# ارزیابی نقش فشار تزریق در فیلتراسیون دوغاب‌های پایه سیمانی در چند مثال از سنگ‌های نرم

**محمدحسن نظری[1]* و علی ارومیه‌ای[2]**

[1]دانشجوی دکترا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[2]استاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۲۸/ ۰۳/ ۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: ۲۷/ ۰۹/ ۱۳۹۶

## چکیده

عوامل متعددی در فیلتر شدن دوغاب‌های سیمانی نقش دارند که در چند دسته قابل ارزیابی هستند. این عوامل مهم و اساسی شامل خصوصیات رفتاری دوغاب، سیمان و مصالح تزریق، محیط تزریق و اندرکنش دوغاب با آن و فشار تزریق هستند. در بین این عوامل، تحقیقات کمتری در مورد نقش فشار تزریق در فیلتر شدن دوغاب دیده می‌شود. تحقیق نشان می‌دهد که سرعت افزایش فشار تزریق در مقدار جذب سیمان و نفوذ آن تأثیر چشمگیری دارد. در این تحقیق نتایج بررسی داده‌های مقاطع تزریق در سنگ از دو طرح سدسازی مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، دو دیدگاه تزریق با فشار متغیر و ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت فشار متغیر وجود پله‌های افزاینده فشار می‌تواند سبب فرسایش کیک دوغاب در هر مرحله از تشکیل آن و نفوذ بیشتر دوغاب شود. در تزریق با فشار ثابت، فشار در زمان کمی به مقدار حداکثر طرح شده می‌رسد و نتایج نشان می‌دهند نفوذ دوغاب کمتر بوده است. با به کارگیری روش تدریجی افزایش فشار تزریق، نفوذ دوغاب به دلیل فرسایش کیک دوغاب بهبود می‌یابد و هزینه‌های آب‌بندی پی سدها، تونل‌ها و سازه‌هایی که نیاز به تزریق سیمان دارند، به دلیل نفوذ بیشتر، کاهش پیدا می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** فشار تزریق، فیلتراسیون، نفوذ، کیک دوغاب.

***نویسنده مسئول:** محمدحسن نظری
E-mail: mh.nazari@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

سنگ‌های درزه‌دار که تزریق آنها با هدف آب‌بندی و یا تحکیم انجام می‌شود را می‌توان در برابر نفوذ سیمان به ۳ گروه تقسیم‌بندی کرد: الف) سنگ‌هایی دارای نفوذپذیری ناچیز که در نتیجه نیاز به تزریق ندارند و تزریق آنها با تکنولوژی موجود نیز اغلب میسر نیست؛ ب) سنگ‌های دارای نفوذپذیری بالا و درزه‌های کاملاً باز که دوغاب در آنها بخوبی نفوذ می‌کند و تزریق آنها با تکنولوژی معمول و استفاده از سیمان‌های معمولی ممکن است؛ ج) سنگ‌های دارای درزه‌هایی که نه چندان باز هستند که به راحتی دوغاب سیمان در آنها حرکت کند و نه آنچنان بسته هستند که نیاز به آب‌بندی نداشته باشند. این گروه از سنگ‌های درزه‌دار مستعد فیلتر کردن دوغاب سیمان هستند و نفوذ سیمان در آنها با مشکلاتی روبه‌روست. در این سنگ‌ها باید با به کارگیری تمهیدات ویژه تا آنجا که مقدور باشد از فیلتر شدن ذرات سیمان کاست و نفوذ سیمان را بیشتر کرد. عدم موفقیت در تزریق چنین سنگ‌هایی از یک سو سبب افزایش هزینه‌های مربوط به حفاری و تزریق گمانه‌های بیشتر و زمان مرتبط با آنهاست و از طرف دیگر می‌تواند سبب اعمال ریسک‌هایی به طرح به دلیل عدم رفع مشکل تزریق شود. در این مقاله ضمن مرور و بررسی عوامل اثرگذار بر پدیده فیلتر شدن دوغاب سیمان، موضوع اثرات فشار تزریق در این پدیده در مثال‌هایی از سدهای ساخته شده و یا در حال ساخت مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. موضوع عدم نفوذ دوغاب و فیلتر شدن ذرات سیمان در بدو ورود به سیستم ناپیوستگی‌های سنگ، اغلب به‌صورت مترادف به کار می‌رود. به عبارت دیگر فیلتر شدن بیشتر به معنی کاهش نفوذ و افزایش نفوذ به معنای کاهش فیلتر شدن ذرات سیمان در دوغاب‌های پایه سیمانی است.

## ۲- پژوهش‌های پیشین

دوغاب سیمان از نظر رفتاری در مدل سیال‌های بینگهام قرار می‌گیرد و در زمان حرکت با دیواره درزه برخورد دارد و سبب تحولاتی در دوغاب می‌شود. با وجود این Gieskus (1983) بیان می‌کند یک سوسپانسیون رقیق با ذرات کروی شبیه سیال نیوتنی رفتار می‌کند که نفوذ بالاتری دارد. De paoli et al. (1992) بیان می‌کنند که ذرات زاویه‌دار استعداد بیشتری برای تشکیل کیک دوغاب دارند. Syrjälä (1996) عقیده دارد مدل جامعی که رفتار دوغاب را بدرستی بیان کند شناخته نشده است؛ چرا که با گذشت زمان خواص دوغاب تغییر می‌کند. Hanssen (1994) به نقش منفی ذرات درشت سیمان در نفوذ و تشدید فیلتر شدن اشاره کرده است. این در حالیست که Schwarz (1997) با استفاده از آزمایش بر روی جعبه ماسه و تزریق آن نشان داد که نفوذ ذرات ۰/۴ تا ۴ میکرون در طیف دانه‌بندی سیمان ریزدانه کمترین مقدار بوده است و بیشتر کیک دوغاب از این بخش از دانه‌بندی سیمان تشکیل شده است. لذا وجود مقادیر فراوان ذرات ریزدانه سبب کاهش جذب می‌شود. همچنین وی پدیده فیلتراسیون را به دو بخش سطحی و عمقی تقسیم‌بندی کرده است. در تحقیق دیگر Martinet (1998) نشان داه است که علاوه بر ذرات درشت، ذرات خیلی ریز به دلیل پل‌زدگی بر روی هم در محل نفوذ دوغاب، سبب فیلتر شدن و کنترل نفوذ می‌شوند. Eriksson (1999) دو سیمان یکی با d95=12μm و دیگری d95= 30μm را با نسبت‌های مختلف آزمایش کرد و نشان داد که قوس‌زدگی ذرات سیمان و تشکیل کیک فیلتر در سیمان کمی درشت‌دانه‌تر کمتر است. Eriksson et al. (2000) و Eriksson and Stille (2003) مقادیر بازشدگی حداقل (bmin) و بحرانی (bcrit) را معرفی کردند. طبق تحقیق ایشان امکان نفوذ دوغاب در مقادیر بازشدگی کمتر از حداقل وجود ندارد و در بازشدگی بیشتر از مقدار بحرانی دوغاب به خوبی نفوذ می‌کند. حدذفاصل این دو بازشدگی نفوذ دوغاب با مشکلاتی همراه است که دربرگیرنده پدیده فیلتر شدن دوغاب است. Hjertström (2001) نشان داده است که در تزریق یک شکاف ۱۰۰ میکرونی، در فشارهای کم (۲ تا ۵ بار) نفوذ دوغاب نسبت به فشار زیاد (۲۰ بار) محدود بوده و بهتر است دوغاب با فشار بالاتر تزریق شود. همچنین در بین سه سیمان خیلی ریزدانه (d95=12μm) و ریزدانه (d95=30μm) و سیمان معمولی (d95=50μm)، نفوذ سیمان ریزدانه نسبت به دو سیمان دیگر بیشتر بوده است.

بر اساس نظر کمیته فنی تزریق تونل‌ها و شفت‌های آمریکا (AUA, 2003)، زمانی که فشار تزریق با تغییرات اعمال شود، نسبت به زمانی که فشار یکنواخت اعمال شود با موفقیت بیشتری همراه است؛ چرا که اثرات تغییرات فشار سبب شکست کیک فیلتر تشکیل شده می‌شود. Eriksson et al. (2004) نشان دادند که نفوذ دوغاب‌های

رقیق‌تر بیشتر از ترکیبات غلیظ‌تر است. Weaver and Bruce (2007) اصطلاح فیلتراسیون فشاری را برای تشکیل کیک دوغاب در محیط‌های نیمه‌بسته به نقل از De paoli et al. (1992) تشریح کرده‌اند.

Eklund and Stille (2008) بر روی تزریق سیمان‌های با دانه‌بندی متفاوت تحقیق کردند. در این بررسی ابزار آزمایش شامل شکاف و شبکه توری است که به ترتیب معرف سنگ درزه‌دار و محیط متخلخل است. تحقیق آنها نشان داده است که نفوذ دوغاب در شکاف نسبت به حالت شبکه (Mesh) بیشتر است. همچنین ایشان بر تأثیر منحنی دانه‌بندی سیمان، استفاده از فوق روان کننده به عنوان عامل مثبت در نفوذ و نفوذ بیشتر دوغاب‌های رقیق‌تر تأکید کردند. در این تحقیق بخش ریزدانه و درشت‌دانه سیمان مورد استفاده عامل فیلتر شدن دوغاب شناخته شده است. این محققین شرط نفوذ دوغاب سیمان را بزرگ‌تر بودن ۴ تا ۱۰ برابری قطر شکاف نسبت به d95 سیمان‌های با ریزدانگی متفاوت می‌دانند. Nobuto et al. (2008) در تلاشی برای تزریق شکاف ۵۰ میکرون با استفاده از سیمان d95=16µm نقش فشارهای زیاد و کم را ارزیابی کرده و نشان داده‌اند که برای نفوذ بهتر به فشار بالاتر نیاز است. همچنین بر نقش افزایش تدریجی فشار در جلوگیری از انسداد تأکید شده است.

Axelsson (2009) با استفاده از مدل جعبه ماسه نشان دادند که برای نفوذ دوغاب باید قطر ذرات سیمان ۳/۱ قطر شکاف باشد. در تحقیق آنها همچنین نفوذ دوغاب‌های رقیق‌تر بیشتر دیده شده است. Draganovic (2009) و Draganovic and Stille (2011) در تزریق شکاف کوتاه نشان دادند که فشار بیشتر سبب نفوذ بیشتر می‌شود. همچنین بهترین نفوذ دوغاب در تزریق شکاف‌های ۱۰۰ و ۷۵ میکرون متعلق به ریزدانه‌ترین سیمان نیست. Gustafson et al. (2013) جریان دوبعدی در اطراف گمانه را از نظر توزیع دوغاب مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نظر آنها پلاگ سخت از مرکز کانال اصلی جریان تشکیل می‌شود، کم‌کم حواشی را دربرمی‌گیرد و در نهایت به حالت پس‌زنی می‌رسد. Bruce (2013) عقیده دارد که تحت فشار تزریق، دوغاب تزریق شده به ویژه اگر فاقد فوق روان‌کننده باشد دچار تحول می‌شود و ذرات سیمان تمایل به جدایش و خارج شدن از سیال تزریق دارند که به نوعی فیلتراسیون فشاری دوغاب سیمانی محسوب می‌شود.

Draganovic and Stille (2014) در تزریق شکاف طویل، نشان دادند که فشار تزریق در طول شکاف افت کرده است و بیشترین افت آن در محل تنگ‌شدگی‌هاست. نتایج نفوذ دوغاب در این مدل نسبت به تیغه کوتاه کمی بهتر بوده است. با وجود این در تکرار هر آزمایش با همان شرایط یکسان نمودارهای تغییرات فشار تزریق با گذشت زمان شبیه به هم نبوده و هر آزمایش نتایج خاص خود را نشان داده است. Ghafar et al. (2016) در بررسی تزریق دینامیکی با استفاده از فشار گاز و با به کارگیری تزریق نوسانی (Instantaneous pressure) موفق شده‌اند نفوذ بهتری نسبت به کارهای قبلی ایجاد کنند. در این روش تزریق شکاف‌های کمتر از ۷۰ میکرون میسر شده است. اساس این روش، تغییرات فشار تزریق است که منتهی به تغییر سرعت و به دنبال آن نحوه حرکت دوغاب می‌شود که حذف‌کننده پلاگ‌های سیمان است.

همان‌طور که در مرور ادبیات فنی دیده می‌شود، موضوع فیلتر شدن دوغاب چالشی است که همواره و از زوایای گوناگون در کارهای تزریق مطرح شده و مورد تحقیق قرار گرفته است. بیشترین تحقیق و بررسی به روی خصوصیات رفتاری دوغاب متمرکز شده است؛ چرا که این بخش از تحقیق در دسترس‌تر بوده و قابلیت بررسی بیشتری داشته است. مباحث کمی در ارتباط با فشار تزریق طرح و بیان شده است. در یک دسته‌بندی می‌توان عواملی که در فیلتر شدن دوغاب سیمان نقش دارند را در ۴ دسته کلی تقسیم‌بندی کرد که به‌صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در اکثر مطالعات تاکنون انجام شده، موضوع نفوذ دوغاب سیمان و بررسی پدیده فیلتر شدن دوغاب با استفاده از فشار گاز مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر محدودی دوغاب در حد حداکثر چند لیتر در زمان‌های کوتاه از شکاف‌ها یا شبکه‌های پیش‌بینی شده عبور کرده و بر همین مبنا تحلیل‌ها انجام شده است. همچنین چون آزمایش‌های قبلی با فشار گاز انجام می‌شده از همان لحظه شروع آزمایش تا انتهای آزمایش فشار طرح شده مثلاً ۱۰ یا ۱۵ بار اعمال می‌شده است. در حالی که در عمل برای رسیدن به فشار طرح شده بازه زمانی خاصی طی می‌شود که می‌تواند سریع یا کوتاه باشد. اثر این بازه زمانی از مسائل مورد توجه این تحقیق است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

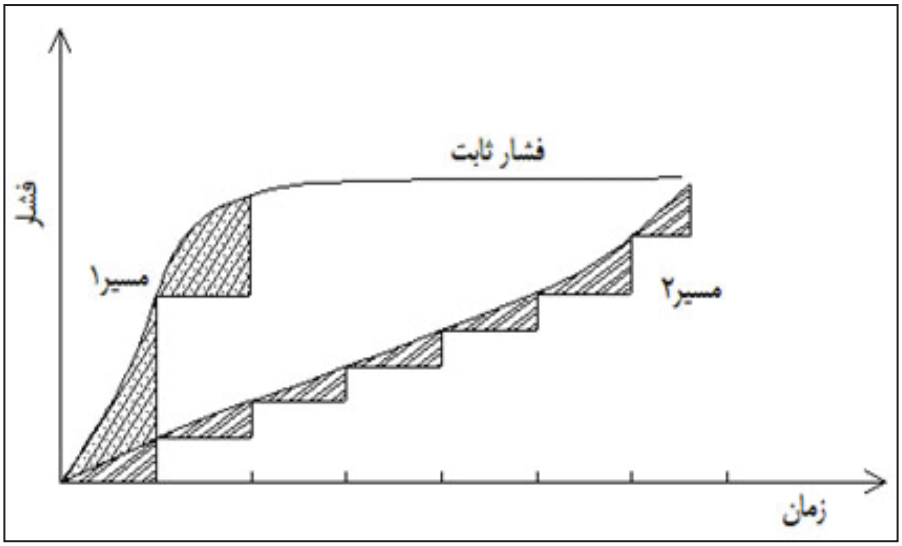
جدول ۱- طبقه‌بندی عوامل اثرگذار بر فیلتراسیون دوغاب‌های پایه سیمانی.

| گروه | عامل اثرگذار | شرح |
|---|---|---|
| الف | سیمان و مصالح | دانه‌بندی، هندسه دانه‌ها، بلین یا نرمی سیمان، عمر سیمان، شرایط انبار کردن |
| ب | خصوصیات رفتاری دوغاب | نسبت آب به سیمان (ویسکوزیته و چسبندگی)، هیدراتاسیون سیمان، افزودنی‌ها، انرژی میکسر و تعداد دورهای میکسر، زمان میکس کردن، حجم میکسر، مسیرهای انتقال دوغاب و نوع میکسر |
| پ | محیط تزریق | نوع محیط که متخلخل یا درزه‌دار باشد. مقدار بازشدگی، پرشدگی‌ها، سطح ناپیوستگی، درصد اتصال سطوح ناپیوستگی و قابلیت تغییر شکل دیواره‌های درز |
| ت | فشار تزریق | عامل ایجاد فشار ( پمپ تزریق، فشار گاز)، نحوه اعمال فشار به‌صورت ثابت یا متغیر. نرخ افزایش فشار |

## ۳- فشار تزریق

عامل به حرکت درآوردن دوغاب، فشار تزریق است. به‌طور کلی توصیه بر این است که فشار تزریق تا آنجا که ممکن باشد بالا انتخاب شود تا بیشترین نفوذ در درزه‌ها به دست آید؛ مشروط بر اینکه سنگ دچار شکست هیدرولیکی نشود. از طرف دیگر خود فشار تزریق سبب تحول دوغاب و جدا شدن ذرات سیمان از آب می‌شود که این مفهوم فیلتر شدن و کاهش نفوذ دوغاب است. در مطالعات پیشین ذیل بند ۲ گفته شد که برای تزریق شکاف‌های باریک‌تر یعنی محیط‌هایی که مستعد فیلتر کردن دوغاب سیمان هستند، اعمال فشار بالاتر سبب نفوذ بیشتر شده است. با وجود این در این تحقیق موضوع نحوه اعمال فشار یا زمان رسیدن به فشار حداکثر طرح شده برای یک مقطع تزریق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برای این منظور دو طرح کلی الف و ب می‌تواند برای فشار در نمودارهای فشار- زمان مد نظر قرار گیرد که به‌صورت نمونه‌وار در شکل ۱ نشان داده شده است. در مسیر ۱ در زمان کمی فشار به حداکثر مقدار خود و در مسیر ۲ با گذشت زمان بیشتر به همان مقدار فشار رسیده است. همین مفهوم در شرایط اجرایی کمابیش دیده می‌شود. مدت زمانی که توده سنگ در مسیر ۱ تحت تأثیر فشار بالاتر قرار می‌گیرد نسبت به مسیر ۲ بیشتر است. با وجود این نتایج بررسی‌های عملی درباره مقدار جذب متناسب با هر مسیر در شرایط مشابه قابل توجه خواهد بود چرا که انتظار جذب بیشتر از مسیر ۱ علیرغم اعمال فشار بالاتر در بازه زمانی بیشتر، برآورده نمی‌شود و بر عکس در مسیر ۲ مقادیر جذب بیشتری مشاهده می‌شود. از آنجا که عدم جذب سیمان در این دسته از سنگ‌ها به

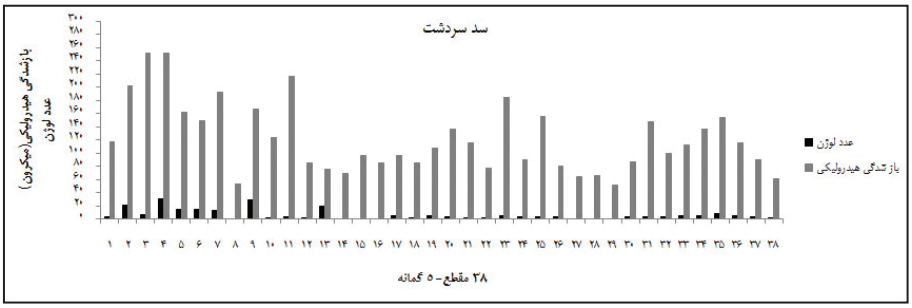
معنای وجود نفوذپذیری پسماند و امکان فرسایش آتی تحت تأثیر گرادیان و انجام نشت است، جذب بالاتر برای این دسته از سنگ‌ها نقش مهمی در آب‌بندی و تأمین پایداری درازمدت سازه‌ها و در فضاهای زیرزمینی، مقابله با فشار آب منفذی خواهد داشت که عامل مهم ناپایداری است.




شکل ۱- نمودار مفهومی نرخ اعمال فشار در دو مسیر متفاوت. رسیدن سریع به فشار حداکثر در مسیر ۱ (فشار ثابت) و تدریجی در مسیر ۲ (فشار متغیر).

## ۴- بررسی نتایج تزریق طرح سد سردشت

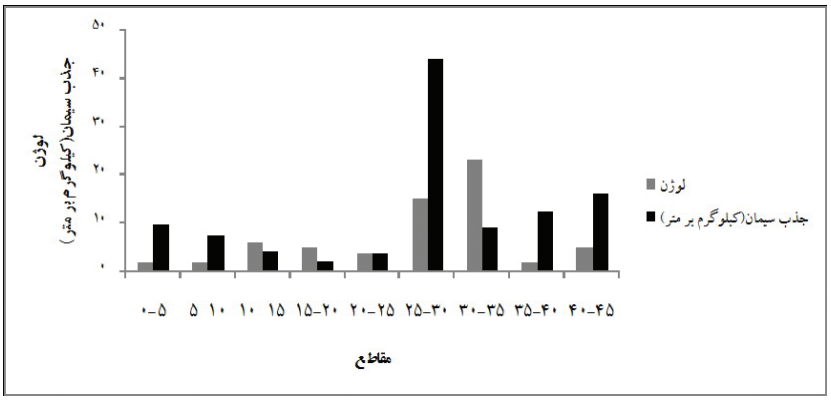
سد خاکی سردشت به ارتفاع ۱۱۳ متر بر روی رودخانه سردشت در آخرین مراحل ساخت است و پرده تزریق آن تکمیل شده است. سنگ‌های ساختگاه بیشتر از فیلیت تشکیل شده‌اند و نفوذپذیری آنها اغلب کمتر از ۲۰ لوژن است. بر اساس بررسی‌های انجام شده با استفاده از قانون مکعب بر روی درزه‌های ساختگاه در چند گمانه اکتشافی و نتایج جذب آب در آزمایش‌های لوژن، مقادیر بازشدگی هیدرولیکی اغلب کمتر از ۲۰۰ میکرون برآورد شده است. در شکل ۲ مقادیر بازشدگی هیدرولیکی و عدد لوژن مورد بررسی برای ۳۸ مقطع از ۵ گمانه نشان داده شده است. مطابق روال کارهای اجرایی بخشی از اولین گمانه‌های پرده تزریق با مغزه‌گیری و انجام آزمایش لوژن همراه است که در اینجا چند مقطع تزریق این سری گمانه‌ها که اطلاعات کامل‌تری دارند مورد بررسی قرار می‌گیرد.



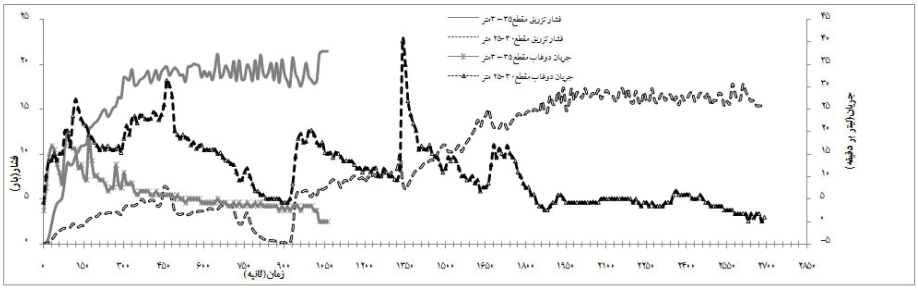

شکل ۲- بازشدگی هیدرولیکی و عدد لوژن مورد بررسی در ۳۸ مقطع از ۵ گمانه مورد بررسی سد سردشت.

در شکل ۳ نتایج جذب سیمان و عدد لوژن گمانه S2 به عمق ارائه و مقایسه شده است. دو مقطع ۲۵- ۳۰ و ۳۰- ۳۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار زمان- فشار-جذب دوغاب این دو مقطع نیز در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، در مقطع ۲۵- ۳۰ متر، علی‌رغم وجود لوژن کمتر نسبت به مقطع ۳۰- ۳۵ متر، جذب سیمان بیشتر اتفاق افتاده است. تزریق هر دو مقطع با دوغاب w:c:2:1 و افزودن فوق روان‌کننده انجام شده است.

با مقایسه نمودارهای شکل ۴، نحوه اعمال فشار تزریق این دو مقطع به عنوان نمونه قابل مقایسه است. در مقطع ۲۵- ۳۰ متر فشار به آرامی و تدریجی در حال افزایش است و پس از حدود ۲۰۳۰ ثانیه به بیشترین مقدار خود یعنی ۱۷/۳ بار رسیده است؛ در حالی که در مقطع ۳۰- ۳۵ متر فشار به سرعت افزایش داشته و پس از حدود ۳۵۰ ثانیه به ۱۹/۵ بار و در نهایت ۲۰ بار رسیده است. بنابراین مقطع ۳۰- ۳۵ متر مدت زمان بیشتری تحت تأثیر فشار بالاتر قرار داشته در حالی که جذب سیمان کمتر شده است. این اثر به غیر از بحث فشار تزریق می‌تواند به دلیل سیستم ناپیوستگی‌های مقطع در دست تزریق نیز باشد. به عنوان مثال مقطع ۳۰- ۳۵ علیرغم داشتن لوژن بالاتر، عدد آن می‌تواند مربوط به چند درزه نسبتاً بسته و لوژن پایین‌تر مقطع ۲۵- ۳۰ مربوط به تک‌درز نسبتاً باز باشد که بدیهی است نتیجه تزریق تک‌درزه باز بهتر خواهد بود. بدین منظور در جدول ۲ خصوصیات دو مقطع از نظر ویژگی‌های تزریق، درزه‌ها و عدد لوژن و نیز فشار تزریق مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، تعداد درزه‌های نسبتاً باز مقطع ۳۰- ۳۵ متر بیشتر از مقطع ۲۵- ۳۰ متر است. بنابراین عامل اثرگذار، فشار تزریق و سرعت افزایش آن است. این اثر در نهایت بر جذب سیمان تأثیر داشته و جذب ۴۴ کیلوگرم بر متر در مقطع ۲۵- ۳۰ متر در برابر ۹/۲ کیلوگرم بر متر مقطع ۳۰- ۳۵ متر به دست آمده است.




شکل ۳- نمودار مقایسه عدد لوژن و جذب سیمان به عمق گمانه S2.



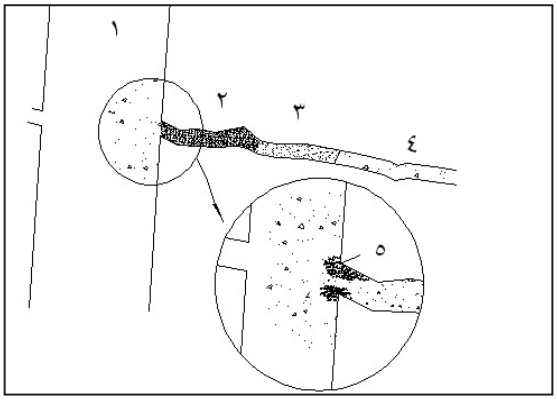

شکل ۴- نمودار زمان- فشار- جذب دوغاب مقاطع ۲۵- ۳۰ و ۳۰- ۳۵ مترگمانه S2. فشار تزریق متغیر و ثابت به ترتیب در این مقاطع اعمال شده است.

جدول ۲- مشخصات دو مقطع مورد مقایسه گمانه S2 تکیه‌گاه راست طرح سد سردشت.

| ویژگی / مقطع | تعداد درزه در مقطع ۵ متر | عدد لوژن | جذب سیمان (کیلوگرم بر متر) | حداکثر فشار تزریق (بار) | حداکثرفشار در ۵ دقیقه اول (بار) | حداکثر فشار در ۱۰ دقیقه اول (بار) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۵- ۳۰ | ۳ درزه نسبتاً باز<br>۱ درزه نسبتاً بسته | ۱۵ | ۹/۲ | ۱۷/۳ | ۴ | ۶/۴ |
| ۳۰- ۳۵ | ۵ درزه نسبتاً باز<br>۱ درزه پر شده<br>۱ درزه بسته | ۲۳ | ۴۴ | ۲۱/۲ | ۱۷ | ۲۰/۱ |

## ۵- تحلیل سازوکارهای دخیل در فیلتراسیون دوغاب

چندین سازوکار برای فیلتر شدن ذرات سیمان وجود دارد که هر یک در جای خود اثر می‌گذارند. فیلتر شدن دوغاب می‌تواند به‌صورت سطحی و یا عمقی انجام شود. فیلتراسیون سطحی در بدو ورود دوغاب به درون شکاف گمانه رخ می‌دهد و ذرات خیلی درشت سیمان می‌توانند مانع از ورود دیگر ذرات شوند و نقطه اتکایی برای تجمع ذرات ریز در اطراف خود پدید آورند. در همین راستا ذرات خیلی ریز مشارکت کننده در منحنی دانه‌بندی سیمان نیز می‌توانند بر روی همدیگر پل بزنند و از طریق ارتباط با همدیگر به بستن فضای عبور کمک کنند (شکل ۵). در فیلتراسیون فشاری دوغاب سیمان، نقش فشار تزریق می‌تواند به‌صورت مثبت یا منفی باشد. در مجموع، اعمال فشار در زمان محدود به دوغابی که در نظر است وارد فضاهای نسبتاً باریک شود، سبب ایجاد یک فیلم نازک از دوغاب بر جدار گمانه در محل درزه‌ها می‌شود که بخشی از آب خود را به درون درزه تخلیه می‌کند و ویسکوزیته دوغاب در پیشانی تزریق به شدت افزایش می‌یابد. این اثر در نهایت سازوکار تشکیل کیک دوغاب را تقویت می‌کند و سبب فیلتر شدن دوغاب می‌شود. در طول گمانه نیز این تفکیک به‌صورت فیلتراسیون عمقی انجام می‌شود؛ نظیر آنچه در شکل ۴ دیده می‌شود.

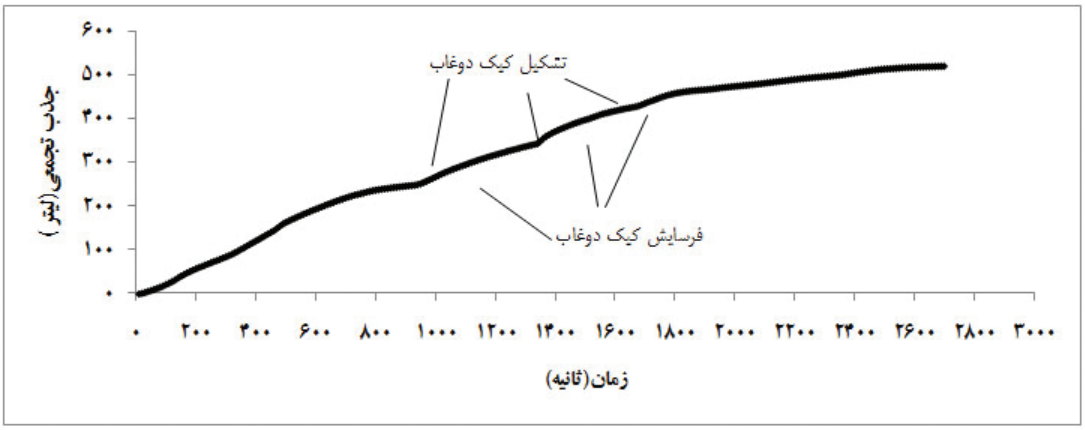



شکل ۵- فیلتر شدن سطحی در جدار گمانه و عمقی در طول گمانه: ۱) ساقه گمانه؛ ۲) دوغاب غلیظ؛ ۳) دوغاب رقیق؛ ۴) دوغاب کاملاً رقیق؛ ۵) کیک دوغاب.

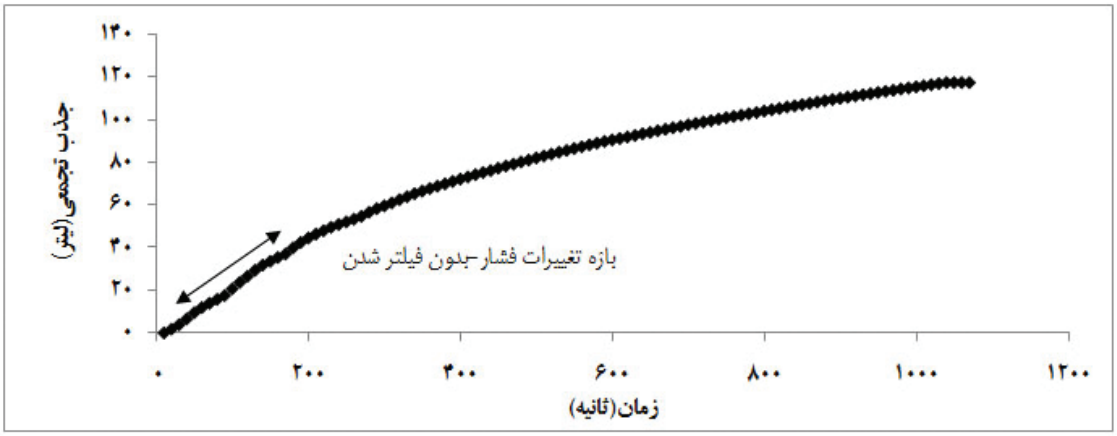
در اعمال فشار تزریق تدریجی تعداد مناسبی پله فشار با شیب کم قابل تعریف است. در حالی که با افزایش سریع فشار تا رسیدن به فشار طراحی شده برای هر مقطع یک یا دو پله فشار با اختلاف زیاد پدید می‌آید و در ادامه منحنی فشار به‌صورت افقی در می‌آید و تغییرات آن صفر می‌شود. در حالت تدریجی به تعداد کافی پله افزایش فشار وجود دارد که می‌توانند پلاگ تشکیل شده در هر مرحله را که از ضخامت کمتری برخوردار است دچار فرسایش کنند و سبب باز شدن مسیر دوغاب شوند. در شکل ۱ مفهوم پله‌های متغیر، متعدد و افزایشی فشار در برابر یک یا چند پله قابل تعریف در زمان محدود مقایسه شده است. از طرف دیگر اعمال تدریجی فشار سبب می‌شود که ذرات سیمان فرصت کافی برای عبور از ترک محدود را داشته باشند و به عبارت دیگر غلظت ذرات سیمان در هر مرحله کمتر و امکان تشکیل کیک فیلتر در اثر برخورد ذرات به همدیگر نیز کمتر خواهد بود؛ چرا که یکی از دلایل تشکیل کیک فیلتر، افزایش غلظت ذرات سیمان است.

برای بررسی اثر فیلتراسیون دوغاب می‌توان منحنی‌های تجمعی جذب دوغاب در برابر زمان را ترسیم کرد و از این طریق به تفسیر پدیده‌های فیلتراسیون و فرسایش مورد اشاره پرداخت. این پدیده‌ها در مقاطع عملی تزریق بسته به فیلتر شدن یا نشدن و نیز شدت فیلتر شدن و یا فرسایش پلاگ، در نمودارهای جذب تجمعی سیمان گاه به روشنی و گاه با وضوح کمتر قابل بررسی و مشاهده هستند. در شکل‌های ۶ و ۷ نمودار تجمعی مقاطع ۲۵- ۳۰ و ۳۰- ۳۵ گمانه S2 نشان داده شده است. تحدب و تقعرهای پیوسته‌ای در شکل۶ دیده می‌شود که به ترتیب معرف تشکیل و فرسایش کیک دوغاب تحت تأثیر فشار تزریق است.

در شکل ۷ نیز در بازه زمانی ۳۴۰ ثانیه که به نوعی تغییرات فشار وجود داشته است، منحنی جذب تجمعی حالت خطی (بدون فیلتر شدن) نشان می‌دهد. در ادامه حالت منحنی شکل گرفته متناسب با بخشی از منحنی فشار است که به‌صورت افقی درآمده است.




شکل ۶- منحنی تجمعی جذب دوغاب مقطع ۲۵- ۳۰ متر گمانه S2. تشکیل و فرسایش کیک دوغاب در این نمودار قابل مشاهده است.




شکل ۷- منحنی تجمعی جذب دوغاب مقطع ۳۰- ۳۵ متر گمانه S2. تشکیل کیک دوغاب پس از حذف تغییرات فشار با منحنی شدن جذب تجمعی قابل مشاهده است.

اکنون که نقش داشتن پله‌های فشار در افزایش جذب سیمان مشخص شده است می‌توان به مقایسه اثر مقدار یا ارتفاع این پله‌ها پرداخت. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود پله‌های فشار تا رسیدن به فشار طراحی شده بر مبنای فواصل زمانی ثابت ترسیم شده است. به دلیل شیب زیاد مسیر ۱ یعنی حالتی که فشار سریع افزایش پیدا کرده است، اختلاف ذکر شده بین فشار ابتدا و انتهای هر پله زیاد و در مسیر ۲ این اختلاف محدودتر است. اکنون می‌توان تأثیر اختلاف ذکر شده را در منحنی‌ها مورد بررسی قرار داد. به عبارت دیگر در ۳۴۰ ثانیه اول تزریق مسیر ۱ که تغییرات فشار وجود دارد، با زمان مشابه برای مسیر ۲ ارزیابی و مقایسه انجام شود. نتایج این بررسی در جدول ۳ درج شده است. همان‌طور که دیده می‌شود جذب باز هم در مسیر ۱ کمتر از مسیر ۲ است و به نظر می‌رسد که ایجاد اختلاف فشارهای زیاد در اعمال فشار، خود عامل فیلتراسیون فشاری دوغاب است. به عبارت دیگر بهتر است افزایش پله‌های فشار بهینه باشد.

جدول ۳- مقایسه مقدار جذب و فشار دو مقطع ۲۵- ۳۰ و ۳۰- ۳۵ متر گمانه S2 در بازه زمانی که هر دو دارای تغییرات فشار هستند.

| ویژگی / مقطع | زمان (ثانیه) | فشار (بار) | جذب تجمعی (لیتر) |
|---|---|---|---|
| ۲۵- ۳۰ | ۳۴۰ | ۴/۳ | ۹۷/۳ |
| ۳۰- ۳۵ | ۳۴۰ | ۱۹/۵ | ۶۵ |

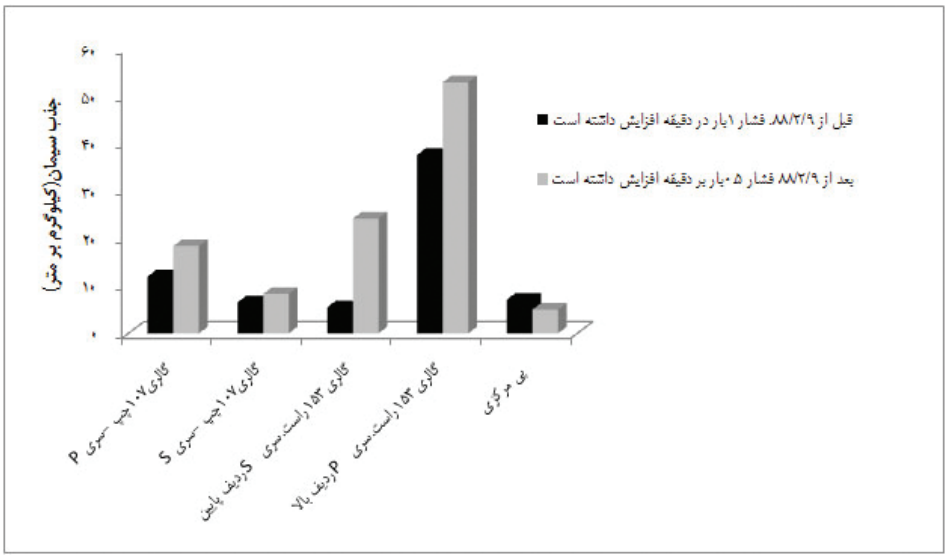
هر چند بیشتر تغییرات در روند رسیدن به فشار طراحی افزایشی هستند، ولیکن در کاهش فشار و افزایش پس از آن نیز اثرات مثبت نفوذ دوغاب دیده می‌شود. در شکل ۳، در بازه زمانی ۸۹۰ تا ۹۳۰ ثانیه یک افت و افزایش فشار تزریق رخ داده است. این نقطه متناظر با نقطه فرسایشی کیک دوغاب شکل گرفته در همین بازه زمانی است که در شکل ۶ نشان داده شده است.

مقاطع متعددی از سدهای مختلف که مستعد فیلتر شدن فشاری هستند نظیر بررسی‌های انجام شده در این نوشتار، امکان بررسی دارند. موضوع نفوذ می‌تواند به‌صورت نسبی بین مقاطع مطرح شود و شدت فیلتر شدن می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین این شدت و ضعف می‌تواند در بررسی نمودارهای تجمعی دیده شود. با توجه به شرح ذکر شده نیاز است مقاطع بسیار بیشتری از این نظر مورد بررسی قرار گیرند تا در یک جامعه آماری مناسب همه مسائل دخیل امکان پوشش داشته باشند که این مهم با بررسی جذب هزار مقطع تزریق در سد گتوند کنترل شده است. این پدیده در خلال کارهای اجرایی سد گتوند علیا در چندین جبهه کاری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

## ۶- سد و نیروگاه گتوند علیا

سد و نیروگاه گتوند علیا به عنوان آخرین سد بر روی رودخانه کارون ساخته شده است. این سد به ارتفاع ۱۸۲ متر و از نوع خاکی با هسته رسی است. نفوذپذیری بخش‌های زیادی از آن کمتر از ۲۰ لوژن است. در بخش‌های دیگری از سنگ پی، خردشدگی شدید سنگ باعث شده است تا پرده تزریق جوابگو نباشد و بنابراین به جای آن دیوار آب‌بند اجرا شده است.

موضوع نحوه اعمال فشار در ۳ جبهه کاری و ۵ سری گمانه مشابه مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۸ مقایسه دو هفته کاری تزریق با نرخ افزایش فشار ۰/۵ بار بر دقیقه با نرخ افزایش ۱ بار بر دقیقه و بیشتر انجام شده است.




شکل ۸- تغییرات فشار در ۳ جبهه کاری و ۵ سری گمانه‌های سد گتوند. مقایسه نتایج جذب دوهفتگی(مجموع۴ هفته) با دو نرخ اعمال فشار در سری گمانه‌های مشابه.

بدیهی است در نرخ افزایش فشار ۱ بار بر دقیقه مقطع سریع‌تر به فشار طرح شده می‌رسد و در نهایت به‌صورت فشار ثابت تزریق می‌شود. به جز در یک جبهه کاری آن هم با اختلاف ناچیز، در دیگر جبهه‌های کاری مقادیر جذب سیمان با کنترل زمان رسیدن به فشار حداکثر، افزایش پیدا کرده است. به دلیل دربر گرفتن تکیه‌گاه‌های چپ و راست و پی مرکزی سد گتوند که هر یک شرایط زمین‌شناسی متفاوتی دارند، بررسی انجام شده از اهمیت آماری و تنوع زمین‌شناسی متفاوتی برخوردار است. گفتنی است در پی مرکزی سد گتوند، سازند آغاجاری شامل فورش‌سنگ، گلسنگ و ماسه‌سنگ است. در تکیه‌گاه چپ، سازند کنگلومرایی بختیاری با میان‌لایه‌های گلسنگی با درزه‌شدگی محدود ظاهر شده است و محیط متخلخل نسبت به درزه‌ای غلبه دارد و در تکیه‌گاه راست کنگلومرای بختیاری درزه‌دار وجود دارد.

## ۷–نتیجه‌گیری

فیلتراسیون دوغاب‌های پایه سیمانی تابع عوامل متعددی هستند که در ۴ دسته کلی خصوصیات رفتاری دوغاب، محیط تزریق، فشار تزریق و سیمان و مصالح قابل تقسیم‌بندی هستند. در این بین گسترده‌ترین عوامل را خصوصیات رفتاری دوغاب کنترل می‌کند. کمترین بررسی‌ها و تفسیرها در مورد نقش فشار تزریق بوده است و این مقاله سرآغاز انجام تحلیل‌های بیشتر و دیدگاه‌های جدید محسوب می‌شود.

در بررسی فیلتراسیون فشاری دوغاب‌های پایه سیمانی نقش تغییرات فشار در نفوذ دوغاب و جلوگیری از فیلتر شدن دوغاب، مثبت ارزیابی می‌شود. بدین مفهوم که برای رسیدن به فشار تزریق نهایی باید بازه زمانی بیشتری طی شود و این یعنی داشتن پله‌ها یا تغییرات فشار. در حالی که در دیدگاه دیگر می‌توان مقطع تزریق را با سرعت بیشتری به فشار طراحی رساند که در این حالت نتایج بررسی نشان از نفوذ و جذب کمتر دوغاب سیمان دارد.

تغییرات فشار هم می‌تواند افزاینده و هم کاهنده باشد. نتایج بررسی‌ها حکایت از تأثیر مثبت هر دو تغییر در شکستن کیک دوغاب در هر مرحله از تزریق دارد.

از آنجا که در عمل دو مقطع تزریق ۱۰۰ درصد شبیه هم برای مقایسه وجود ندارد، تلاش شده است ضمن بررسی مقاطع شبیه به هم، تعداد فراوانی مقطع تزریق (۱۰۰۰ مقطع) مورد بررسی قرار گیرند که این موضوع پوشش‌دهنده همه موارد باشد. نتایج حاکی از اثر مثبت افزایش تدریجی فشار در مقایسه با افزایش سریع آن در یک جامعه آماری قابل توجه است.

در افزایش تدریجی فشار تزریق، غلظت ذرات سیمان در مقطع عبوری کمتر می‌شود و شانس فیلتر شدن کاهش می‌یابد. در این حالت ذرات، زمان مناسب‌تری برای عبور از خلال ترک‌های سنگ خواهند داشت.

با روش اعمال فشار تدریجی که در این مقاله به آن پرداخته شده است در عمل تکنولوژی تزریق بهبود شایانی پیدا می‌کند و بسیاری از مقاطع که قبلاً با دوغاب سیمان تزریق‌ناپذیر معرفی شده‌اند، امکان تزریق خواهند داشت.

**References**

AUA (American Underground Construction Association), 2003- AUA Guidelines for Backfilling and Contact Grouting of Tunnels and Shafts. Edited by R.W.Henn. Prepared by the Technical Committee on Backfilling and grouting of tunnels and Shafts. Published Jointly by ASCE press, Reston, va. and Thomas Telford. London.

Axelsson, M., 2009- Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock. Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Division of GeoEngineering, Göteborg.

Bruce, D. A., 2013- Specialty Construction Techniques for Dam and Levee Remediation.CRC press.

De Paoli, B., Bosco, B., Granata, R. and Bruce, D. A., 1992- Fundemental Observations on Cement Based Grouts(B): Microfine Cements and the Cemill Process. In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Edited by R.H.Borden, R.O.Holtz., and I.Juran, ASCE, New York, Geotechnical Special Publication No.30, 486-499.

Draganovic, A. and Stille, H., 2011- Filtration and penetrability of Cement Based Grout: Study Performed With a Short Slot. Tunneling and Underground Space Technology , 26,548-559.

Draganovic, A. and Stille, H., 2014- Filtration of Cement Based Grouts Measured using a long Slot. . Tunneling and Underground Space Technology , 43,101-112.

Draganovic, A., 2009- Bleeding and Filtration of Cement Based Grout. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology( KTH) University. Division of Soil and Rock Mechanics.

Eklund, D. and Stille, H., 2008- Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts. Tunnelling and Undreground Space Technology , 23 (4),389-398.

Eriksson, M. and Stille, H., 2003- A Method for Measuring and Evaluating the Penetrability of Grouts. Proc. 3th International Conference, Grouting and Ground Treatment, Geotechnical Special Publication No. 120 (pp 1326-1337). New Orleans.

Eriksson, M., 1999- Model for Prediction of Grouting Results – Spreading Sealing Efficiency and Inflow. Licentiate Thesis 2046, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Eriksson, M., Friedrich, M. and Vorschulze, C. 2004- Variation in the Rheology and Penetrability of Cement-based Grouts - An Experimental Study. Cement and Concrete Research , 34 (7), 1111-1119.

Eriksson, M., Stille, H. and Andersson, J., 2000- Numerical Calculations for Prediction of Grout Spread with Account for Filtration and Varying Aperture, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 15, No. 4, pp 353-364.

Ghafar, A. N., Mentesidis, A., Draganovic, A. and Larsson, S., 2016- An Expremental Approach to the Development of Dynami Pressure to Improve Grout Spread. Rock Mechanics Rock Engineering.

Giesekus, H., 1983- Disperse Systems: Dependency of Rheological Properties on the Type of Flow with Implications for Food Rheology. In Physical Properties of Foods, Ed. Jowitt,R., Escher, F., Hallstrom, B., Meffert, H.F.T, Spies, W.E.L and Vos, G., London, AppliedScience Publisher, pp. 205-220.

Gustafson, G., Claesson, J. and Fransson, Å., 2013- Steering Parameters for Rock Grouting".Journal of Applied Mathematics, vol. 2013 pp. article ID 269594.

Hansson, P., 1994- Cementinjektering - Handbok i materialteknik för injekterare. Elforsk Rapport 94:12, Elforsk AB, Stockholm.

Hjertström, S., 2001- Microcement- Penetration versus particle size and time control. 4th nordic rock grouting symposium (pp. 61-71). Stockholm: SveBeFo Report 55.

Martinet, P., 1998- Flow and Clogging Mechanisms in Porous Media with Applications to Dams. Doctoral Thesis, Division of Hydraulic Engineering, Dep. of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Nobuto, J., Nishigaki, M., Mikake, S., Kobayashi, S. and Sato, T., 2008- Study on filtration property of grouting materials; High-pressure filtration test. Doboku Gakkai Ronbunshuu C ,64 (4), 813-832.

Schwarz, L. G., 1997- Roles of Rheology and Chemical Filtration on Injectability of Microfine Cement Grouts, Dissertation Thesis, North western University, Evanstone, Illinois, UMI number 9814310.

Syrjälä S., 1996- Numerical Study of Heat Transfer Behaviour of Power-law Non- Newtonian Fluids in Rectangular Channels. Dissertation Thesis, Technical Research Centre of Finland, VTT Chemical Technology, Espoo, Finland. ISBN 951-38-4950-3

Weaver, K. D. and Bruce, D. A., 2007- Dam Foundation grouting, p472,ASCE press.

# Evaluation of the role of grouting pressure in filtration of cement based grouts in some examples of soft rocks

**M. H. Nazari[1*] and A. Uromeiea[2]**

[1]Ph.D. Student, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[2]Professor, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2017 June 18 Accepted: 2017 December 18

**Abstract**

There are several outstanding factors engaged in the cement grouts filtration. These factors can be evaluated from some aspects including the characteristics of the grout, cement and grouting materials, grouting environment, interaction between the grout and environment and grouting pressure among which fewer studies have been performed on the role of the grouting pressure in the grout filtration. In this research practical results of cement grouting have been reviewed in two dam projects as examples. The results depict that the increase in the grouting pressure considerably affects the rate of cement take and penetration. In practice, the cement penetration rate into the rock is higher when the grouting pressure is variable. This is vice versa under constant grouting pressure. In other words, the increasing steps of grouting pressure may erode the grout cake at each stage. This leads to optimal penetration of the grout and decreases the watertightening costs of the dam foundation, tunnels and structures requiring cement grouting.

**Keywords:** Grouting pressure, Filtration, Penetration, Filter cake

For Persian Version see pages 89 to 96

*Corresponding author: M. H. Nazari; E-mail: mh.nazari@modares.ac.ir



Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional