عددی در محیط با فاصله‌داری ۱ متر.

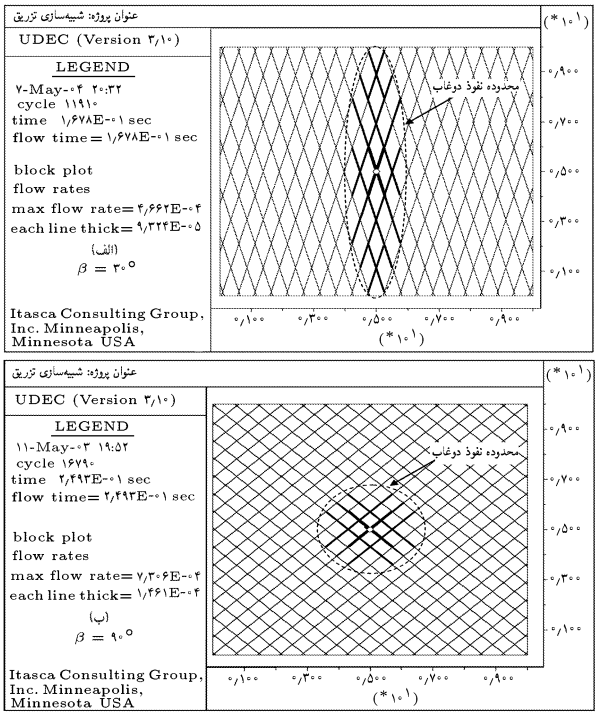


شکل ۳. تغییرات شعاع نفوذ دوغاب نسبت به فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها تحت فشارهای مختلف تزریق.

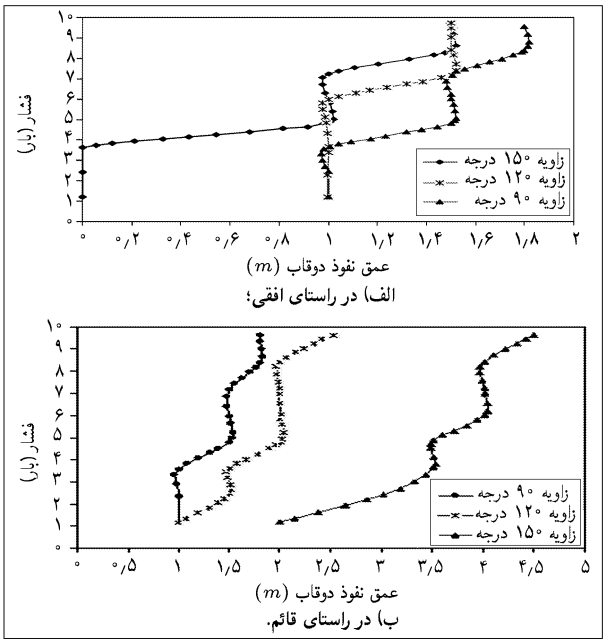
یک‌بار زاویه‌ی α (زاویه‌ی بین محور افقی، یعنی محور x، و دسته‌درزه‌ی اول) متغیر فرض شد، و از مقدار ۱۵ تا ۷۵ درجه تغییر داده شد و همگام با این تحلیل شعاع نفوذ و حجم دوغاب مصرفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این حالت فقط زاویه‌ی بین دسته‌درزه‌ی اول متغیر فرض شده و مقدار زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی دوم (نسبت به محور افقی مدل) برای تمام تحلیل‌ها ۹۰ درجه درنظر گرفته شده است. برای نشان دادن تأثیر این دو دسته‌درزه در عملیات تزریق، مقادیر متفاوتی برای زاویه‌ی β (زاویه‌ی متوسط بین دو دسته‌درزه) در نظر گرفته شد که از ۳۰ تا ۱۵۰ درجه تغییر داده شد. از آنجا که زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه به‌ترتیب مکمل زوایای ۱۵۰ و ۱۲۰ درجه‌اند، نتایج مشابهی برای زوایای ۳۰،

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴. نتایج حاصله از تحلیل عددی در محیط با فاصله‌داری ۰/۵ متر تحت فشار تزریق ۹/۶ بار در دو زاویه‌ی مختلف بین دو دسته ناپیوستگی.



شکل ۵. تغییرات عمق نفوذ دوغاب برحسب فشار تزریق برای مقادیر متفاوت زاویه بین دو دسته درزه.

۱۵۰ و ۶۰، ۱۲۰ پیش خواهد آمد. برای حالتی که زاویه‌ی بین دو دسته‌درزه ۹۰ درجه باشد، مقدار شعاع نفوذ دوغاب تقریباً در دو جهت افقی و قائم برابر خواهد بود (شکل ۴). شکل ۵ نشان می‌دهد که با تغییر زاویه بین دو دسته‌درزه به مقادیر ۳۰ و ۶۰ درجه، به‌ترتیب عمق نفوذ دوغاب در راستای افقی افزایش و برعکس میزان نفوذ دوغاب در راستای قائم کاهش خواهد یافت به‌طوری که در زاویه‌ی ۳۰ یا ۱۵۰ درجه این اختلاف به حد نهایی خود خواهد رسید.

با افزایش فشار تزریق میزان دوغاب تزریقی افزایش می‌یابد و چنان‌که در شکل ۶ دیده می‌شود برای فشار تزریق ۹/۶ بار بیشترین خورند را خواهیم داشت؛ در شکل نیز منحنی این حالت بالاتر از سایر منحنی‌ها قرار گرفته است. علاوه بر این در تمام فشارهای اعمالی با تغییر زاویه‌ی α (زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی اول با محور افقی) از ۰ تا ۷۵ درجه شاهد کاهش تدریجی دوغاب تزریقی در محدوده‌ی مورد نظر خواهیم بود. علت این امر را می‌توان در عدم توزیع یکنواخت دوغاب در جهات مختلف بیان کرد.

۳.۳.۴. تأثیر تداوم ناپیوستگی‌ها بر فرایند تزریق

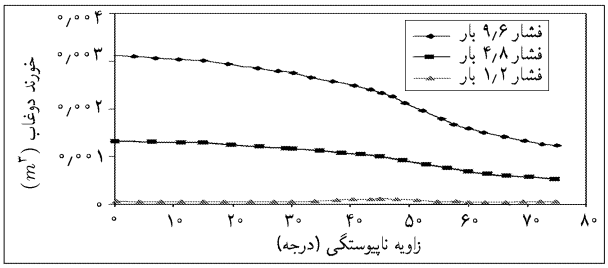
برای نشان دادن تأثیر تداوم درزه‌ها بر نفوذ دوغاب در محدوده‌یی به ابعاد ۱۰×۱۰ متر دو دسته‌درزه به‌همراه یک چال تزریق به قطر ۲۰ سانتی‌متر در مرکز محدوده درنظر گرفته شده است. از بین دو دسته‌درزه برای دسته‌درزه‌ی اول مقادیر متفاوتی از فاصله بین ۰/۵ تا ۲ متر فرض شده است. همچنین دسته‌درزه‌ی دوم فاقد هرگونه شکافی است. زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی اول ۴۵ درجه، زاویه‌ی دسته‌درزه‌ی دوم ۱۳۵، و فاصله‌داری برای هر دو دسته درزه ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است.

نتایج نشان می‌دهند که اگر طول شکستگی‌ها زیاد باشند، تزریق به‌سهولت انجام خواهد گرفت. علاوه بر این عمق نفوذ دوغاب نیز یکنواخت‌تر خواهد بود. نحوه‌ی جریان دوغاب برای یک نوع فشار در شکل ۷ نشان داده شده است. در این حالت پس از انجام عملیات تزریق تحت فشار ۱/۲ بار از چال تزریق، دوغاب در شعاعی برابر با ۰/۵ متر توزیع می‌شود.

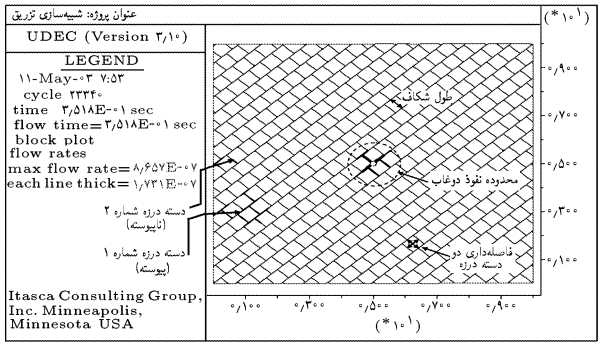
باید توجه داشت که گاهی با دانستن وضعیت تزریق‌پذیری و نفوذپذیری منطقه، و همچنین اعمال آزمایش‌های نفوذپذیری ممکن است از تزریق انجام شده در منطقه نتایج مطلوبی حاصل نشود. شاید بتوان مهم‌ترین عامل مؤثر در این مسئله را شرایط زمین‌شناسی حاکم بر محیط عملیات تزریق دانست. یکی از پارامترهای مهمی که در عملیات تزریق تحت فشار پائین مهم به نظر می‌رسد، تداوم دسته‌درزه‌های محدوده‌ی تزریق است. در تزریق با فشار بالا به‌علت ایجاد شکاف‌های جدید بحث تداوم گاهی قابل حل است، در حالی که برای فشارهای پایین نحوه‌ی گسترش و ارتباط بین درزه‌ها در میزان نفوذ دوغاب مؤثر خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، با افزایش فشار تزریق و همچنین میزان شکاف در دسته‌درزه‌ی دوم، عمق نفوذ دوغاب افزایش خواهد یافت. از آنجا که نفوذ دوغاب در درزه‌هایی با تداوم و گسترش بالا به سهولت انجام می‌گیرد، برای

www.SID.ir

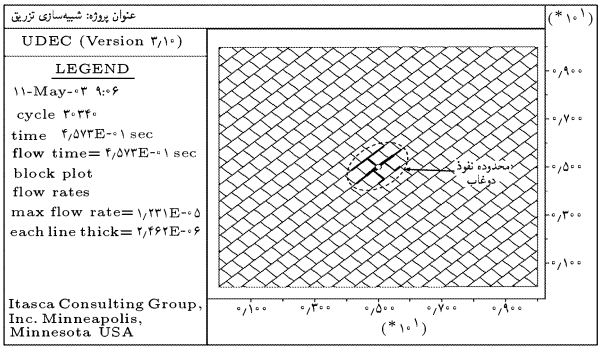
Archive of SID



شکل ۶. تغییرات خورند دوغاب نسبت به زاویه α برای مقادیر متفاوت فشار.

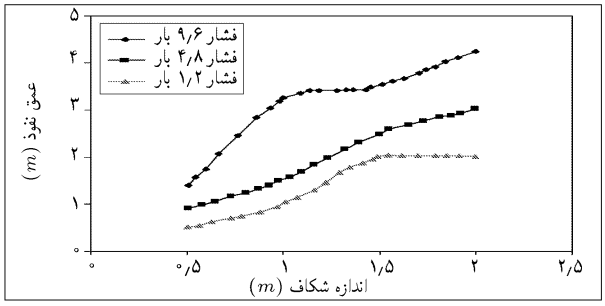


الف) تحت فشار تزریق ۱/۲ بار؛



ب) فشار ۹/۶ بار.

شکل ۷. نتایج تحلیل عددی در محیط با فاصله‌داری ۰/۵ متر همراه با شکافی در حدود ۰/۵ متر.



شکل ۸. تغییرات عمق نفوذ دوغاب بر حسب میزان شکاف موجود در دسته‌درزه‌ی دوم برای مقادیر متفاوت فشار.

درزه‌هایی با تداوم بالا فاصله‌داری و فشار تزریق افزایش می‌یابد.[۱۰] همچنین افت فشار ناشی از تغییر مسیر تزریق از یک درزه به درزه‌ی دیگر نیز باعث کاهش میزان نفوذ دوغاب به داخل درزه‌ها خواهد شد.

۴.۳.۴. تأثیر میزان بازشدگی درزه‌ها در شعاع نفوذ دوغاب

میزان بازشدگی درزه‌ها پارامتر دیگری است که در انتقال دوغاب از میان درزه‌ها نقش مهمی به‌عهده دارد. در طبیعت ممکن است میزان بازشدگی درزه‌ها از یک ناحیه به ناحیه‌ی دیگر، یا از یک دسته‌درزه به دسته‌درزه‌ی دیگر تغییر کند؛ ولی از آنجا که هدف اصلی در این قسمت نشان‌دادن تأثیر بازشدگی درزه‌ها بر فرایند تزریق است، بازشدگی برای تمام درزه‌ها یکسان فرض شده است. در قسمت قبل برای یک درزه‌ی واحد نتایج ذکر شد. فاصله‌داری انتخاب شده برای دو دسته‌درزه ۰/۵ متر است. با انتخاب مقادیر ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر برای بازشدگی کل درزه‌ها نتایج به شرح زیر به دست آمد:

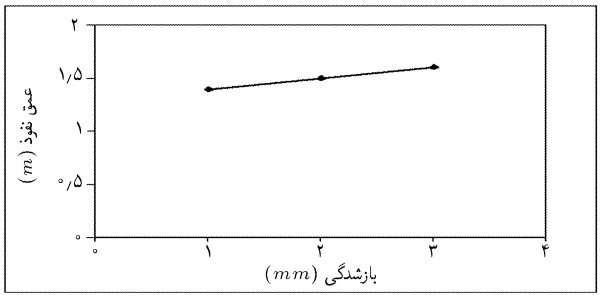
- با افزایش عرض بازشدگی رفته‌رفته شعاع نفوذ دوغاب افزایش می‌یابد، ولی این افزایش چندان زیاد نیست (شکل ۹).
- با تغییر بازشدگی درزه‌ها از ۱ به ۳ میلی‌متر مقدار خورند افزایش می‌یابد و چنان که انتظار می‌رود میزان خورند دوغاب تزریق در درزه‌های عریض‌تر افزایش قابل ملاحظه‌یی نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

۵.۳.۴. تأثیر خواص دوغاب بر فرایند تزریق

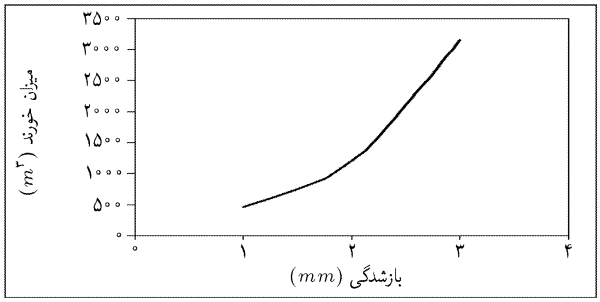
علاوه بر پارامترهای زمین‌شناسی و ساختاری توده‌سنگ، خواص دوغاب نیز به‌عنوان یک متغیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. با انجام عملیات تزریق سعی بر این است که تمام منفذها و درزه‌های داخل محدوده‌ی تزریق به‌سازی شود. میزان پرشدگی درزه‌ها ممکن است از یک ناحیه به ناحیه‌ی دیگر متفاوت باشد. برای این منظور می‌توان از چندین نوع دوغاب استفاده کرد که با پیشرفت کار، گران‌روی دوغاب‌ها به‌تدریج کم می‌شود. اما با توجه به محدودیت‌های شبیه‌سازی عددی در این بخش فقط از یک نوع دوغاب با خواص ثابت استفاده شده است. از بین خواص مختلف دوغاب، گران‌روی و مقاومت برشی اولیه دو پارامتر مهمی هستند که برای بیان رفتار رئولوژیکی و جریان دوغاب به‌کار گرفته می‌شوند. لذا در این قسمت تأثیر مقادیر مختلف هر یک از این پارامترها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور نشان دادن تأثیر خواص دوغاب در نحوه‌ی نفوذ دوغاب مدلی به ابعاد ۱۰×۱۰ متر همراه با یک چال تزریق به‌قطر ۲۰ سانتی‌متر در مرکز مدل در نظر گرفته شده است. مدل ساخته شده شامل دو دسته‌درزه‌ی افقی و قائم با فاصله‌داری ۰/۵ متر بوده و فشار تزریق دوغاب ۴/۸ بار در نظر گرفته شده است. تحلیل عددی برای تغییرات گران‌روی در سه حالت (یعنی ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ پاسکال ثانیه) انجام گرفته است. با افزایش گران‌روی سیال تزریق حجم دوغاب مصرفی کاهش می‌یابد (شکل ۱۱الف). علاوه بر گران‌روی مقادیر متفاوتی برای مقاومت برشی دوغاب در نظر گرفته شد تا تأثیر این پارامتر نیز در نحوه‌ی جریان دوغاب

www.SID.ir

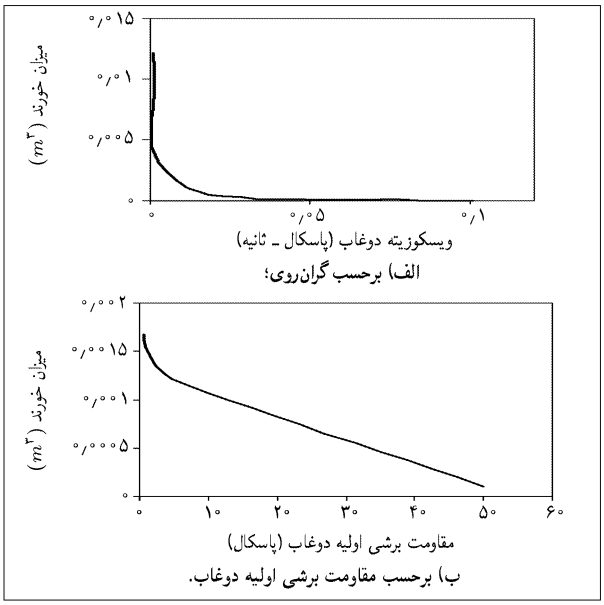
Archive of SID



شکل ۹. تغییرات عمق نفوذ دوغاب برحسب بازشدگی درزه‌ها.



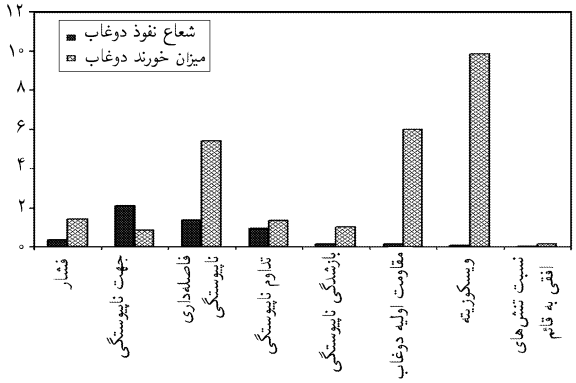
شکل ۱۰. تغییرات خورند دوغاب برحسب بازشدگی درزه‌ها.



شکل ۱۱. تغییرات خورند دوغاب.

نشان داده شود. مقادیر انتخابی برای مقاومت برشی دوغاب به‌ترتیب ۰٫۵، ۵ و ۵۰ پاسکال بوده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مقاومت برشی دوغاب شعاع نفوذ و حجم دوغاب تزریقی روند رو به کاهش دارند (شکل ۱۱ب). با توجه به نتایج حاصل از تحلیل مشخص شد که تأثیر تغییرات گران‌روی سیال در فرایند تزریق به‌مراتب بیشتر از تأثیر مقاومت برشی دوغاب است.

از دلایل مهم و اصلی در تغییر غلظت (گران‌روی) دوغاب‌ها از کم



شکل ۱۲. درجه‌ی حساسیت پارامترهای مؤثر در شعاع نفوذ و خورند دوغاب.

به بیشتر می‌توان قابلیت نفوذ دوغاب در درزه‌ها را ذکر کرد. با تغییر گران‌روی سیال دوغاب از مقدار کم به بیشتر، لزجت سیال رفته‌رفته کم می‌شود. برای سیال با گران‌روی کم لزجت بیشتر بوده و تحت اثر یک فشار مشخص علاوه بر قابلیت نفوذ بیشتر، شعاع نفوذ بیشتری را در درزه و شکاف‌های ریز ایجاد خواهد کرد. برای عکس این حالت، یعنی یک دوغاب با گران‌روی زیاد، قابلیت نفوذ در درزه‌های ریز کم‌تر خواهد شد.

۴.۴. تحلیل حساسیت پارامترهای اصلی تزریق

برای این که مشخص شود تغییر کدام یک از پارامترهای مؤثر در فرایند تزریق نقش به‌سزایی در شعاع نفوذ دوغاب و میزان دوغاب مصرفی دارد، از نتایج بخش‌های قبلی و همچنین روش تعیین درجه‌ی حساسیت استفاده شده است. نتایج درجه‌ی حساسیت هر پارامتر برای هر دو حالت شعاع نفوذ و حجم دوغاب مصرفی در شکل ۱۲ آورده شده است. به‌منظور تعیین درجه‌ی حساسیت هر پارامتر از این رابطه استفاده شده است:[۷]

$$S_k(A_k) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left|\frac{\Delta P_i}{\Delta A_k}\right|\frac{A_k}{P_i}$$

که در آن $S_k(A_k)$ درجه‌ی حساسیت عامل متغیر، A_k پارامتر یا عامل متغیر تحت بررسی، ΔA_k تغییرات نسبی عامل، ΔP تغییرات جواب سیستم به تغییرات عامل، P جواب سیستم و m تعداد عامل‌های مورد نظر هستند.

۵. نتیجه‌گیری

از میان پارامترهای مؤثر بحث شده در قسمت‌های پیشین می‌توان تأثیر هرکدام از این پارامترها را چنین خلاصه کرد:

با تغییر زاویه‌ی بین دسته‌درزه‌ها شاهد تغییرات زیادی در شعاع نفوذ دوغاب خواهیم بود و این نشان می‌دهد که تعیین بهترین جهت‌یابی برای گمانه‌های تزریق نقش مهمی در موفقیت عملیات تزریق از نقطه

www.SID.ir

Archive of SID

نظر شعاع نفوذ نسبت به سایر پارامترها دارند. از بین سایر پارامترهای ذکر شده تأثیر فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها برای رسیدن به تزریق مناسب باید بررسی شود، زیرا دانستن فاصله‌داری و تداوم درزه‌های محدوده‌ی تزریق می‌تواند به‌عنوان یک پارامتر مهم در تعیین فاصله‌ی گمانه‌های تزریق و همچنین تعداد سری‌های گمانه‌های تزریق در نظر گرفته شود. فشار تزریق نیز از اهمیت ویژه‌یی برخوردار است. چنانچه در شکل ۱۲ نیز مشاهده می‌شود تأثیر تغییرات فشار تزریق در میزان نفوذ دوغاب و همچنین در نظر گرفتن شکست هیدرولیکی در فرایند تزریق از اهمیت بالایی برخوردار است. میزان تغییرات سایر پارامترهای تحلیل شده نظیر گران‌روی دوغاب و مقاومت برشی اولیه‌ی دوغاب در میزان شعاع نفوذ دوغاب، تأثیرکم‌تری نسبت به پارامترهای جهت‌داری درزه‌ها، فاصله‌داری و فشار تزریق از خود نشان می‌دهند.

یکی دیگر از پارامترهای مهم در فرایند تزریق انتخاب نسبت آب به سیمان است. میزان تغییرات نسبت آب به سیمان نقش مهمی در تغییرات دوغاب مصرفی دارد. چنانچه در شکل نیز مشاهده می‌شود با تغییر گران‌روی و مقاومت برشی اولیه دوغاب تزریقی شاهد بیشترین حساسیت در میزان دوغاب مصرفی خواهیم بود. لذا با تغییر خواص دوغاب (گران‌روی و مقاومت برشی اولیه دوغاب) می‌توان بیشترین تأثیر را بر فرایند تزریق، به‌ویژه میزان دوغاب مصرفی، مشاهده کرد. دومین پارامتر مؤثر در میزان دوغاب مصرفی تغییرات فاصله‌داری درزه‌ها است. از میان تمام پارامترهای هندسی، فاصله‌داری درزه‌ها تنها پارامتری است که بیشترین تأثیر را بر فرایند تزریق دارد؛ زیرا تغییرات این پارامتر از مقادیر بالایی برای درجه‌ی حساسیت شعاع نفوذ دوغاب و میزان دوغاب مصرفی در بین سایر پارامترها برخوردار است. لذا تعیین فاصله‌داری درزه‌های منطقه‌ی تزریق قبل از انجام تزریق آزمایشی و اصلی مهم‌تر به نظر می‌رسد.

پانوشت

1. universal distinct element code

منابع

1. Sign, P. "A text book of engineering and general geology", 6th Edition, pp. 676-683 (1997).
2. Nonveiller, E. "Grouting in theory and practice", Elsevier (1988).
3. شیخی‌نارانی، مجید؛ «رئولوژی: بررسی خواص، جریان، انتقال حرارت و اختلاط سیالات غیرنیوتنی»، تهران: جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر (۱۳۷۱).
4. Rosquoet, F., Alexis, A. Khelidj, A. Phelipot, A. "Experimental study of cement grout: rheological behavior and sedimentation", *Cement and Concrete Research*, **33**, pp. 713-722 (2003).
5. Hakansson, U., Hassler, L. Hakan, S. "Rheological properties of cement - based grouts, Measuring technique and factor of influence", Grouting in Rock and concrete, pp. 491-501 (1993).
6. Hassler, L., Hakansson, U. Stille, H. "Computer-simulated flow of grouts in jointed rock", *Tunnelling & Underground Space Tech.* **7**(4), pp.441-446 (1992).
7. Yang, M.J., Yue, Z.Q. Lee, P.K.K. Su, B. and Tham, L.G. "Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation", *Canadiana Geotech. Journal*, **39**, pp. 1384-1394 (2002).
8. Zhang, X., Sanderson, D.J. Harkness, R.M. Last, N.C. "Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock Masses", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **33**(1), pp. 17-37 (1996).
9. Shroff, A.V., Shah, D.L. "Grouting technology in tunneling and dam construction", A.A. Balkema, Rotterdam (1999).
10. Houlsby, A. C., "Construction and design of cement grouting", A guide to grouting in rock foundations, John Wiley & Sons, New York (1990).

www.SID.ir