

## استفاده از تزریق شیمیایی برای آب‌بندی قسمتی از پی سد کرخه

محمد حیدرزاده (دانشجوی دکتری)

علی اصغر میرقاسمی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

سید منصور اعتمادزاده (کارشناس)

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

در پاسخ به لزوم افزایش مقاومت و کنترل جریان آب در خاک‌هایی که ریز بودن بیش از حد منافذشان مانع از نفوذ مواد تزریقی سیمان پرتلند است، از مواد شیمیایی برای تزریق خاک استفاده می‌شود. با توجه به تجربه‌ی موفقیت‌آمیز استفاده از تزریق شیمیایی در کنترل زه در ۵۰ سال اخیر، و پس از بررسی‌ها و مطالعات گوناگون، برای اولین بار در کشور روش تزریق شیمیایی برای آب‌بندی قسمتی از پی جوش‌سنگی (کلوخه‌یی) سد کرخه در ناحیه‌ی موسوم به گالری ۹۵° (با توجه به عدم امکان احداث دیوار آب‌بند در محل مذکور و نیز عدم موفقیت کامل پرده‌ی تزریق سیمانی اجرا شده در جلوگیری از نشت) مورد توجه قرار گرفت. به‌منظور دست‌یابی به بعضی از اهداف اولیه، تزریق شیمیایی آزمایشی در دو نوبت انجام شد. نوبت اول که در نیمه‌ی اول آبان ۱۳۸۲ به اتمام رسید، گمانه‌های مثلی به فواصل ۱/۵ متر و عمق تقریبی ۵ متر را شامل می‌شد که در ترانشه‌ی در نزدیکی گالری ۹۵° حفاری شده بودند. در نوبت دوم تزریق شیمیایی آزمایشی که تا اواخر اسفند ۱۳۸۲ به طول انجامید، از گمانه‌های خطی به فواصل تقریبی ۱/۸ متر و عمق تقریبی ۶۰ متر استفاده شد که شرایط موجود در این نوبت تا حد زیادی مشابه تزریق اصلی شیمیایی است. تزریق‌های آزمایشی انجام شده در سد کرخه، ضمن به اثبات رساندن کارایی روش اتخاذ شده در کنترل زه، نتایج و تجربیات گران بها و منحصر به فردی را به همراه داشت که مهم‌ترین آنها را می‌توان سازمان و روش اجرا، انتخاب مصالح و مواد مورد نیاز، مشخص شدن مشکلات اجرایی، طرح‌های اختلاط مناسب و نیز سیستم‌های تهیه، تحویل و تزریق مواد شیمیایی برشمرد. به‌عبارت دیگر، با تجربه‌ی تزریق شیمیایی آزمایشی در سد کرخه گام بلندی در راستای بومی کردن فناوری تزریق شیمیایی در کشور برداشته شد. در این نوشتار ضمن معرفی مختصر تزریق شیمیایی، نتایج و تجربیات حاصله از تزریق‌های آزمایشی در سد کرخه مورد بحث قرار می‌گیرد.

### مقدمه

را برای افزایش مقاومت باربری پی‌های ماسه‌یی پیشنهاد کرد. به‌لحاظ تاریخی، تا سال ۱۹۲۵ تنها ماده‌ی تزریقی معمول تقریباً فقط سیمان پرتلند خالص بود<sup>[۱]</sup>، اما در بعضی موارد سیمان به‌تهایی قادر به حل تمامی مشکلات نشت از پی سد نیست. مشکل زمانی بروز کرد که در تزریق خاک‌های شنی و دانه‌یی، ذرات درشت موجود در ماده‌ی تزریقی، مجاری ریزترین دانه‌ها را سد کرده و برد تزریق را محدود می‌سازد. در نتیجه ملات تزریق بدون استفاده هدر می‌رفت.

برای رفع این مشکل، در سال ۱۹۲۵ برای اولین بار روش استفاده از مواد شیمیایی در تزریق خاکی ابداع شد.<sup>[۱]</sup> این روش مبتنی بر تزریق پی‌درپی محلول‌های سیلیکات سدیم و یک محلول نمک به نام کلرید کلسیم بود. بدین ترتیب که ابتدا محلول سیلیکات سدیم از طریق یک لوله‌ی مشبک تزریق می‌شد و سپس محلول نمک، که از مخلوط شدن آن با سیلیکات سدیم ژل سیلیکا تولید می‌شد، تزریق می‌شد. با استفاده از این مواد در تزریق، از بلوکه شدن یا انسداد مسیر جریان ملات، ممانعت به عمل می‌آمد.

اگر چه مواد تزریقی شیمیایی ممکن است از مواد تزریقی معمولی

امروزه شیوه‌ی تزریق در بسیاری از پروژه‌ها و با اهداف متنوع مورد استفاده قرار گرفته است که پاره‌یی از این اهداف را می‌توان مستحکم کردن زمین، کاستن از تأثیر ارتعاش در خاک، و کاهش نشست خاک بر اثر اعمال بارهای دینامیک و استاتیک، و نظیر آن ذکر کرد. در سدسازی نیز این شیوه به‌منظور جلوگیری از حرکت آب مورد استفاده قرار گرفته است. «تزریق» فرایندی است که طی آن ماده‌ی تزریقی به خلل و فرج یا شکاف و حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی تزریق می‌شود و به بهبود مشخصات سیستم می‌انجامد، به‌طوری که نفوذپذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و تغییر شکل‌پذیری سیستم کم می‌شود.<sup>[۱]</sup>

اولین مطالعات مربوط به مواد تزریقی شیمیایی در حدود سال ۱۹۰۰ شروع شد، ولی از دهه‌ی ۱۹۵۰ به بعد، استفاده از این مواد در مقاوم‌سازی و آب‌بندی سازه‌های زیرزمینی و پی سدها معمول شده است. نخستین محقق که در خصوص این مواد به مطالعه پرداخت<sup>[۲]</sup>، در سال ۱۹۱۴ استفاده از سیلیکات سدیم با یک ماده‌ی فعال‌کننده

تزریق شیمیایی آزمایشی در سد کرخه، گام بلندی در راستای بومی کردن فناوری تزریق شیمیایی در کشور برداشته شد. به لحاظ اهمیت موضوع، و چون تجربه‌ی کرخه اولین تجربه‌ی عملی تزریق شیمیایی در کشور است و نیز با توجه به لزوم آشنایی جامعه‌ی مهندسی و شرکت‌های دست‌اندرکار پروژه‌های تزریق با مقوله‌ی تزریق شیمیایی، کوشیده‌ایم تا با ارائه‌ی تجربیات حاصل از تماس مستقیم خود در تزریق شیمیایی سد کرخه به آنان، در رفع مشکلات ناشی از نشت پی‌های ماسه‌پی دانه‌ریز با سیمانته کم گام برداریم. در این نوشتار ابتدا فناوری تزریق شیمیایی به اختصار معرفی می‌شود و در ادامه، نتایج حاصل از دو نوبت تزریق شیمیایی در سد کرخه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

### معرفی اجمالی تزریق شیمیایی

#### انواع مواد شیمیایی مورد استفاده در تزریق شیمیایی

طی سال‌های متمادی، عبارت «تزریق شیمیایی» مترادف با سیلیکات سدیم و روش «یوستن» بود.<sup>[۲]</sup> در نیمه‌ی اول قرن بیستم معمولاً از سیلیکات سدیم و یک ماده‌ی فعال‌کننده، که اصطلاحاً این مجموعه را مواد تزریقی دو مؤلفه‌ی نیز می‌نامند، استفاده می‌شد. اما در سه دهه‌ی اخیر، صدها فرمول شیمیایی مختلف برای استفاده در تزریق شیمیایی به ثبت رسیده که تعدادی از آنها از نظر تجاری گسترش یافته‌اند.

امروزه برای تزریق شیمیایی عمدتاً از سیلیکات سدیم، اکریلامیدها، پلی‌یوریتان، لینگو سولفیدها، فنول پلاست‌ها، آمینو پلاست‌ها، رزین‌های اپوکسی استفاده می‌شود. در این بین سیلیکات سدیم، اکریلامیدها و پلی‌یوریتان بیش از سایر مواد کاربرد دارند؛ به طوری که در ایالات متحده در ۹۰ درصد پروژه‌ها از سیلیکات سدیم و اکریلامیدها استفاده می‌شود.<sup>[۶]</sup>

#### سازوکار آببندی خاک توسط مواد تزریقی شیمیایی

سازوکار آببندی خاک توسط مواد تزریقی شیمیایی مختلف معمولاً به دو صورت است:

۱. سیستم‌های آلی که از چند تکپار (مونومر) تشکیل شده‌اند و این تکپارهای آلی در درجه حرارت محیط و با اضافه شدن درصد کمی معرف پیوندی قطبیده شده و زنجیره‌های طولی مولکولی تشکیل می‌دهند. از جمله‌ی این مواد می‌توان به اکریلامیدها اشاره کرد.
۲. سیستم‌های غیر آلی، که با اضافه شدن برخی نمک‌ها مانند کلرید کلسیم به صورت ژل در آمده و حفره‌ها را پر می‌کنند. این ژل‌ها پس از انجماد یک پرده‌ی غیر قابل نفوذ تشکیل می‌دهند. از این دسته مواد تزریقی شیمیایی می‌توان به سیلیکات سدیم و سیلیکات کلسیم اشاره کرد.

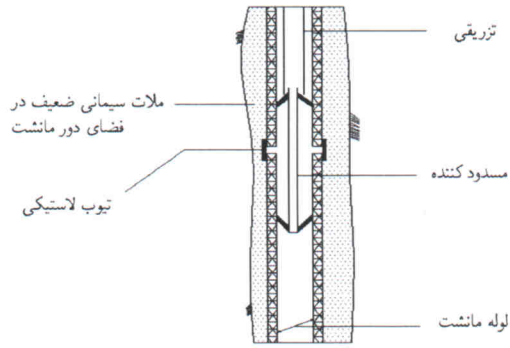
گران‌تر باشند، ولی از مزایای زیادی برخوردارند که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:<sup>[۲]</sup>

۱. به دلیل عدم حضور مصالح زیر در ماده‌ی تزریقی، مواد شیمیایی قادرند بدون مانع در مجاری ریزترین دانه‌ها نفوذ کنند.
۲. معمولاً گران‌زوی (ویسکوزیته) مواد تزریقی شیمیایی پایین است و در نتیجه برای دبی یکسان، فشار پمپاژ کم‌تری مورد نیاز خواهد بود.
۳. چون زمان‌گیری در دوغاب‌های شیمیایی قابل کنترل است، دوغاب در محل مناسب و در زمان مناسب ژلاتینی می‌شود.
۴. سرعت عمل ماده‌ی تزریقی در جلوگیری از نشت.

علیرغم کاربرد وسیع دوغاب‌های شیمیایی در پنج دهه‌ی اخیر در سطح جهان، سد خاکی کرخه اولین تجربه‌ی عملی تزریق شیمیایی در کشور است. سیستم آببندی پی سد کرخه از نوع دیوار آببند است که در سرتاسر محور سد با استفاده از بتن پلاستیک اجرا شده است.<sup>[۴]</sup> در قسمتی از پی جوش‌سنگی (کلوخه‌پی) سد کرخه، در ناحیه‌ی موسوم به گالری ۹۵۰، با توجه به عدم امکان احداث دیوار آببند، احداث یک پرده آببند تزریقی مورد توجه قرار گرفت. از سوی دیگر، تزریق سیمان انجام شده از نظر فنی و اقتصادی کاملاً موفقیت‌آمیز نبوده است و این تزریق آببندی کامل ارائه نمی‌دهد.<sup>[۵]</sup> لذا با توجه به تجربه‌ی موفقیت‌آمیز استفاده از تزریق شیمیایی در کنترل زه در ۵۰ سال اخیر و پس از بررسی‌ها و مطالعات گوناگون، و به منظور رفع مشکلات ناشی از نشت در این بخش خاص از پی سد یک پرده آببند تزریقی با استفاده از دوغاب‌های شیمیایی (علیرغم انواع مشکلات پیش رو از قبیل عدم وجود تکنولوژی و تخصص بومی و تجربه عملی در کشور) طراحی شد. به منظور دستیابی به بعضی از اهداف اولیه‌ی تزریق شیمیایی، تزریق آزمایشی در دو نوبت انجام شد. نوبت اول که در نیمه‌ی اول آبان ۱۳۸۲ به اتمام رسید، گمانه‌های مثلی به فواصل ۱/۵ متر و عمق تقریبی ۵ متر را شامل می‌شد که در ترانشه‌ی در نزدیکی گالری ۹۵۰ حفاری شده بودند. در نوبت دوم که تا اواخر اسفند ۱۳۸۲ به طول انجامید، از گمانه‌های خطی به فواصل تقریبی ۱/۸ متر و عمق ۶۰ متر استفاده شد که شرایط موجود در این سری تزریق آزمایشی، تا حد زیادی مشابه تزریق اصلی است.

تزریق‌های آزمایشی انجام شده در سد کرخه، ضمن به اثبات رساندن کارایی روش اتخاذ شده در کنترل زه، نتایج و تجربیات گران‌بها و منحصر به فردی را به همراه داشت که مهم‌ترین آنها را می‌توان سازمان و روش اجرا، انتخاب مصالح و مواد مورد نیاز، مشخص شدن مشکلات اجرایی، طرح‌های اختلاط مناسب و نیز سیستم‌های تهیه، تحویل و تزریق مواد شیمیایی دانست. به عبارت دیگر، با تجربه‌ی





شکل ۳. نمودار شماتیک تجهیزات و روش اجرای تزریق دوغاب‌های شیمیایی.

مانشت نیز گفته می‌شود، مدرن‌ترین و فنی‌ترین سیستم لوله‌گذاری در تزریق شیمیایی است که امروزه استفاده گسترده‌ی دارد. سیستم مزبور کنترل بیشتر و فزاینده در مورد عمق معین ورود ملات تزریق به لایه‌های خاک را برای اپراتور تزریق شیمیایی فراهم می‌سازد. فضای کروی بین لوله و دیواره‌ی گمانه نیز با یک ملات ضعیف که عموماً متشکل از سیمان و بتونیت است، پر خواهد شد. ملات شیمیایی تزریق از درون سوراخ‌هایی که در لوله‌ی حفاظ تعبیه شده است به داخل تشکیلات خاکی مورد نظر تزریق خواهند شد. در این فرایند، سیستمی متشکل از دو مسدودکننده تا عمق معینی به داخل گمانه فرستاده می‌شود تا سوراخ‌های لوله‌ی حفاظ مورد نظر از بقیه قسمت‌های گمانه جدا شوند. سپس به دلیل فشاری که از سطح زمین به ملات شیمیایی تزریق وارد می‌شود، تیوب لاستیکی که در قسمت بیرونی لوله‌ی مانشت سوراخ‌ها را در بر گرفته است، باز می‌شود. با این کار، زمینه‌ی لازم برای این که ملات شیمیایی بتواند ملات ضعیف موجود در فضای دور لوله مانشت و خاک را بشکند فراهم خواهد شد (شکل ۳).<sup>[۸]</sup>

### اولین تجربه‌ی تزریق شیمیایی کشور در سد کرخه

#### سد مخزنی کرخه

سد مخزنی کرخه به عنوان بزرگ‌ترین سد ایران در شمال غربی استان خوزستان، و در ۲۱ کیلومتری شهرستان اندیمشک اولین سدی است که بر روی رودخانه‌ی کرخه احداث شده است.

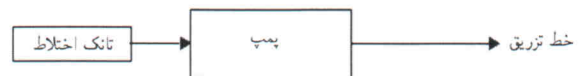
ارتفاع این سد ۱۲۷ متر از بستر رودخانه، طول تاج ۳۰۳ متر و عرض آن ۱۲ متر، و عرض کف ۱۱۰ متر است. حجم مفید مخزن سد در تراز عادی بهره‌برداری ۵/۶ میلیارد متر مکعب است. اهداف طرح مشتمل بر تأمین و تنظیم آب برای آبیاری بیش از ۳۲۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی و تولید انرژی برقابی به میزان ۹۳۴ گیگا وات ساعت در سال، کنترل سیلاب‌های مخرب و کاهش خسارات وارده است (شکل ۴).<sup>[۹]</sup>

سیستم مورد استفاده برای تهیه، تحویل و تزریق مواد شیمیایی سیستم معمول مورد استفاده برای تهیه و تزریق دوغاب‌های سیمانی، سیستم پیمان و مخلوط کردن (بچینگ) است. در این روش، ماده‌ی تزریقی و عامل واکنش‌زای آن - آب - با هم در یک مخزن مخلوط، و سپس تزریق می‌شوند (شکل ۱). در دوغاب‌های سیمانی، چون امکان جداسازی سیمان از آب وجود ندارد و نمی‌توان آنها را به‌طور جداگانه پمپ کرد، این روش تنها راه تهیه و تزریق مواد است؛ اما در دوغاب‌های شیمیایی معمولاً نمی‌توان از سیستم پیمان و مخلوط کردن (بچینگ) استفاده کرد، زیرا به‌علت محدود بودن زمان ژل‌شدگی ماده‌ی تزریقی، تمام محتویات تانک اختلاط باید قبل از اتمام این زمان به داخل خاک پمپ شوند. از آنجا که با ادامه‌ی تزریق معمولاً از سرعت پمپاژ کاسته می‌شود، اغلب این امر شدنی نیست.

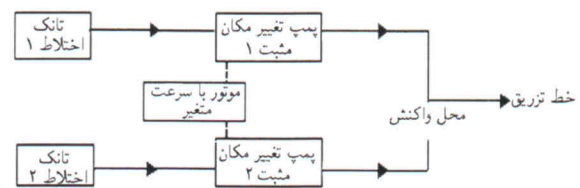
با توجه به ماهیت مواد تزریقی شیمیایی، که جداسازی ماده‌ی تزریقی و ماده‌ی واکنش‌زا، و پمپاژ جداگانه‌ی هر یک به داخل تشکیلات خاکی را ممکن می‌سازد، امروزه سیستم‌های مختلفی برای تهیه، تحویل و تزریق این مواد ابداع شده است. یکی از معمول‌ترین این سیستم‌ها، سیستم تهیه و تحویل دو مخزنه و دو پمپه است (شکل ۲). یکی از تانک‌ها همه‌ی مؤلفه‌های ماده‌ی تزریقی به جز ماده‌ی واکنش‌زا را در بر دارد و دیگری فقط ماده‌ی واکنش‌زا را شامل می‌شود. با استفاده از این سیستم، دو ترکیب شیمیایی که به‌منظور تشکیل ژل سیلیکاته با یکدیگر واکنش می‌دهند، تا مادامی که به لوله تزریق نرسیده‌اند با هم ترکیب نخواهند شد. با این کار، زمینه‌ی لازم برای کنترل بهتر زمان تشکیل ژل مهیا می‌شود.<sup>[۷]</sup>

#### تجهیزات تزریق و روش اجراء

در تزریق شیمیایی معمولاً از لوله‌های تزریقی در گمانه‌ها استفاده می‌شود. در این مورد لوله‌ی غلاف حفاظتی مشبک، که به آن لوله



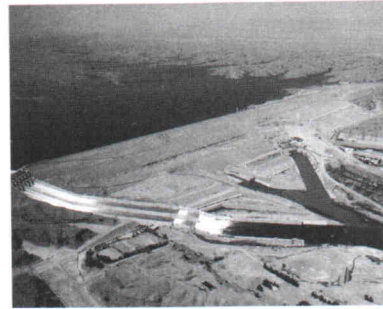
شکل ۱. نمودار شماتیک سیستم «پیمان و مخلوط کردن (بچینگ)» مورد استفاده برای تهیه و تزریق دوغاب‌های سیمانی.



شکل ۲. نمودار شماتیک سیستم متشکل از دو پمپ و دو تانک مورد استفاده برای تهیه و تزریق دوغاب‌های شیمیایی.

نوع است. جوش سنگ نوع ۲ نسبت به نوع ۱ پراکندگی بیشتری دارد و بیشتر در مرز بالایی لایه‌های گل سنگ مشاهده می‌شود. نزدیک به ۳۵٪ جوش سنگ تشکیل دهنده‌ی پی سد کرخه از این نوع است. جوش سنگ نوع ۳ نیز پراکندگی بسیار زیادی دارد و تزریق پذیری آن بسیار خوب است.

از دیگر نکات مهم در سازند بختیاری در محل پی سد کرخه، وجود عدسی‌های بسیار سست با مجاری باز موسوم به Open Gravel است. این لایه‌ها فاقد سیمان شدگی است و دانه‌های شن آزادانه روی هم قرار گرفته‌اند.<sup>[۵]</sup>



شکل ۴. نمایی از سد مخزنی کرخه در اندیمشک.

#### بافت زمین‌شناسی پی سد کرخه

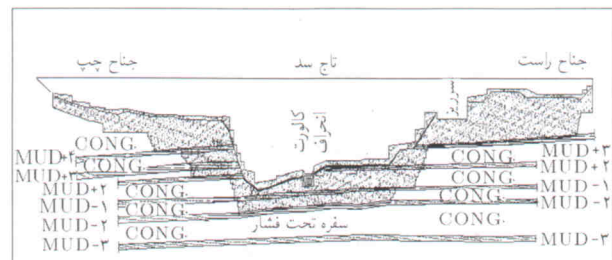
رودخانه‌ی کرخه در محل محور سد کرخه در دره‌ی نامتقارن در سازند بختیاری قرار دارد. سازند بختیاری مرکب از لایه‌های گل سنگی و جوش سنگی (کلوخه‌یی) است (شکل ۵). سد مخزنی کرخه بر روی توده سنگ جوش سنگی (کلوخه‌یی) جوان بنا شده است. کنگلومرای بختیاری در ساختگاه سد کرخه، به دو واحد بختیاری پایینی و بختیاری بالایی تقسیم شده است. کنگلومرای پایینی از تراز ۱۶۵ متر به پایین قرار دارد و سیمان‌شدگی ضعیف‌تری دارد. کنگلومرای بالایی از تراز ۱۶۵ به بالا و در تکیه‌گاه‌ها قرار دارد و از نظر سیمان‌شدگی وضعیت بهتری دارد. پی سد در بخش میانی و قسمت کوچکی از تکیه‌گاه راست و چپ سد، بر روی کنگلومرای بختیاری پایینی و تراس‌های آبرفتی که آنرا پوشش داده، واقع شده است.<sup>[۹]</sup> این لایه جوش سنگی سیمان‌شدگی ضعیفی دارد و از قلوه‌های آهکی و سیلیسی به نسبت مساوی با زمینه‌یی از ماسه، سیلت و رس و سیمانی آهکی تا آهکی رسی تشکیل شده است. توده سنگ کنگلومرای پایینی از نظر سیمان‌شدگی به سه بخش تقسیم می‌شود.

۱. کنگلومرا با زمینه‌ی رس و سیلتی؛
۲. کنگلومرا با زمینه‌ی ماسه‌یی؛
۳. کنگلومرای فاقد زمینه‌ی ریزدانه.

از سه نوع جوش سنگ ذکر شده، جوش سنگی نوع ۱ گسترده‌ی بسیار زیادی دارد و بیش از ۶۰٪ جوش سنگ موجود پی سد از این

محل اجرای تزریق شیمیایی و لزوم استفاده از آن در سد کرخه سیستم آب‌بندی پی سد مخزنی کرخه، از نوع دیواره آب بند با بتن پلاستیک است. قبل از انتخاب دیوار آب‌بند، به‌عنوان سیستم آب‌بندی پی سد، گزینه‌ی پرده‌ی آب‌بند از طریق تزریق دوغاب سیمان مد نظر قرار گرفته بود. بدین منظور چند سری عملیات تزریق سیمان آزمایشی انجام شد که نتایج غیر قابل قبول به دست آمده از آزمایشات، منجر به تغییر گزینه‌ی پرده‌ی تزریق آب بند به دیوار آب‌بند شد. بنابراین در سرتاسر محور سد یک دیوار آب‌بند با استفاده از بتن پلاستیک احداث شد. همچنین برای آب‌بند کردن منطقه‌ی حفاری شده‌ی اطراف نیروگاه آبی واقع در پایین دست سد، دیوار آب‌بند دیگری در اطراف نیروگاه اجرا شد که پلان سد، نیروگاه و دیوارهای آب‌بند در شکل ۶ نشان داده شده است.

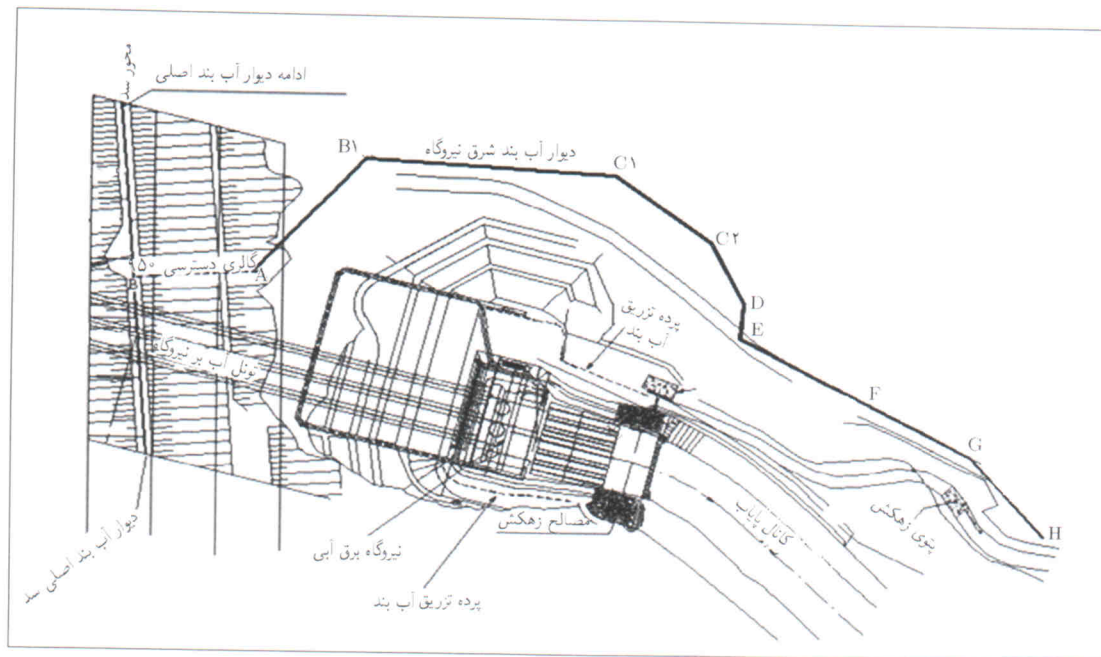
در فاصله‌ی بین این دو دیوار آب‌بند (خط چین AB در شکل ۶) یکی از گالری‌های دسترسی به سد که به گالری ۹۵° موسوم است (کیلومتر ۹۵°+۰ از تکیه‌گاه چپ سد)، واقع شده است. در این قسمت از پی سد به علت خلأ ناشی از عدم وجود دیوار آب‌بند تمرکز زه ایجاد شده و اجرای یک سیستم آب‌بند را ضروری می‌سازد تا بدین وسیله دیوار آب‌بند جدید به دیوار قدیم متصل شود. از طرفی، با توجه به قرار گرفتن گالری ۹۵° در زیر خاکریز بدنه‌ی سد، و نیز با توجه به فضای کم موجود در گالری، امکان احداث دیوار آب‌بند وجود نخواهد داشت. امروزه حتی مدرن‌ترین دستگاه‌های حفاری به‌منظور احداث دیوار آب‌بند، حداقل به ۴ تا ۵ متر ارتفاع برای کار نیاز دارند. لذا لزوم استفاده از یک پرده‌ی تزریقی به‌منظور اتصال این دو دیوار آب‌بند به یکدیگر مورد توجه قرار گرفت. از طرفی دیگر، همانطور که در بخش قبل اشاره شد، با توجه به شرایط خاص حاکم بر زمین‌شناسی پی، احداث پرده‌ی تزریق آب‌بند سیمانی کاملاً موفقیت آمیز نبوده و آب‌بندی کامل ارائه نمی‌دهد.<sup>[۵]</sup>



شکل ۵. وضعیت زمین‌شناسی پی سد کرخه که تناوبی از لایه‌های گل سنگی و جوش سنگی است.

سرانجام پس از بررسی‌ها و مطالعات گوناگون، استفاده از تزریق شیمیایی برای اولین بار در کشور در دستور کار قرار گرفت.





شکل ۶. پلان موقعیت سد کرخه، نیروگاه و دیوارهای آب بند.

### تزریق شیمیایی آزمایشی در سد کرخه نوبت اول (مهر و آبان ۱۳۸۲)

به منظور دستیابی به بعضی از اهداف اولیه تزریق شیمیایی، نظیر میزان و عملکرد نفوذ دوغاب‌های شیمیایی در جوش سنگ بختیاری، و شعاع نفوذ و تأثیر آن بر میزان نفوذپذیری سنگ در مقیاس کوچک‌تر، در نوبت اول تزریق شیمیایی آزمایشی که در مهر و آبان ۱۳۸۲ به انجام رسید، دو سری گمانه با برنامه‌های تزریقی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. این گمانه‌ها در نزدیکی ترانشه‌ی جوش سنگی واقع در مجاورت گالری ۹۵° حفاری شدند. علت انتخاب این محل برای تزریق آزمایشی، نزدیکی گمانه‌ها از سر ترانشه بود که حفاری دستی ترانشه و مشاهده و ارزیابی آثار حرکت دوغاب را در جوش سنگ پیرامون گمانه‌ها، میسر می‌ساخت.

#### دوغاب شیمیایی مورد استفاده

دوغاب شیمیایی مورد استفاده از سیلیکات سدیم به‌عنوان ماده‌ی اصلی، اتیل استات به‌عنوان ماده‌ی واکنش‌زا و آب تشکیل شده است. ابتدا مواد واکنش‌زای مختلفی مانند فرمامید، کلرید کلسیم، اتیل استات و آلومینات سدیم مورد توجه قرار گرفته بود (جدول ۱). پس از ساخت نمونه‌های مختلف دوغاب شیمیایی با این مواد واکنش‌زا، بررسی خواص آنها، انجام آزمایشات مختلف و توجه به مسائل اقتصادی، سرانجام اتیل استات به‌عنوان ماده‌ی واکنش‌زا در این پروژه به کار گرفته شد. نسبت اختلاط و خواص دوغاب شیمیایی نهایی در جدول ۲ آمده است.

بحث در مورد نتایج به دست آمده از آزمایشات انجام شده برای انتخاب ماده‌ی تزریقی و ماده‌ی واکنش‌زا

چنان که در بخش قبل اشاره شد، به منظور انتخاب ماده‌ی تزریقی و ماده‌ی واکنش‌زا آزمایشات متعددی انجام شد که سرانجام منجر به انتخاب سیلیکات سدیم به‌عنوان ماده‌ی تزریقی اصلی و اتیل استات به‌عنوان ماده‌ی واکنش‌زا شد. اهم نتایج به دست آمده از این آزمایشات که نقش به‌سزایی در تصمیم‌گیری‌های فنی پروژه داشتند عبارتند از:

۱. پایداری شیمیایی. واکنش قطبی کردن که باعث ایجاد ژل سیلیکات می‌شود، فقط در محیط‌هایی توصیه می‌شود که PH آنها دائماً کم‌تر از ۴ است.

۲. مقاومت نسبت به تغییرات دما. ژل سیلیکات در محیط اشباع آب، درصد قابل توجهی آب را در شبکه‌ی ژل درگیر کرده است. انقباض و انبساط پی‌درپی آب در اثر انجماد و ذوب، باعث ایجاد تنش در ساختار شبکه‌ی ژل شده و در نهایت باعث تخریب آن می‌شود. بنابراین استفاده از ژل سیلیکات فقط در شرایط محیطی بالای صفر درجه سانتی‌گراد توصیه می‌شود.

۳. مقاومت مکانیکی. سیلیکات وقتی با استفاده از اتیل استات ساخته شود و در محیط اشباع باشد، به صورت ژل بوده و از مقاومت مکانیکی پایینی برخوردار است. بنابراین سیلیکات در محیط‌های دارای تخلخل بالا و بسیار درشت از مقاومت مکانیکی مناسب برخوردار نیست و استفاده از آن فقط در محیط‌های با تخلخل

جدول ۱. مختصری از انواع دوغاب‌های مورد آزمایش به منظور تعیین بهترین طرح اختلاط.

شماره‌ی طرح	مصالح و مواد طرح	مقدار مصالح cc	آغاز ژل‌شدگی دقیقه	ژل‌شدگی کامل	توضیحات
۱	سیلیکات سدیم ۳۷٪ اتیل استات آب	۱۵۰ ۵۶ ۴۰	۳۰	بعد از ۳۰ ساعت	ژل حاصل در محلول دوغاب غوطه‌ور و محصور بود.
۲	سیلیکات سدیم ۳۷٪ فراماید آب کلرید کلسیم	۱۵۰ ۵۰ ۵۰ ۵۰	کمتر از ۱ دقیقه	در دقایق اولیه	قابل پمپاژ و تزریق نبود.
۳	سیلیکات سدیم ۳۷٪ فراماید آب آلومینات سدیم	۱۵۰ ۴۵ ۵۵ ۳۷٫۵	۴۸	۶۰ دقیقه	آب‌اندازی کم و افزایش مقاومت با گذشت زمان از نکات مثبت آن است.
۴	سیلیکات سدیم کلرید کلسیم آب	۳۷٫۵ ۱۰۰ ۲۴٫۵	کمتر از ۱ دقیقه	در دقایق اولیه	ژل تشکیل یافته از مقاومت پایینی برخوردار بود.
۵	سیلیکات سدیم ۳۷٪ آلومینات سدیم آب	۳۷٫۵ ۱۰۰ ۲۴٫۵	—	—	بعد از ۲۴ ساعت لخته‌های جدا از هم بسیار ظریفی تشکیل شد که در مقابل جریان آب قابل فرسایش بود.

جدول ۲. طرح اختلاط و مشخصات ماده‌ی تزریقی شیمیایی.

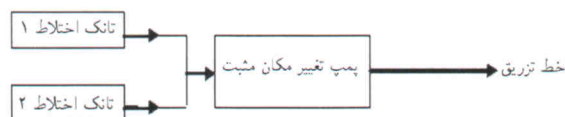
مشخصات ماده‌ی تزریقی شیمیایی	طرح اختلاط			
	سیلیکات سدیم (میلی لیتر)	اتیل استات (میلی لیتر)	آب (میلی لیتر)	گران‌زوی (ساتی پوآزا) (دقیقه)
زمان ژل‌شدگی (دقیقه)	۶۰	۲۱	۹۳	۲-۳

جدول ۳. آمار حاصل از تزریق شیمیایی در گمانه‌ی S۴. [۱۱]

مقطع تزریق	فشار شروع (Bar)	فشار پایان (Bar)	زمان (min)	خورد (Lit)
۳٫۵-۴	۰	۴	۲۰	۲۲۰
۳-۳٫۵	۰	۴	۲۰	۲۲۰
۲٫۵-۳	۰	۴	۲۰	۲۲۰
۲-۲٫۵	۰	۴	۲۰	۲۲۰
۱٫۵-۲	۰	۴	۲۰	۲۲۰
۱-۱٫۵	۰	۴	۲۰	۲۲۰

سیستم تهیه، تحویل و تزریق مورد استفاده برای تزریق شیمیایی با توجه به این که زمان ژل‌شدگی دوغاب شیمیایی مورد استفاده حدوداً ۴۰ دقیقه بود، ابتدا از سیستم «پیمانه و مخلوط کردن» (بجینگ) برای تزریق شیمیایی استفاده شد. بدین ترتیب که هنگامی که پیمانه‌ی اول در شرف اتمام بود، پیمانه‌ی بعدی تهیه می‌شد. با توجه به زمان ژل‌شدگی ماده‌ی تزریقی، به نظر می‌رسید سیستم اتخاذ شده بدون هیچ مشکلی به کار خود ادامه دهد. اما بعد از چند پیمانه مشاهده شد که زمان ژل‌شدگی مخلوط به شدت کاهش یافته است. لذا با توجه به خطر امکان انسداد لوله‌ها و پمپ، تزریق شیمیایی متوقف شد.

در ادامه از سیستم متشکل از دو تانک اختلاط و یک پمپ، که یکی از روش‌های توصیه‌شده در استانداردهای بین‌المللی برای تزریق شیمیایی است، استفاده شد. نمودار شماتیک این سیستم در شکل ۷ ارائه شده است. در این روش یکی از تانک‌ها همه‌ی مؤلفه‌های ماده‌ی تزریقی، به جز ماده‌ی واکنش‌زا، را در بر دارد و دیگری فقط ماده‌ی واکنش‌زا را شامل می‌شود. واکنش شیمیایی این دو ماده در پمپ



شکل ۷. نمودار شماتیک سیستم متشکل از دو تانک و یک پمپ مورد استفاده برای تهیه و تزریق مواد شیمیایی که در سد کرخه مورد استفاده قرار گرفت.

پایین و ریز، یا در محیط‌هایی که قبلاً در آن تزریق سیمان انجام شده است توصیه می‌شود.

۴. مقاومت در برابر شرایط/شباع. استفاده از ژل سیلیکات فقط در محیط اشباع نسبتاً ثابت (ترجیحاً با اشباع ۱۰۰٪) توصیه می‌شود. [۱۰]

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج حاصل از تزریق شیمیایی آزمایشی سری اول گمانه‌ها.

توضیحات	نفوذپذیری		عمق (متر)	گمانه
	Lu	Cm/s		
نفوذ پذیری مربوط به قبل از هرگونه تزریق	۱۶۳	$2/1 \times 10^{-2}$	۵	S1
نفوذ پذیری مربوط به قبل از هرگونه تزریق	۲۳۹	$3/1 \times 10^{-2}$	۵	S2
نفوذ پذیری مربوط به قبل از هرگونه تزریق	۲۵۵	$3/3 \times 10^{-2}$	۴	S3
بعد از تزریق شیمیایی ۳ گمانه اول	۱۰۲٫۵	$1/3 \times 10^{-2}$	۴	S5
بعد از تزریق شیمیایی ۳ گمانه اول	۸۹	$1/1 \times 10^{-2}$	۵	S6
بعد از تزریق شیمیایی ۳ گمانه اول	۷۰	$9/1 \times 10^{-2}$	۵	S7
بعد از تزریق شیمیایی همه گمانه‌ها	۷۳	$9/4 \times 10^{-2}$	۴	CH
بعد از تزریق سیمان همه گمانه‌ها	۱۶	$2 \times 10^{-2}$		

شد. گمانه‌های آزمایشی سری دوم شامل یک گمانه به نام S4 و به عمق ۴ متر بود که موقعیت آن نسبت به گمانه‌های سری اول، در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. در هر مرحله، قبل و بعد از هر تزریق، آزمایش نفوذپذیری انجام شد. نتایج تزریق گمانه‌ی S4 در جدول ۵ آمده است. چنان که از اعداد و ارقام این جدول بر می‌آید، در این حالت نفوذپذیری سیستم از حدود  $7 \times 10^{-2}$  لوژان به  $1/2$  لوژان می‌رسد که بیانگر بازدهی مناسبی است.

#### حفاری دستی ترانشه و مشاهده و ارزیابی آثار حرکت دوغاب در جوش سنگ

به منظور ارزیابی آثار حرکت دوغاب کلوتیدی در جوش سنگ پیرامون گمانه‌ها، در یک متری سر ترانشه محل آزمایشات گمانه‌های کم، یک گمانه‌ی ۳ متری حفاری شده و در ترکیب دوغاب کلوتیدی از ماده‌ی رنگی حلال بنام «بودر رنگ صنعتی زرد» که به رنگ زرد فسفری است و هیچ‌گونه تغییری در زمان ژل‌شدگی و دیگر خصوصیات ژل را باعث نمی‌شود، بهره گرفتیم. پس از تزریق دوغاب کلوتیدی، دیواره ترانشه توسط حفاری دستی تراشیده شد. در رخنمون به دست آمده از دیواره‌ی ترانشه نفوذ دوغاب کلوتیدی در منافذ ریز و درشت و ژل شدن آن با رنگ زرد فسفری مشخص بود. مهم‌ترین نتایج این امر نفوذ ژل در منافذ ریز و انجام واکنش ژل‌شدگی دوغاب در منافذ سنگ در

اتفاق می‌افتد و ماده‌ی حاصله از طریق یک لوله‌ی کوتاه به خط تزریق هدایت می‌شود.

بحث در مورد نتایج به دست آمده از سیستم‌های تهیه و تزریق استفاده شده برای تزریق شیمیایی در سد کرخه تاکنون تصور می‌شد که در دوغاب‌هایی که زمان ژل‌شدگی آنها به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، می‌توان از سیستم «پیمانه و مخلوط کردن» (بچینگ)، به‌عنوان راحت‌ترین و ارزان‌ترین سیستم ممکن، برای تزریق شیمیایی استفاده کرد. اما تجربه‌ی کرخه نشان داد که مقدار بسیار کم باقی مانده از پیمانه‌ی قبلی، به‌عنوان یک عامل شتاب‌دهنده برای پیمانه‌ی بعدی عمل می‌کند و زمان ژل‌شدگی آن را به شدت کاهش می‌دهد. تجربه‌ی کرخه نشان می‌دهد که سیستم‌های «پیمانه و مخلوط کردن» (بچینگ) برای تزریق مواد شیمیایی کارآ نیستند؛ مگر در کارهای کوچک که مواد تزریقی فقط به مقدار یک تانک اختلاط باشند.

#### گمانه‌های آزمایشی سری اول

در گمانه‌های آزمایشی سری اول، ابتدا تزریق شیمیایی و سپس تزریق دوغاب سیمانی صورت گرفت. همچنین در هر مرحله، قبل و بعد از هر نوع تزریق، آزمایش نفوذپذیری به عمل آمد تا ضمن مقایسه‌ی این نفوذپذیری‌ها کارایی عملیات مشخص شود. آرایش گمانه‌های تزریق آزمایشی سری اول، به صورت مثلثی است (شکل ۱۰)، بدین صورت که ابتدا گمانه‌های اولیه‌ی تزریق (S1، S2 و S3) در رؤس یک مثلث به فواصل ۱٫۵ متر از یکدیگر حفاری و تزریق می‌شوند و سپس گمانه‌های ثانویه (S5، S6 و S7) که در حد فواصل گمانه‌های اولیه و به‌عنوان گمانه‌های کنترل خطی حفاری شده‌اند، نمونه‌های باز یافتی بررسی و تأثیر تزریق گمانه‌های اولیه ثبت می‌شوند و پس از آن تزریق خواهند شد. در پایان، گمانه‌ی شاهد (CH) در مرکز گمانه‌های ثانویه حفاری شده و مقدار نفوذپذیری آن به دست می‌آید. عمق گمانه‌ها ۴ تا ۵ متر است. نتایج حاصل از تزریق در گمانه‌های آزمایشی سری اول به‌طور خلاصه در جدول ۳ آمده است.

چنان‌که مشاهده می‌شود، بعد از تزریق شیمیایی و سپس تزریق سیمان در تمام گمانه‌ها، میزان نفوذپذیری تشکیلات خاکی به ۱۶ لوژان رسید که چندان رضایت‌بخش نیست. چرا که هدف از برنامه‌های تزریقی معمولاً رسانیدن نفوذپذیری سیستم به زیر ۵ تا ۱۰ لوژان است. لذا در گمانه‌های آزمایشی سری دوم، تغییراتی در برنامه‌ی تزریقی ایجاد شد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

#### گمانه‌های آزمایشی سری دوم

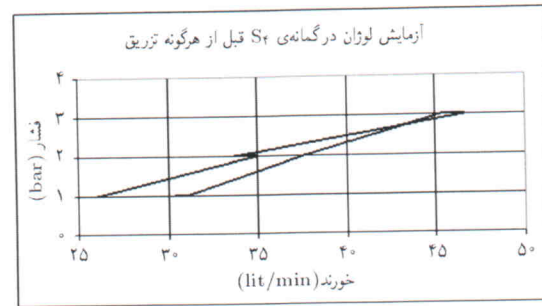
در گمانه‌های آزمایشی سری دوم، برخلاف سری اول، ابتدا تزریق سیمان و بنتونیت (۸٪ وزن سیمان مصرفی) و سپس تزریق شیمیایی انجام



رفتار تشکیلات نایل شد. در این راستا در این قسمت آمار و ارقام به دست آمده از تزریق در گمانه‌ی S4 ارائه می‌شود (شکل‌های ۸ و ۹).

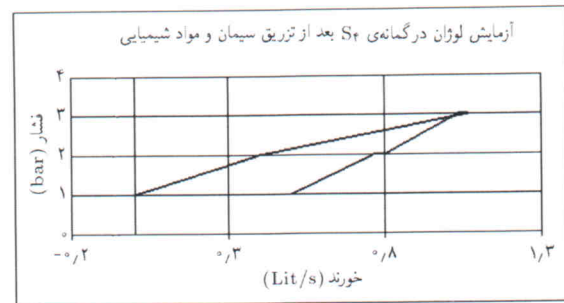
بحث در مورد نتایج به دست آمده از تزریق شیمیایی آزمایشی نوبت اول

با مقایسه و تحلیل نتایج به دست آمده از تزریق شیمیایی آزمایشی نوبت اول در دو سری گمانه می‌توان دریافت:



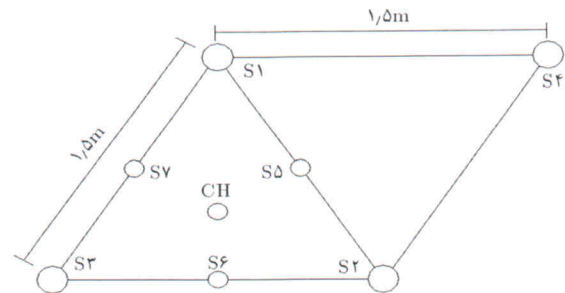
شکل ۸. نمودار فشار آزمایش و مقدار جذب آب در گمانه‌ی S4 قبل از تزریق. [۱۷]

۱. تزریق شیمیایی به‌تنهایی قادر به کنترل زه در پی جوش‌سنگی سد کرخه نیست. با توجه به زمین‌شناسی پی سد که شامل مجاری باز است، ژل تشکیل یافته در منافذ بزرگ و در برابر جریان زه آب، دوام خود را از دست داده، در نتیجه کارایی عملیات به‌شدت کاهش می‌یابد. هنگامی که فقط از تزریق شیمیایی استفاده شود، نفوذپذیری سیستم از متوسط ۲۱۹ لوژان در حالت بکر، به ۷۳ لوژان می‌رسد. در حالی که معمولاً هدف از برنامه‌های تزریق رساندن نفوذپذیری سیستم به زیر ۵ تا ۱۰ لوژان است.



شکل ۹. نمودار فشار آزمایش و مقدار آب در گمانه‌ی S4 بعد از تزریق سیمان و مواد شیمیایی. [۱۷]

۲. تلفیقی از تزریق سیمان و بتونیت، و سپس تزریق مواد شیمیایی بهترین گزینه برای طراحی برنامه‌ی تزریق در پی جوش‌سنگی سد کرخه است. در این حالت ابتدا منافذ بزرگ با تزریق سیمان بسته شده، و سپس با استفاده از تزریق شیمیایی، مجاری ریز باقیمانده بسته خواهد شد. با استفاده از این برنامه‌ی تزریقی، نفوذپذیری سیستم به ۱/۲ لوژان رسید که بیانگر بازدهی خوبی است. در حالی که ابتدا از تزریق شیمیایی و سپس از تزریق سیمان استفاده شد، نفوذپذیری تشکیلات حاکی ۱۶ لوژان اندازه‌گیری شد که در مقایسه با حالت قبل حاکی از کارایی کم‌تری است.



شکل ۱۰. موقعیت گمانه‌های آزمایشی.

۳. علاوه بر مسائل ذکر شده، استفاده‌ی توأمان از تزریق سیمان و تزریق شیمیایی، باعث کاهش قابل توجه هزینه‌ی عملیات تزریق می‌شود. در این حالت خلل و فرج درشت که قسمت عمده‌ی خوردن مواد تزریقی را تشکیل می‌دهند، توسط مواد تزریقی سیمانی که نسبت به دوغاب‌های شیمیایی ارزان‌تر و در هر کارگاهی به‌آسانی در دسترس‌اند، پر می‌شوند و خلل و فرج ریز باقی‌مانده نیز با استفاده از دوغاب‌های شیمیایی بسته خواهند شد.

پیرامون گمانه بود که با توجه به جدید بودن تجربه‌ی تزریق شیمیایی، برای دست‌اندرکاران تزریق جالب توجه بود.

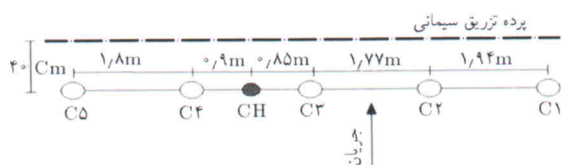
بررسی نمودار فشار آزمایش و مقدار جذب آب، فشار تزریق و میزان خوردن در S4

یکی از پارامترهای مهم در پروژه‌های تزریقی، میزان خوردن مواد تزریقی، چگونگی رفتار تشکیلات در آزمایش لوژان و فشار مورد نیاز برای تزریق مواد است که با توجه به این اعداد و ارقام می‌توان تا حد زیادی به درک

جدول ۵. خلاصه نتایج حاصل از تزریق شیمیایی آزمایشی در گمانه‌ی S4.

گمانه		نفوذپذیری در حالت بکر		نفوذپذیری بعد از تزریق سیمان		نفوذپذیری بعد از تزریق شیمیایی	
Lu	Cm/s	Lu	Cm/s	Lu	Cm/s	Lu	Cm/s
S4	$9/1 \times 10^{-2}$	۷۰	$3/7 \times 10^{-2}$	۲۹	$1/5 \times 10^{-5}$	۱/۲	





شکل ۱۱. موقعیت گمانه‌های آزمایشی خطی در داخل گالری ۹۵° مورد استفاده در نوبت دوم تزریق شیمیایی آزمایشی.

جدول ۷. خلاصه نتایج آزمایش نفوذپذیری در گمانه‌های C۲ و C۴ پس از تزریق سیمان در گمانه‌های C۵ و C۳ و C۱.

گمانه	عمق (متر)		نفوذپذیری
	لوژان	K (cm/s)	
C۲	۶۲	۴۸٫۵	$۶/۲ \times ۱۰^{-۴}$
C۴	۶۲	۴۴٫۵	$۵/۸ \times ۱۰^{-۴}$

جدول ۸. خلاصه نتایج آزمایش نفوذپذیری در گمانه‌ی کنترلی CH پس از تزریق سیمانی و شیمیایی.

گمانه	عمق (m)		نفوذپذیری
	لوژان	K (cm/s)	
CH	۶۱	۶٫۶	$۱/۶ \times ۱۰^{-۴}$

شد تا باقیمانده‌ی عملیات تزریقی فقط بر گمانه‌های C۳ و C۴ و در نهایت گمانه‌ی کنترلی CH متمرکز شود. در این راستا گمانه‌ی C۳ که فاصله‌ی زمانی دو مرحله‌ی تزریق آن مناسب بوده و مشکل شکست هیدرولیکی نداشت، تحت تزریق شیمیایی قرار گرفت. گمانه‌ی C۴ نیز که قبلاً هیچ‌گونه تزریقی در آن انجام نشده بود، تحت تزریق شیمیایی قرار گرفت. پس از اتمام مجموعه تزریق‌های سیمانی و شیمیایی، در گمانه‌ی کنترلی CH آزمایش لوژان صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۸ آمده است.

با توجه به جدول ۸ مشاهده می‌شود که نفوذپذیری تشکیلات خاکی پس از تزریق سیمان و سپس تزریق شیمیایی، به ۶٫۶ لوژان رسیده است. این نتیجه در حالی به دست آمده است که در گمانه C۴ فقط تزریق شیمیایی صورت گرفته است و نیز فاصله‌ی دو گمانه‌ی C۳ و C۴ برابر ۱٫۷۵ متر بوده که از حد استاندارد فواصل گمانه‌های تزریق شیمیایی بیشتر است. در صورت استفاده از گمانه‌هایی با فواصل کم‌تر از ۱ متر و نیز استفاده از تزریق دو مرحله‌ی در تمام گمانه‌ها، یقیناً شاهد نتایج مناسب‌تری خواهیم بود.

بررسی نمودار فشار آزمایش و مقدار جذب آب، فشار تزریق و میزان خوردند در گمانه‌ی CH در نوبت دوم، در گمانه‌ها و مقاطع مختلف آزمایش لوژان انجام شد. همچنین با توجه به عمق زیاد گمانه‌ها، آمار و ارقام مربوط به خوردند

## تزریق شیمیایی آزمایشی نوبت دوم در سد کرخه (نیمه‌ی دوم آبان لغایت اواخر اسفند ۱۳۸۲)

در نوبت دوم تزریق شیمیایی آزمایشی در سد کرخه، برای نزدیکی هر چه بیشتر تزریق شیمیایی آزمایشی با تزریق اصلی، از ۵ گمانه‌ی خطی با عمق حدود ۶۰ متر استفاده شد که در داخل گالری دسترسی ۹۵° (محل انجام تزریق شیمیایی اصلی) واقع شده بودند (شکل ۱۱).

براساس نتایج به دست آمده از تزریق شیمیایی آزمایشی نوبت اول که در خارج از گالری ۹۵° و در گمانه‌های کم‌عمق انجام شده بود، در مورد روش اجرای تزریق شیمیایی در گمانه‌های آزمایشی عمیق در داخل گالری ۹۵° تصمیم‌گیری شد. بنابراین روش تزریق دو مرحله‌ی که شامل تزریق سیمان و بتونیت و سپس تزریق شیمیایی است، به منظور تزریق در این گمانه‌ها مورد توجه قرار گرفت. قبل از انجام هرگونه تزریق سیمانی یا شیمیایی، با انجام آزمایش لوژان در گمانه‌های C۱ و C۳ و C۵ ضریب نفوذپذیری محدوده‌ی آزمایشی به دست آمد که خلاصه‌ی نتایج آن در جدول ۶ آمده است.

پس از اتمام آزمایشات لوژان در ۳ گمانه‌ی C۱ و C۳ و C۵ عملیات تزریق سیمان از داخل تیوب مانشت با طرح اختلاط شامل نسبت آب به سیمان ۲ به ۱، و بتونیت به میزان ۸ درصد سیمان مصرفی، در این گمانه‌ها انجام شد. با انجام آزمایشات نفوذپذیری در گمانه‌های C۲ و C۴ میزان تأثیر تزریق سیمان انجام شده بر نفوذپذیری سنگ به دست آمد (جدول ۷).

در مرحله‌ی بعدی طبق برنامه‌ی از پیش تعیین شده (تزریق دو مرحله‌ی: ابتدا تزریق سیمان و سپس تزریق شیمیایی) باید در گمانه‌های C۵ و C۳ و C۱ تزریق شیمیایی انجام می‌شد که با توجه به فاصله‌ی زمانی بین تزریق مرحله‌ی اول (تزریق سیمان) و تزریق مرحله‌ی دوم (تزریق شیمیایی)، عملیات با مشکل شکست هیدرولیکی دوغاب مرحله اول مواجه شد؛ به‌نحوی که فشار مورد نیاز برای شکست دوغاب سیمانی از قبل اجرا شده، به حدود ۶۰ اتمسفر می‌رسید. استفاده از چنین فشاری برای تزریق، با مشکلات زیادی از قبیل از بین رفتن پکرها، پارگی لوله‌های تزریقی و شیلنگ‌ها، ایجاد وقفه‌های پی‌درپی در کار و نیز صدمات جانی برای عوامل اجرایی همراه است. در نتیجه مقرر

جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج آزمایش نفوذپذیری در سه گمانه‌ی C۱ و C۳ و C۵.

گمانه	عمق (متر)		نفوذپذیری
	لوژان	K (cm/s)	
C۱	۶۳٫۵	۲۶٫۲	$۳/۲ \times ۱۰^{-۴}$
C۳	۶۲٫۷	۵۰٫۴	$۶/۳ \times ۱۰^{-۴}$
C۵	۶۳	۱۳۹٫۴	$۱۸/۰ \times ۱۰^{-۴}$

جدول ۹. بخشی از آمار خوردن مواد شیمیایی در گمانه‌های C۳ از گمانه‌های مرحله دوم. [۱۸]

مقطع تزریق	فشار شروع (بار)	فشار خاتمه (بار)	زمان (min)	خوردن شیمیایی (Lit)
۲،۵-۳	۰	۳۵	۵	۷
۳-۳،۵	۰	۳۵	۵	۱۴
۳،۵-۴	۰	۳۵	۷	۲۱
۴-۴،۵	۰	۳۵	۶	۲۸
۴،۵-۵	۰	۳۵	۳	۲۱
۵-۵،۵	۰	۳۵	۳	۱۴
۶-۶،۵	۰	۳۵	۵	۲۴
۶،۵-۷	۰	۳۵	۵	۲۱
۷-۷،۵	۰	۳۵	۵	۷
۷،۵-۸	۰	۳۵	۵	۷
۸-۸،۵	۰	۳۵	۵	۱۴
۸،۵-۹	۰	۳۵	۵	۱۴
۹-۹،۵	۰	۳۵	۸	۴۲

از فشار زیادی (حدود ۶۰ اتمسفر) است که کار کردن با چنین فشاری در خیلی از موارد عملی نیست.

برای رفع این مشکل می‌توان از تزریق دو مرحله‌ای در هر مقطع استفاده کرد. یعنی بعد از تزریق سیمان در هر مقطع، در همان مقطع تزریق شیمیایی، انجام شود. این روش مستلزم تغییری در پی روش تزریق از سیمانی به شیمیایی، و بالعکس، است که نیازمند صرف هزینه و به‌ویژه وقت زیادی است. از دیگر معایب این سیستم می‌توان به احتمال خطای فراموشی در تزریق شیمیایی بعضی مقاطع و در نتیجه ایجاد سوراخ در پرده‌ی تزریقی اشاره کرد. بنابراین این روش عملی نخواهد بود. برای حل این مشکل می‌توان دو روش را مورد استفاده قرار داد؛ روش اول موسوم به «تزریق ساندویچی» است و دیگری عبارت است از احداث یک پرده‌ی تزریق شیمیایی در بالادست پرده‌ی تزریق سیمانی موجود در گالری ۹۵°، که در ادامه هر یک به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

#### استفاده از روش تزریق ساندویچی برای حل مشکلات شکست تزریق سیمانی مرحله اول

روش «تزریق ساندویچی» بهترین سیستمی است که می‌توان برای حل مشکلات شکست تزریق سیمانی مرحله اول مورد استفاده قرار داد. این روش مستلزم حداقل سه ردیف گمانه است. ابتدا در ردیف‌های کناری عمل تزریق سیمان انجام می‌شود، که از این طریق خلل و فرج درشت موجود در تشکیلات خاکی مسدود می‌شود. سپس به‌منظور بستن سوراخ‌های ریز باقی‌مانده، تزریق شیمیایی در ردیف میانی صورت می‌گیرد. ماهیت این روش دقیقاً مشابه تزریق توأمان مواد سیمانی و

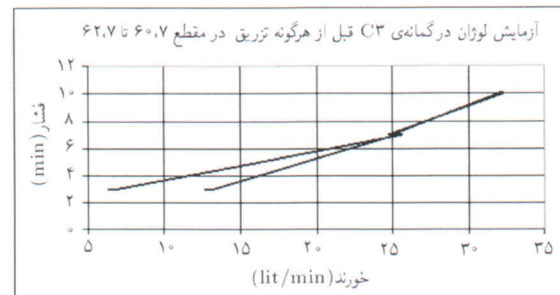
مواد سیمانی و شیمیایی از گستردگی زیادی بر خوردار است که در اینجا فقط به تعدادی از آنها که به گمانه‌ی کنترلی CH و نیز گمانه‌ی C ۳ مربوط‌اند اشاره می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و جدول ۹).

#### بحث در مورد نتایج به دست آمده از نوبت دوم تزریق شیمیایی آزمایشی در سد کرخه

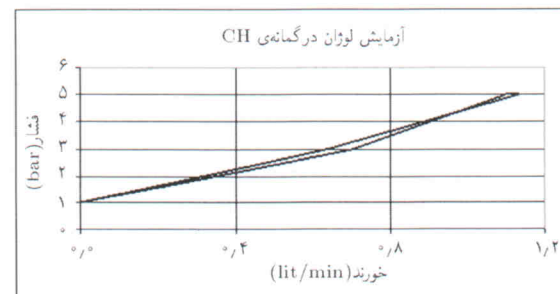
با تحلیل نتایج به دست آمده از نوبت دوم تزریق شیمیایی آزمایشی به نکات زیر می‌توان دست یافت:

۱. نتایج به دست آمده از نوبت دوم تزریق شیمیایی در سد کرخه، مجدداً کارایی روش تزریق دو مرحله‌ای (ابتدا تزریق سیمان و سپس تزریق شیمیایی) را به اثبات رساند. در این نوبت از تزریق شیمیایی آزمایشی با توجه به مسائلی از قبیل تمرکز زه در محل، فاصله‌ی نسبتاً زیاد گمانه‌ها از یکدیگر، و نیز عدم انجام تزریق دو مرحله‌ای در همه‌ی گمانه‌ها، مقدار نفوذپذیری تشکیلات خاکی به ۶/۶ لوژان رسید که با توجه به مسائل یاد شده بیانگر بازدهی خوبی است.

۲. نکته‌ی مهم دیگری که با توجه به عمق زیاد گمانه‌ها در این سری از آزمایشات، با آن مواجه شدیم، مشکلات شکست دوغاب سیمانی مرحله‌ی اول است. همان‌طور که اشاره شد، در اثر تثبیت دوغاب سیمانی مرحله‌ی اول، تزریق شیمیایی مرحله‌ی دوم مستلزم استفاده



شکل ۱۲. نمودار فشار آزمایش و مقدار جذب آب در گمانه‌ی C۳ قبل از تزریق. [۱۸]



شکل ۱۳. نمودار فشار آزمایش و مقدار جذب آب در گمانه‌ی CH بعد از تزریق. [۱۸]

با توجه به خوردند بالای مواد شیمیایی، به نظر می‌رسد هنوز مجاری باز با خلل و فرج درشت زیادی باقی مانده است. لذا در این حالت استفاده از یک پرده تزریق شیمیایی در بالادست پرده تزریق سیمانی اجرا شده، از لحاظ فنی و اقتصادی توجیه خواهد داشت. از لحاظ فنی به این دلیل این روش توصیه نمی‌شود که ژل تشکیل شده در مجاری باز فرسایش یافته و به راحتی دوام خود را از دست می‌دهد.

### پیشنهاد طرح نهایی به منظور انجام تزریق شیمیایی اصلی در گالری ۹۵°

با انجام دو نوبت تزریق شیمیایی آزمایشی در سد کرخه و تحلیل نتایج و تجربیات به دست آمده در این زمینه، طرح زیر برای تزریق اصلی شیمیایی در گالری ۹۵° سد کرخه پیشنهاد می‌شود:

۱. مواد و مصالح تزریقی و طرح اختلاط مورد استفاده، از مواد تزریقی دو مولفه‌ای، شامل سیلیکات سدیم به عنوان ماده‌ی اصلی و اتیل استات به عنوان ماده‌ی واکنش‌زا استفاده می‌شود.
۲. سیستم تهیه، تحویل و تزریق مورد استفاده، برای تهیه، تحویل و تزریق ماده شیمیایی از سیستمی متشکل از دو مخزن و یک پمپ استفاده می‌شود. یکی از مخزن‌ها شامل آب و سیلیکات سدیم و دیگری فقط حاوی اتیل استات است.
۳. تجهیزات تزریق، برای تزریق، از لوله‌های حفاظتی مشبک موسوم به «لوله‌ی مانت» استفاده می‌شود.
۴. ترتیب گمانه‌ها، ترتیب گمانه‌ها به صورت ساندویچی است. این روش شامل ۳ ردیف گمانه است که در ردیف‌های کناری تزریق سیمان و در ردیف میانی تزریق شیمیایی انجام می‌شود. مقطع گالری ۹۵° با تزریق ساندویچی در شکل ۱۱ آمده است.

### بحث در مورد میزان فشار تزریق در مراحل مختلف

#### تزریق شیمیایی

چنان‌که در ابتدای این نوشتار، در قسمت معرفی تزریق شیمیایی اشاره شد، یکی از مهم‌ترین مزایای تزریق شیمیایی، فشار کم‌تر مورد نیاز برای انجام تزریق است که انجام عملی تزریق شیمیایی در سد کرخه نیز بر این مطلب صحه گذاشت.

فشار تزریق در این عملیات به دو بخش تزریق سیمان و تزریق دوغاب کلوییدی منفک می‌شد.

الف) فشار تزریق سیمان در سنگ از فشارهای معمول در چنین تزریق‌هایی که معمولاً به‌ازای هر متر عمق ۲۵/۰ اتمسفر فشار

شیمیایی در یک گمانه است؛ یعنی ابتدا با استفاده از تزریق سیمان خلل و فرج درشت‌تر بسته می‌شود و سپس از تزریق شیمیایی برای پرکردن خلل و فرج ریزتر که با سیمان قابل آب‌بندی نیستند، استفاده می‌شود. تنها تفاوت موجود این است که در «تزریق ساندویچی»، تزریق سیمان و تزریق شیمیایی در یک گمانه‌ی واحد صورت نمی‌گیرد بلکه از گمانه‌های مجزا استفاده می‌شود.

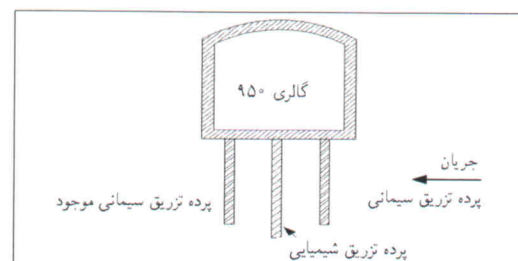
لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در زمینه‌ی استفاده از «روش تزریق ساندویچی» را نمی‌توان تعمیم داد. به عبارت دیگر نمی‌توان گفت که همواره باید از روش تزریق ساندویچی استفاده کرد، بلکه این امر کاملاً تابع مشخصات تشکیلات خاکی و دیگر وضعیت‌های خاص موجود در محل است. اگر شرایط خاص حاکم بر زمین‌شناسی و دیگر مشخصات گالری ۹۵° استفاده از روش تزریق ساندویچی را دیکته نمی‌کرد، مسلماً این روش که نسبت به تزریق توأمان مواد سیمانی و شیمیایی در یک گمانه، مستلزم وقت و هزینه‌ی بیشتری است پیشنهاد نمی‌شد.

نکته‌ی دیگر این که از سه ردیف گمانه‌ی مورد نیاز در تزریق ساندویچی، یک ردیف تزریق سیمان در گالری ۹۵° از قبل موجود است. بنابراین در ادامه باید یک پرده تزریق سیمانی دیگر در بالادست پرده سیمانی موجود اجرا شود و سپس بین آنها تزریق شیمیایی صورت گیرد (شکل ۱۴).

### احداث یک پرده تزریق شیمیایی در بالادست پرده تزریق

#### سیمانی موجود

روش دوم برای مقابله با مشکل شکست تزریق سیمان اولیه، احداث یک پرده تزریق شیمیایی در بالادست پرده تزریق سیمانی موجود است. در این روش با تزریق سیمان که قبلاً صورت گرفته است، خلل و فرج درشت بسته شده‌اند و با احداث پرده جدید شیمیایی، خلل و فرج ریز بسته می‌شود. بدین ترتیب با توجه به نتایج تزریق‌های آزمایشی، پیش‌بینی می‌شود که نفوذپذیری سیستم به مقدار مطلوب کاهش یابد. بدیهی است در این حالت هزینه‌ها کاهش می‌یابد ولی نسبت به تزریق ساندویچی، این روش بازدهی کمتری در کنترل نشست دارد. اما در تزریق شیمیایی گالری ۹۵°، در نقاط اتصال جوش‌سنگ‌ها،



شکل ۱۴. مقطع گالری ۹۵° با تزریق ساندویچی.



۲. عدم توانایی تزریق شیمیایی به‌تنهایی، در کنترل زه.
۳. تلفیقی از تزریق سیمان و بتونیت و سپس تزریق مواد شیمیایی، بهترین گزینه برای طراحی برنامه‌ی تزریق است.
۴. استفاده از تزریق توأمان مواد سیمانی و شیمیایی به دو روش ممکن است. در روش اول هر دو ماده در یک گمانه‌ی واحد تزریق می‌شوند ولی در روش دوم که آن را روش ساندویچی می‌نامیم، مواد سیمانی و شیمیایی در دو گمانه‌ی مجزا تزریق می‌شوند.
۵. انتخاب روش گمانه‌ی واحد یا روش ساندویچی کاملاً تابع شرایط خاص حاکم بر هر پروژه است.
۶. طرح نهایی پیشنهادی برای تزریق شیمیایی اصلی در گالری ۹۵۰ سد کرخه که حاصل دو نوبت تزریق شیمیایی آزمایشی است، موارد زیر را شامل می‌شود:
  - ماده‌ی تزریقی شامل سیلیکات سدیم به‌عنوان ماده‌ی اصلی، و اتیل استات به‌عنوان ماده‌ی واکنش‌زا. طرح اختلاط شامل ۶۰ لیتر سیلیکات سدیم، ۲۱ لیتر اتیل استات و ۹۳ لیتر آب است.
  - برای تهیه، تحویل و تزریق ماده‌ی شیمیایی از سیستمی متشکل از دو مخزن و یک پمپ استفاده می‌شود.
  - در گمانه‌های تزریقی از لوله‌های حفاظتی مشبک موسوم به «لوله‌ی مانشت» استفاده می‌شود.
  - ترتیب گمانه‌ها به‌صورت ساندویچی است. این روش شامل ۳ ردیف گمانه است که در ردیف‌های کناری تزریق سیمان و در ردیف میانی تزریق شیمیایی انجام می‌شود.

### منابع

۱. وفایان، محمود. سدهای خاکی. مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان. چاپ اول. تابستان (۱۳۷۷).
2. Shroff, A.V., Shah, D.L. Grouting Technology in tunneling and dam construction. second edition. A. A. BALKEMA/Rotterdam/BrookField. (1999).
3. Christian Kutzner. Grouting of Rock and Soil. A. A. BALKEMA /Rotterdam/Brookfield (1996).
۴. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. طرح سد مخزنی کرخه، بررسی‌ها و مطالعات دیوار آب‌بند، تهران (۱۳۷۳).
۵. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. طرح سد مخزنی کرخه، مطالعات زمین‌شناسی مهندسی فاز دو، تهران (۱۳۷۳).

در نظر گرفته و اعمال می‌شود. برای مثال برای تزریق در عمق ۱۰ متری فشار حداکثر ۳atm می‌شود.

ب) در تزریق کلوتیدی پس از اعمال فشار اولیه که برای شکست هیدرولیکی دوغاب دور مانشت است و حدود ۱۲ تا ۱۵ اتمسفر بوده و سپس افت داشته بنا بر توصیه‌ی مراجع بین‌المللی حداکثر ۳ بار در هر عمق بوده است. اصولاً نقش تخلخل سنگ و میزان خورند دوغاب در هر مقطع در تزریق از اولویت برخوردار است و فشار به‌دلیل گران‌روی پائین دوغاب تنها برای رانش اولیه‌ی دوغاب در منافذ است و بایستی محدود و حداکثر ۳atm باشد.

### نتیجه‌گیری

برای اولین بار در کشور، از تزریق شیمیایی برای حل مشکلات ناشی از نشست در قسمتی از پی جوش‌سنگی سد کرخه استفاده شد. با توجه به عدم وجود تجربه‌ی قبلی و تکنولوژی تزریق شیمیایی در کشور، تزریق شیمیایی آزمایشی در حال انجام در سد کرخه همواره سیر تکاملی داشته و ضمن به اثبات رساندن کارایی روش تزریق شیمیایی در کنترل و کاهش نشست، نتایج و تجربیات ارزشمند و منحصر به فردی را به همراه داشته است که اهم آنها عبارت‌اند از:

۱. سیستم‌های پیمانانه و مخلوط‌کردن برای تهیه و تزریق مواد شیمیایی، کارایی ندارند. تجربه‌ی کرخه نشان داد که مقدار بسیار کم باقی‌مانده از پیمانانه‌ی قبلی، به‌عنوان یک عامل شتاب‌دهنده برای پیمانانه بعدی عمل کرده و زمان ژل‌شدگی آن را به‌شدت کاهش می‌دهد. در نتیجه خطر انسداد لوله‌ها و پمپ وجود خواهد داشت.

۶. مهندسین مشاور زاینده آب. راهنمای کاربردی تزریق، اصفهان (زمستان ۱۳۷۵).
7. Us Army Corps of Engineers. Engineer Manual. CHEMICAL GROUTING. EM 1110-1-3500, (31 Jan 1995).
۸. مهندسین مشاور لار. راهنمای کاربردی تزریق در سازه‌های زیر زمینی، چاپ اول، تهران (۱۳۸۰).
۹. شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. خلاصه مطالعات مرحله اول طرح کرخه، چاپ اول، تهران (بهار ۱۳۸۰).
۱۰. کیوانی، عبدالله. تزریق در زمین‌های آبرفتی، انتشارات رودکی، چاپ اول (۱۳۶۹).
۱۱. حیدرزاده، محمد. «تزریق شیمیایی در پی‌های کنگلومرایی - مطالعه موردی سد کرخه»، پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران (شهریور ۱۳۸۳).