به‌سازی زمین به‌روش تزریق با فشار بسیار بالا

بابک نیک‌بختان، کاوه آهنگری: دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران
علی نورزاد: دانشکده صنعت آب، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور
کامران گشتاسبی: گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
سیاوش لیتکوهی: شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک (SES)

تاریخ: دریافت ۸۸/۷/۶ **پذیرش** ۸۹/۳/۲۹

چکیده

تزریق با فشار بسیار بالا روشی برای اصلاح خاک است که در آن آب یا دوغاب، با فشار بسیار بالا و سرعت زیاد از طریق نازل‌هایی به داخل خاک تزریق شده و باعث تخریب ساختار خاک می‌شود. طی این فرآیند، بخشی از ذرات خاک و دوغاب از درون گمانه حفاری بیرون آمده و بخشی دیگر به‌صورت درجا با دوغاب مخلوط می‌شوند. در نتیجه این فرآیند، توده‌ای از خاک اصلاح شده به‌وجود می‌آید که به آن اصطلاحاً توده خاک-سیمان اطلاق می‌شود. ستون‌های خاک- سیمان ایجاد شده از طریق روش تزریق با فشار بالا در داخل خاک، دارای مقاومت بالا، تغییر شکل‌پذیری اندک و نفوذپذیری بسیار پایین هستند و باعث تقویت خصوصیات خاک محل می‌شوند. در مقاله حاضر ابتدا اصول تزریق با فشار بالا و عوامل مؤثر در این روش تشریح شده است، سپس به بررسی نتایج حاصل از خاک‌برداری اطراف ستون‌های خاک- سیمان ایجادشده با تزریق با فشار بسیار بالای آزمایشی و آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌های اخذ شده از این ستون‌ها پرداخته شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های مذکور، عملیات تزریق با فشار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

بسیار بالا باعث افزایش و تقویت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک محل از جمله مقاومت فشاری تک محوری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تا چندین برابر شده است. در پایان نیز مقادیر پارامترهای تزریق با فشار بسیار بالا برای دست‌یابی به اقطار بیشتر در سایت مذکور (براساس نتایج تزریق آزمایشی)، از قبیل سرعت بالا کشیدن مانیتور، سرعت دوران مانیتور، فشار آب، فشار دوغاب و فشار هوا پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: تزریق با فشار بالا، بهبود زمین، ستون خاک- سیمان، سد شهریار میانه

مقدمه

تزریق، روشی است که با آن دوغاب به خلل و فرج، درزه و شکاف یا حفرات موجود در تشکیلات سنگی و خاکی نفوذ کرده و موجب بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی تشکیلات مذکور می‌شود به‌نحوی که در اثر آن نفوذپذیری و تغییر شکل‌پذیری لایه‌ها کم و مقاومت آن‌ها بالا می‌رود [۱]. در دهه ۱۹۶۰ تزریق شیمیایی به‌عنوان یکی از روش‌های تزریق در زمینهٔ به‌سازی و اصلاح خاک نقش مهمی را بازی می‌کرد. اما معایب و نقصان‌های روش تزریق شیمیایی همانند مشکلات زیست‌محیطی، شکل غیرمنظم و مقاومت کم تودهٔ خاک باعث شد که متخصصان علم تزریق به‌دنبال ابداع روش جدیدی برای اصلاح بهتر خاک باشند [۲]. یکی از این روش‌ها، روش تزریق با فشار بالا است. روش تزریق با فشار بالا یا تزریق فواره‌ای، جای‌گزین مناسبی برای سیستم‌های تزریق متداول، روش گودبرداری و دوغاب (روش گرب و بتن پلاستیک)، سیستم‌های پی‌سازی، روش شمع‌کوبی و روش‌های انجماد یا هوای فشرده در تونل‌سازی است [۲]، [۳]. برادران یاماکودا پیشنهاد و ایده اصلی ابداع روش تزریق با فشار بالا با استفاده از جریان با سرعت بالای آب، برای برش، حذف و ایجاد توده خاک-سیمان در حدود سال ۱۹۶۵ ارائه کردند و از زمان ابداع تاکنون در حال پیشرفت و ارتقا است [۲]، [۴]، [۵]، [۶]. با توجه به پیشرفت‌ها و تلاش‌های انجام‌شده در زمینهٔ اصلاح روش‌های تزریق با فشار بسیار بالا، سه‌سیستم برای اجرای این عملیات وجود دارد که تفاوت عمدهٔ این سه‌سیستم در نوع، تعداد و آرایش نازل‌های خروج آب، هوا و دوغاب است. انتخاب یکی از این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

سیستم‌ها به نوع خاک، کاربرد و خواص فیزیکی خاک- سیمان مورد نظر بستگی دارد[۲]-[۱۳]. این سه سیستم عبارتند از:

سیستم تک‌سیال: این سیستم، ساده‌ترین روش تزریق با فشار بالا است. سیال تزریق در این سیستم، فقط دوغاب است و جت دوغاب، هم‌زمان با تخریب، کار تزریق را نیز انجام می‌دهد. سیستم تک‌سیال، منحصراً برای تزریق با فشار بالا به‌صورت افقی، استفاده می‌شود. قطر ستون ایجادشده با استفاده از این سیستم، غالباً از روش‌های دیگر، کم‌تر و کوچک‌تر است (۴۰ تا۸۰ سانتی‌متر در خاک‌های با چسبندگی بالا و ۵۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر در خاک‌های دانه‌ای).

سیستم دوسیال: سیستم دوسیال، اصلاح‌شده سیستم تک‌سیال است. بارزترین مشخصهٔ این سیستم، هم‌زمانی تزریق دوغاب با سرعت بالا در میان مخروطی از هوای فشرده (که اطراف جت دوغاب را احاطه کرده)، است. ستون خاک- سیمان ایجادشده در این‌روش، حجم بالایی از هوا را داشته که تأثیر منفی بر مقاومت آن دارد.

سیستم سه‌سیال: این سیستم، پیچیده‌ترین روش تزریق با فشار بالا بوده که دلیل آن تزریق هم‌زمان سه‌سیال مختلف آب، هوا و دوغاب است. تزریق سه‌سیال، این امکان را فراهم می‌آورد که خاک بیش‌تری از زیر زمین کنده شود. لذا این سیستم را می‌توان به‌عنوان روشی که در آن دوغاب به‌طور کامل جای‌گزین خاک می‌شود، قلمداد کرد.

در جدول ۱ پارامترهای عملیاتی و مقاومت خاک- سیمان ایجادشده به‌کمک هر سه‌سیستم، به‌صورت خلاصه ارائه شده است. به‌طور کلی عوامل مهمی که در طراحی روش تزریق با فشار بالا مؤثر هستند عبارتند از نوع خاک، میزان اختلاط دوغاب با خاک، انرژی جت خروجی از نازل، دبی دوغاب، سرعت بالاکشیدن راد و چرخش راد تزریق [۱۰]. پارامترهایی که باید در روش تک‌سیال تعیین شوند عبارتند از فشار تزریق، تعداد و ابعاد نازل‌ها، نسبت آب به سیمان، سرعت دوران، نرخ بالاکشیدن راد تزریق به‌همراه مجموعه مانیتور. در سیستم دوسیال، علاوه بر پارامترهای ذکر شده در روش تک‌سیال، پارامترهای فشار هوا و میزان دبی هوا نیز باید تعیین شوند. اما در سیستم سه‌سیال، علاوه بر هفت پارامتر ذکرشده؛ یعنی فشار تزریق، تعداد و ابعاد نازل‌ها، نسبت آب به سیمان، سرعت دوران، نرخ بالا کشیدن راد تزریق، فشار هوا و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

میزان دبی هوا، پارامترهای ابعاد و تعداد نازل‌های آب و فشار آب را نیز باید تعیین کرد.

استفاده از تزریق با فشار بسیار بالا در سد شهریار میانه

سد شهریار از نوع بتنی دو قوسی است که در ۳۹ کیلومتری شهرستان میانه، بر روی رودخانه قزل‌اوزن در استان آذربایجان‌شرقی به‌منظور تأمین آب مورد نیاز کشاورزی برخی از زمین‌های استان گیلان و نیاز آبی شهرها و مناطق صنعتی پائین‌دست خود و همچنین برای کنترل سیلاب رودخانه قزل‌اوزن و امکان ایجاد سیلاب‌های مصنوعی (جهت افزایش راندمان عملیات رسوب‌زدایی سد سفیدرود) در حال احداث است. مشخصات اصلی سد مذکور عبارتنداز:

نوع سد :	**بتنی دو قوسی**	**عرض تاج :**	**۶ متر**
تراز تاج (نهایی) :	**۱۰۷۰ متر از سطح دریا**	**ضخامت طرهٔ مرکزی در پی :**	**۲۵ متر**
ارتفاع سد از روی پی :	**۱۶۰ متر**	**حجم بتن :**	**۳۹۰۰۰۰ مترمکعب**
ارتفاع از خط‌القعر رودخانه :	**۱۰۰ متر**	**نوع سنگ پی :**	**دیوریت**
طول تاج :	**۲۹۷ متر**		

جدول۱. محدودهٔ پارامترهای عملیاتی هر سه‌سیستم تزریق با فشار بالا [۵]

پارامترهای تزریق		واحد	تک‌سیال	دوسیال	سه‌سیال
فشار تزریق	جت آب	(MPa)	PW*	PW	۳۰–۵۵
	جت دوغاب	(MPa)	۳۰–۵۵	۳۰–۵۵	۱–۴
	هوای فشرده	(MPa)	استفاده نمی‌شود	۰/۷–۱/۷	۰/۷–۱/۷
دبی	جت آب	($^{lit}/_{min}$)	PW	PW	۷۰–۱۰۰
	جت دوغاب	($^{lit}/_{min}$)	۶۰–۱۵۰	۱۰۰–۱۵۰	۱۵۰–۲۵۰
	هوای فشرده	($^{m3}/_{min}$)	استفاده نمی‌شود	۱–۳	۱–۳
اندازه نازل	جت آب	(mm)	PW	PW	۱/۸–۲/۶
	جت دوغاب	(mm)	۱/۸–۳	۲/۴–۳/۴	۳/۵–۶
تعداد نازل‌های آب			PW	PW	۱–۲
تعداد نازل‌های دوغاب			۲–۶	۱–۲	۱
نسبت آب به سیمان در دوغاب			در هر سه‌روش ۰/۸:۱ تا ۲:۱		
مصرف سیمان		($^{Kg}/_{m}$)	۲۰۰–۵۰۰	۳۰۰–۱۰۰۰	۵۰۰–۲۰۰۰
		($^{Kg}/_{m^3}$)	۴۰۰–۱۰۰۰	۱۵۰–۵۵۰	۱۵۰–۶۵۰

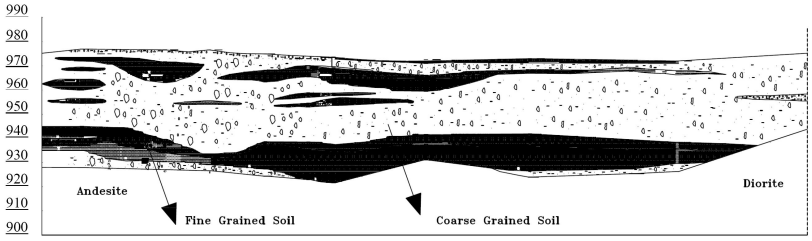
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

سرعت چرخش راد	(rpm)	۱۰–۳۰	۱۰–۳۰	۳–۸
سرعت بالاکشیدن راد	($^{min}/_{m}$)	۳–۸	۳–۱۰	۱۰–۲۵
قطر ستون ایجادشده				
خاک‌های درشت‌دانه	(m)	۰/۵–۱	۱–۲	۱/۵–۳
خاک‌های ریزدانه	(m)	۰/۴–۰/۸	۱–۱/۵	۱–۲
مقاومت خاک_ سیمان				
خاک‌های ماسه‌ای	(MPa)	۱۰–۳۰	۷/۵–۱۵	۱۰–۲۰
خاک‌های رسی	(MPa)	۱/۵–۱۰	۱/۵–۵	۱/۵–۷/۵

***PW: آب، تنها برای شستن استفاده می‌شود**

برای احداث سد شهریار، نیاز به گودبرداری پی، تا رسیدن به سنگ کف در پایین‌دست فرازبند است. فضای اندک بین فرازبند و سد اصلی (حدود ۱۵۰ متر) باعث شده تا گودبرداری این قسمت (حتی بدون توجه به محدودیت‌های زمین‌شناسی)، بدون تقویت و اصلاح خاک، امکان‌پذیر نباشد. از سوی دیگر، وجود یک لایه پیوسته رسی با مقاومت برشی پایین، احتمال لغزش و ناپایداری فرازبند را در هنگام گودبرداری بالا می‌برد. با توجه به محدودیت‌های فوق، برای پایداری محوطهٔ گودبرداری، ساخت دیافراگم چندقوسی، تقویت خاک از طریق تزریق با فشار بالا، ساخت دیوار حائل و احداث دیوار حائل پشت بنددار بررسی شد. بر اساس مهندسی ارزش انجام‌شده، گزینهٔ تزریق با فشار بالا به‌عنوان اقتصادی‌ترین راه حل تأمین پایداری گودبرداری پی سد، در بالادست انتخاب شد. شکل ۱ نمایی از وضعیت زمین‌شناسی محدوده گود برداری پی سد را نشان می‌دهد.



شکل ۱. وضعیت زمین‌شناسی محدوده گودبرداری پی سد [۱۵]

تزریق با فشار بسیار بالای آزمایشی

خصوصیات ستون‌های خاک–سیمان به‌دست آمده از عملیات تزریق از نظر قطر و مقاومت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

به پارامترهای تزریق فشار بالا از قبیل فشار تزریق، سرعت بالا آوردن لوله تزریق، سرعت دوران، تعداد و قطر نازل‌ها و همچنین نسبت آب به سیمان دوغاب و خصوصیات خاک موجود در محل، بستگی دارد. با توجه به دامنهٔ وسیع پارامترهای تأثیرگذار و وابستگی نتیجهٔ کار به خاک محل، به‌دست آوردن مقدار بهینه پارامترهای تزریق و نسبت آب به سیمان نیازمند انجام آزمایش‌های محلی است.

۱. مشخصات مهندسی خاک در محدوده تزریق آزمایشی و سایت اصلی

خاکی که در آن تزریق فشار بالای اصلی انجام خواهد گرفت، دارای آبرفت درشت‌دانه با لنزهای سیلتی و رسی و یک لایهٔ پیوسته رسی است و از آن‌جا که خاک محل تزریق آزمایشی باید مشابه خاک اصلی باشد از این رو منطقه‌ای برای این کار انتخاب شد که دارای یک لایهٔ رسی سطحی در عمق حدود ۴/۵ متری بود. بنا بر این پس از انجام تزریق، حفاری اطراف ستون‌های خاک- سیمان و مشاهده نتیجهٔ کار امکان‌پذیر بود. درحالت کلی لایه‌های زیرسطحی در محدودهٔ تزریق آزمایشی، به دو بخش کلی خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه تقسیم شدند. لایه‌های ریزدانه، عمدتاً از جنس رس با خاصیت خمیری کم و یا لای پلاستیک است. خاک‌های ریزدانه در سیستم طبقه‌بندی USCS با علائم CL-ML, CL/CH, ML/MH نشان داده می‌شوند و خاک‌های درشت‌دانه که از جنس شن لای‌دار همراه با ماسه می‌باشند، در این سیستم طبقه‌بندی با علامت GM نشان داده می‌شوند. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه محدودهٔ تزریق آزمایشی از قبیل متوسط حد روانی، دامنه خمیری، درصد رطوبت طبیعی خاک و چسبندگی (کیلوپاسکال) به‌ترتیب عبارتنداز: ۴۵، ۲۰، ۳۸ و ۴۰ [۱۵]. برای بررسی خصوصیات مقاومتی خاک رس موجود در محل تزریق فشار بالای آزمایشی، آزمایش نفوذ استاندارد در سه‌گمانه و در عمق‌های به فاصله یک‌متر انجام شد که نتایج حاصله در جدول ۲ آورده شده است [۱۴]. با توجه به نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در محل، خاک رس محل تزریق فشار بالای آزمایشی، از نوع نرم با محدودهٔ مقاومت فشاری تک‌محوری ۵۰ - ۲۵ کیلوپاسکال است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

۲. گمانه‌های تزریق آزمایشی

به‌منظور انجام تزریق آزمایشی شش گمانه آزمایشی حفاری شد. گمانه‌های T1، T4، T6 به‌عمق ۱۰/۵ متر و گمانه‌های T2، T3، T5 به‌عمق ۵ متر، که گمانه‌های ۵ متری عمدتاً در داخل رس بوده ولی گمانه‌های ۱۰/۵ متری پس از یک لایهٔ مصالح آبرفتی درشت‌دانه در عمق حدود ۴/۵ متر به لایهٔ رس رسیدند [۱۴].

در تزریق گمانه‌های آزمایشی، با تغییر پارامترهای تزریق؛ شامل سرعت بالاکشیدن و دوران مانیتور تزریق، فشار آب، دبی آب، فشار دوغاب، دبی دوغاب و نسبت آب به سیمان تلاش شد تا اثر آن روی خصوصیات ستون‌های خاک–سیمان ایجادشده، بررسی شود. در جدول ۳ پارامترهای تزریق هرگمانه، دانسیته دوغاب ورودی و برگشتی، مدت‌زمان تزریق و مقدار سیمان مصرفی آورده شده است.

بحث و بررسی نتایج به‌دست آمده

اطراف گمانه‌های T2 ، T3 و T5 به‌عمق ۵ متر (که در داخل رس تزریق شده)، پس از گذشت حدود ۳۲ روز از تزریق بازگشایی شدند. قطر ستون‌ها در عمق‌هایی به‌فاصله یک متر از هم اندازه‌گیری شدند و در همین فواصل نمونه‌های بلوکی به ابعاد تقریبی ۳۰ سانتی‌متر اخذ گردید. فاصلهٔ نمونه‌ها از محور ستون ۱۰ یا ۱۵ سانتی‌متر بود. در شکل ۲ ستون‌های خاک–سیمان ایجادشده و نیز نمونه‌های بلوکی، نشان داده شده است. در گمانه‌های T1، T4 و T6 که در آبرفت و رس تزریق شده‌اند، نمونه‌های لوله مغزه‌گیر به‌روش مغزه‌گیری ممتد گرفته شد که در شکل ۳ مغزه‌های به‌دست آمده، ارائه شده است. کیفیت نمونه‌ها به‌علت وجود قطعات شن در بافت تزریق شده چندان مناسب نبود و نمونه‌های مکعبی حدود ۴۰ روز پس از تزریق، از این گمانه‌ها گرفته شد. پس از بازگشایی اطراف ستون‌های خاک–سیمان، قطر آن‌ها در عمق‌های یک متری اندازه‌گیری شد [۱۴]. قطر متوسط ستون‌های خاک–سیمان در بخش درشت‌دانه و ریزدانه در جدول ۴ ذکر شده است. قطر متوسط ستون‌ها در بخش ریزدانه و درشت دانه به ترتیب حدود ۱/۲۲ و ۱/۲ متر به‌دست آمد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0] [Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول ۲. نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در خاک رس محل تزریق

گمانه CH1		گمانه CH2		گمانه CH3	
عمق(متر)	عدد N_{SPT}	عمق(متر)	عدد N_{SPT}	عمق(متر)	عدد N_{SPT}
۰/۵۵ – ۱	۱	۰/۵۵ – ۱	۳	۱ – ۱/۴۵	۱
۱/۵۵ – ۲	۲	۱ – ۱/۴۵	۲	۲ – ۲/۴۵	۳
۲/۵۵ – ۳	۳	۲ – ۲/۴۵	۶	۳ – ۳/۴۵	۲

جدول ۳. مقادیر پارامترهای تزریق فشار بالای آزمایشی

شماره گمانه	طول تزریق	سرعت بالاکشیدن	سرعت دورانی	فشار هوا	دبی هوا	فشار آب	دبی آب	فشار دوغاب	دبی دوغاب	نسبت آب به سیمان	دانسته دوغاب ورودی	دانسیته دوغاب برگشتی	سیمان مصرفی
	m	cm/min	r/min	bar	m^3/min	bar	l/min	bar	l/min		gr/cm^3	gr/cm^3	ton
T1	۶/۵	۷~۸	۷~۸	۶~۷	۱~۲	۳۵۰	۷۰ – ۶۰	۳ – ۵	۸۰	۱	۱/۵۵	۱/۴۸	۱۱/۹۰
T2	۵/۰	۴~۶	۴~۶	۶~۷	۱~۲	۴۰۰	۷۰ – ۷۰	۴ – ۵	۱۲۵	۱	۱/۵۵	۱/۳۴	۱۰/۳۴
T3	۵/۰	۴~۶	۴~۶	۶~۷	۱~۲	۴۰۰	۷۰ – ۷۰	۱۵–۲۰	۱۰۵	۰/۷	۱/۷۲	۱/۴۵	۱۰/۵۰
T4	۱۰/۵	۵~۹	۶~۸	۶~۷	۱~۲	۴۰۰	۷۰ – ۷۰	۸ – ۱۵	۱۳۰	۱	۱/۵۵	۱/۴۲	۱۶/۸۰
T5	۵/۰	۴~۶	۴~۶	۶~۷	۱~۲	۳۵۰	۷۰ – ۶۰	۱۵–۱۶	۱۵۰	۱	۱/۵۵	۱/۴۰	۱۱/۶۰
T6	۱۰/۵	۷~۸	۷~۸	۶~۷	۱~۲	۴۰۰	۷۰ – ۷۰	۳ – ۶	۹۰	۱	۱/۵۵	۱/۳۹	۱۱/۵۵

شکل ۲. ستون‌های خاک-سیمان به‌همراه نمونه‌های بلوکی برای گمانه‌های تزریقی T2, T3, T5 [۱۵]

شکل ۳. مغزه‌های گرفته‌شده از گمانه‌های تزریقی T1, T4, T6 [۱۵]

جدول ۴. قطر متوسط ستون‌های خاک- سیمان حاصل از تزریق فشار بالای آزمایشی

شمارهٔ ستون	T1	T2	T3	T4	T5	T6	میانگین
متوسط قطر در بخش ریزدانه (m)	۱/۱۵	۱/۳۵	۱/۰۳	۱/۴۷	۱/۲۳	۱/۰۹	۱/۲۲
متوسط قطر در بخش درشت‌دانه (m)	۱/۱۷	--	--	۱/۳۱	--	۱/۱۳	۱/۲۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

تأثیر پارامترهای تزریق با فشار بالا بر روی قطر ستون‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوری، با ترسیم نمودارهایی در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. به‌منظور بررسی تأثیر تزریق فشار بالا بر روی خواص ژئومکانیکی محیط، آزمایش‌های متعددی پس از تزریق فشار بالای آزمایشی انجام گرفت. متوسط مقاومت فشاری نامحصور برای گمانه‌های T1 تا T6 بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۵ ذکر شده است. نتایج آزمایش برزیلی به‌همراه متوسط مقاومت فشاری نظیر در جدول ۶ آمده است. با توجه به نتایج حاصل مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری به ترتیب ۰/۱، ۰/۵۹ و ۰/۳۳ به‌دست آمدند. جدول ۷ مقایسه بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک محل را در زمان قبل و بعد تزریق نشان می‌دهد.

شکل۶ تاثیر فشار دوغاب را روی مقاومت فشاری تک محوری نشان می‌دهد. خطوط عمود به هر نقطه نشان دهنده خطاهای استاندارد است[۱۶]. در جدول ۸، مقاومت فشاری تک محوری تخمین زده شده برحسب مگاپاسگال با توجه به رابطهٔ موجود در شکل۶ برای ستون‌های ۲، ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۵. متوسط مقاومت فشاری نامحصور ستون‌های خاک– سیمان آزمایشی [۱۴]

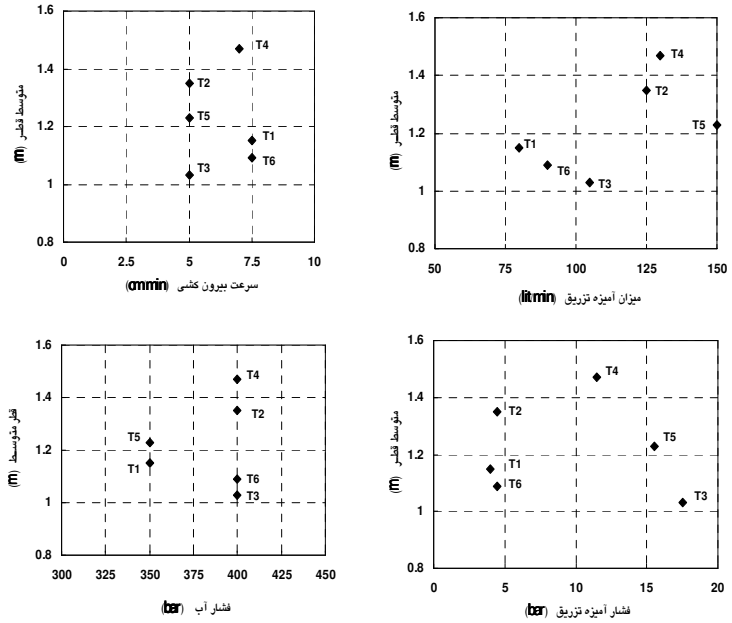
شمارهٔ ستون	T1	T2	T3	T4	T5	T6	میانگین
متوسط مقاومت فشاری نامحصور (kg/cm2)	__	۱۱	۳۱	۱۳	۳۴	۹	۱۹/۶

جدول ۶. نتایج آزمایش برزیلی و مقایسه با مقاومت فشاری نامحصور [۱۴]

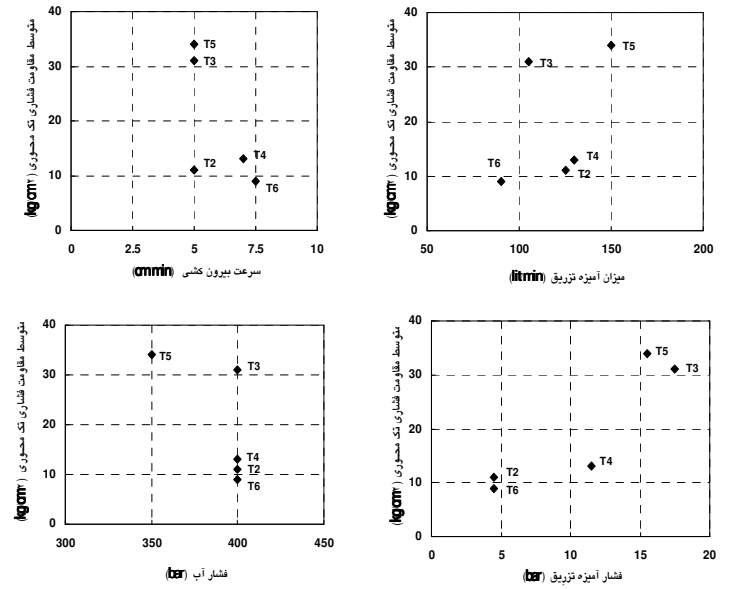
شمارهٔ ستون	نمونه	مقاومت کششی (kg/cm2)	مقاومت فشاری (kg/cm2)	نسبت مقاومت کششی به فشاری
T2	T2-2	۷/۱	۱۲/۶	۰/۵۶
T2	T2-2	۷/۴	۱۲/۶	۰/۵۹
T3	T3-2	۹/۹	۳۸/۶	۰/۲۶
T3	T3-3	۳/۰	۲۴/۴	۰/۱۲
T5	T5-1	۳/۸	۳۸/۶	۰/۱۰
T5	T5-2	۷/۱	۲۱/۱	۰/۳۴

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

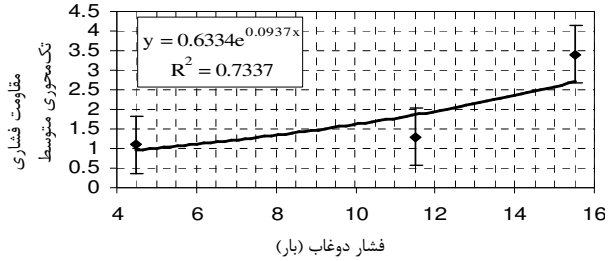


شکل ۴. نمودارهای تغییرات قطر ستون‌های خاک- سیمان نسبت به پارامترهای تزریق



شکل۵. نمودارهای تغییرات مقاومت تک‌محوری ستون‌های خاک-سیمان نسبت به پارامترهای تزریق

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]



شکل ۶. رابطهٔ بین فشار دوغاب و مقاومت فشاری تک‌محوری متوسط

جدول ۷. مقایسهٔ بین پارامترهای فیزیکی مکانیکی خاک، قبل و بعد از عملیات تزریق با فشار بسیار بالا

	قبل از تزریق	بعد از تزریق
UCS (MPa)	۰/۰۲۵–۰/۰۵	۲/۴
c (KPa)	۴۰	۷۷۰
φ (degree)	۰	۲۵
آب محتوا (%)	۳۸	۵۰–۷۵
σt (KPa)	۳/۷۵–۷/۵	۶۴۵

جدول ۸. مقاومت فشاری تک محوری تخمین زده شده

شماره ستون	مقدار مقاومت فشاری تخمین زده شده	مقدار مقاومت فشاری اندازه گیری شده	فشار دوغاب (بار)
T2	۳/۱۳	۱/۱	۴/۵
T4	۷/۹۹	۱/۳	۱۱/۵
T5	۱۰/۷۸	۳/۴	۱۵/۵

در این مرحله با تغییر پارامترهای مؤثر بر تزریق و تعیین قطر ستون‌ها در اعماق مختلف، محدودهٔ تغییرات پارامترهای اجرایی تزریق تعیین شد. با توجه به شکل‌های۴، ۵ و۶ تنها عاملی که روند مشخصی در بهبود مقاومت در ستون تزریق را نشان می‌دهد، افزایش فشار تزریق دوغاب است. یعنی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فشار دوغاب، مقاومت فشاری تک محوری ستون‌های خاک- سیمان به صورت لگاریتمی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به جدول۷ می‌توان نتیجه گرفت تزریق با فشار بسیار بالا باعث افزایش و بهبود شدید پارامترهای ژئومکانیکی خاک محل شده است. بنا بر این برای رسیدن به مقاومت تک‌محوری بالا، پارامترهای تزریق به شرح زیر قابل پیشنهاد است:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

جدول ۹. پارامترهای تزریق اصلی در پی سد شهریار بر اساس نتایج تزریق فشار بالای آزمایشی

فشار آب:	$350bar \le P_w \le 400bar$
دبی دوغاب:	$100\,lit/\min \le Q_g \le 150\,lit/\min$
فشار دوغاب:	$P_g \ge 15bar$
سرعت بالاکشیدن مانیتور تزریق:	$LS = 5 \sim 7.5\,cm/\min$
سرعت دورانی مانیتور تزریق:	$RS = 5 \sim 7.5\,rev/\min$
نسبت آب به سیمان:	$W/C = 0.7$

با توجه به نتایج تزریق آزمایشی و مشکل آب آرتزین، برای دست‌یابی به قطر و مقاومت مورد نیاز در شرایط وجود آب آرتزین تمهیدات زیر، پیشنهاد می‌شود:

- کاهش سرعت بالاآوردن رادهای تزریق به حداقل ۵ سانتی‌متر در دقیقه، در بخش‌های اتصال لایه رس به لایه درشت‌دانه تحتانی در محل سایت اصلی.
- تکرار تزریق در ارتفاع ۱ متر در بخش پایینی لایه رس (در محل اتصال به آبرفت درشت‌دانه یا سنگ هوازده زیر لایه رس).
- افزودن ماسه درشت‌دانه در حین تزریق به‌منظور جلوگیری از خروج بیش از حد دوغاب از گمانه در بخش‌های دارای آب آرتزین.
- توقف رادهای تزریق در محل اتصال رس به لایه‌های درشت‌دانه بالا و پایین رس و همچنین در وسط لایه رس به‌مدت ۰.۵ تا ۱ دقیقه، به‌منظور افزایش قطر ستون‌ها در محل‌های مذکور.
- استفاده از پارامترهای تزریق موجود در جدول ۹ به‌منظور رسیدن به قطر بیش‌تر (بالای ۱.۲ متر).

جدول ۹. پارامترهای تزریق اصلی در پی سد شهریار بر اساس نتایج تزریق فشار بالای آزمایشی

عنوان پارامتر		واحد	مقدار	عنوان پارامتر	واحد	مقدار
آب	دبی	liter/min	۷۰	سرعت بالاکشیدن مانیتور	cm/min	۷ – ۸
	فشار	bar	۳۷۰–۳۹۰	سرعت دوران مانیتور	rev/min	۷ – ۸
دوغاب	دبی	liter/min	۱۲۰–۱۳۰	نسبت آب به سیمان	---	۰/۷
	فشار	bar	۱۰–۱۵	قطر نازل آب	mm	۱/۷
هوا	دبی	m^3/min	۱–۲	تعداد نازل آب	---	۲
	فشار	bar	۶–۸	قطر نازل دوغاب	mm	۷

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

نتیجه‌گیری

تزریق با فشار بسیار بالا یک روش بسیار جذاب و اقتصادی برای کاربردهای متنوع است و در بسیاری از موارد مؤثر بوده است. یکی از مهم‌ترین مزایای روش مذکور این است که این روش در انواع خاک‌ها قابل استفاده است. هم‌چنین به‌کمک این روش مقاومت ستون‌های خاک–سیمان به‌دست آمده، قابل طراحی است. این روش جای‌گزین مناسبی برای روش‌های تزریق معمولی، تزریق شیمیایی، روش ترانشه‌زنی(گراب وبتن پلاستیک)، سیستم شمع‌کوبی، پی‌سازی و یا استفاده از هوای فشرده در روش انجماد در تونل‌سازی است. از مزایای این روش می‌توان به انجام عملیات تزریق در فضای محدود کاری، شروع انجام تزریق از هر ترازی از سطح زمین و اتمام آن در عمق دلخواه، اجرای هر گونه شکل هندسی، قابل اجرا بودن در اطراف تاسیسات زیرزمینی موجود و همچنین ساختمان‌ها و فضاهای شهری و سریع‌تر بودن نسبت به سایر روش‌های جای‌گزین، اشاره کرد. تزریق با فشار بسیار بالا روشی است که در نتیجه آن ستونی از خاک–سیمان با نفوذپذیری پایین و مقاومت بهبود یافته به‌دست می‌آید که نتایج حاصل به عوامل متعددی بستگی دارد. ستون‌های خاک-سیمان ایجاد شده در داخل خاک با این روش از نظر قطر و مقاومت به پارامترهای تزریق، خصوصیات دوغاب و خاک محل وابسته است. بررسی تأثیر هر یک از این عوامل روی خصوصیات ستون‌های خاک-سیمان نیازمند انجام تعداد زیادی تزریق آزمایشی است، به‌گونه‌ای که با تغییر یکی از پارامترها و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، میزان تأثیر پارامترهای مؤثر به‌طور کامل ارزیابی شود. هم‌چنین با توجه به‌این‌که سدهای بتنی باید برروی یک فونداسیون مناسب سنگی اجرا گردند و با توجه به مشکلات وجود یک لایه رس در منطقهٔ تحتانی سایت سد شهریار، بر اساس بررسی‌های مهندسی، فنی و اقتصادی، روش تزریق فشار بالا به‌منظور افزایش ظرفیت باربری پی و کنترل نشست آن در سد شهریار استفاده شد و تعدادی تزریق آزمایشی، به‌منظور مطالعات بیش‌تر و طراحی پارامترهای دقیق در سد شهریار و نیز برای بررسی میزان بهبودی که روش تزریق با فشار بسیار بالا می‌تواند در خاک محل ایجاد کند، اجرا شد. در نتیجه بررسی‌های اخیر می‌توان نتیجه گرفت که در اثر اجرای تزریقات مذکور در سایت سد شهریار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

میزان مقاومت تک محوی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک محل به ترتیب ۶۳۰۰، ۱۸۲۵ و ۲۵۰۰۰ درصد افزایش یافت.

تقدیر و تشکر

در پایان از زحمات مهندسان سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان‌شرقی(آقایان مهندس نیک‌بختان و ممانی)، شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس (آقای دکتر صاحب جمع) و شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک (SES) که در انجام این تحقیق ما را یاری نموده و اطلاعات ارزشمندی را در اختیارمان قرار دادند، تشکر می‌شود. همچنین، پیشاپیش از اساتید و مؤلفان محترم که نشریه را در ارتقای کیفی آن یاری می کنند، سپاس‌گزاریم.

منابع

1. Nonveiller, E.; Grouting in Theory and Practice, Elsevier Pub, (1989).
2. Shroff, A.V. and Shah D.L.;Grouting Technology in Tunneling and Dam Construction, A.A.Balkema , Rotterdam (1999).
3. Schalfer, V.R.;Ground Improvement, Ground Reinforcement, Ground Treatment Development 1987-1997, Geotechnical Special Pub. No–69, 113-129 (1997).
4. Kutzner, C.; Grouting of Rock and Soil; A.A.Balkema, Rotterdam, 1996.
5. Xanthakos, P.P., Abramson, L W. and Bruce, D. A.; Ground Control and Improvement; Wiley, New York (1994).
6. Kaushinger, J.L., Perry, E. B. and Hankour, R. "Jet Grouting:State of the Practice", Proc. ASCE Conf., Grouting, Soil Improvement and Geaosynthetics, Feb 25-28, New Orleans Vol. 1 (1992) 169-181.
7. Hayward Baker Inc.Geotechnical Construction (2004), Www.Haywardbaker.com
8. Poh, T.Y. and Wong, I.H. “A Field Trial of Jet Grouting in Marine Clay”,

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]

Canada Geotech Journal 38 (2001) 338-348.

9. Kaushinger, J.L., Hankour, R. and Perry, E.B.; "Method to Estimate Composition of Jet Grout Bodies", Proc. ASCE Conf., Grouting, Soil Improvement and Geaosynthetics, New Orleans Vol.1(1992) 194-205.
10. Covil, C.S. and Skinner A.E. "Jet grouting a review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process", Grouting in the Ground, Procc. of Conference Organized by the Institution of Civil Engineering and held in London., November, (1992) 605-628.
11. Bell, F. G.; Engineering Treatment of Soil., E & FN Spon (1993).
12. Linson, M.J.T.; Foundation Design and Construction, Longman Scientific and Technical (1995).
13. Bergado, D.T. , Anderson, L.K. , Miura, N. and Balasubramaniam, A.S.; Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments, ASCE Pub (1996).

۱۴. *گزارش تزریق آزمایشی Jet Grouting*، طرح سد شهریار آذربایجان‌شرقی، شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک (SES)،(۱۳۸۴).

۱۵. *گزارس مستندسازی شماره ۶، جت گروتینگ آزمایشی*، طرح سد شهریار، شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، آذر ۸۴.

16. B.Nikbakhtan, M.Osanloo; "Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No. 46 (2009) 498–505.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1388.3.2.7.0]