

## تحلیل کیفیت تزریق با استفاده از منحنی‌های P-Q (فشار-دبی) و شکل مغزه‌ها در عملیات کنترل کیفی تزریق قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub> خط ۲ تونل متروی تهران

عباس مجدی<sup>۱\*</sup>، مسعود ظهیری<sup>۲</sup>، سید رضا سجادی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی معدن، E-mail: amajdi@ut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، شرکت مهندسی خاور تونل، E-mail: mazahiry@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، E-mail: porya\_sajjadi@yahoo.com

(دریافت ۳ آذر ۱۳۸۷، پذیرش ۸ آذر ۱۳۸۸)

### چکیده

حفاری خط ۲ تونل متروی تهران با استفاده از ماشین حفار با سپر محافظ انجام گرفته و سپس به وسیله قطعات بتن آرمه پیش ساخته ۹ قطعه‌ای (۸+۱)، پوشش نگهداری دائمی نصب شد. برای جلوگیری از نفوذ آب‌های اطراف به داخل تونل و تحکیم رسوبات آبرفتی اطراف تونل، از عملیات تزریق سیمانی به عنوان پرده آب‌بند محیطی استفاده شد. پس از اتمام عملیات تزریق در قطعات مختلف تونل، برای ارزیابی کیفیت عملیات تزریق، تعدادی گمانه‌های کنترلی حفر و مغزه‌گیری شد و سپس در همین گمانه‌ها آزمایش‌های فشار آب (لوژان) صورت گرفت. در این مقاله، با تحلیل و تفسیر نمودارهای P-Q حاصل از آزمایش‌های لوژان در تراز مقاطع یک متری اطراف تونل در قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub> و همچنین شکل مغزه‌ها و اعداد لوژان منتسب به هر آزمایش، ضمن ارائه رابطه‌ای جدید، کیفیت عملیات تزریق تونل قطعه مذکور، مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

### کلمات کلیدی

کنترل کیفی آزمایش، تست آب، تزریق سیمانی، تونل مترو تهران، رسوبات آبرفتی

## ۱- مقدمه

تزریق فرآیند راندن و نهشته کردن ماده‌ای خارجی به درون خلل و فرج خاک و سنگ می‌باشد، به گونه‌ای که ویژگیهای مهندسی خاک و سنگ مورد نظر برای سازگاری با اهداف کوتاه و بلند مدت مهندسی اصلاح گردد. تزریق در خاک برای افزایش مقاومت و کاهش نشست خاک پی و نیز جهت ایجاد پرده آببند به منظور جلوگیری از نشست‌های غیرمجاز به داخل تونل‌ها یا فضاهای زیرزمینی صورت می‌گیرد [۱].

به منظور کنترل کیفی تزریق‌های انجام شده و ارزیابی نفوذپذیری برجا محیط تزریق شده معمولاً از آزمایش فشار آب یا لوژان استفاده می‌شود.

در آزمایش لوژان قسمتی از طول گمانه با پکر مسدود و آب با فشار به آن تزریق می‌شود (شکل ۱). نفوذپذیری محیط بر اساس نرخ خوردن آب، فشار آزمایش و طول مقطع آزمایش بصورت رابطه ۱ تعیین می‌شود [۲].

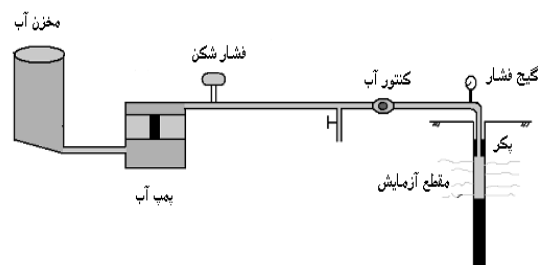
$$Lu = \frac{10Q}{P} \quad (1)$$

که در آن:

$Q$  = میزان آب بر حسب لیتر بر متر بر دقیقه

$P$  = بالاترین فشار موثر در آزمایش (بار)

$Lu$  = مقدار لوژان



شکل ۱: نمای کلی آرایش تجهیزات آزمایش لوژان

ترسیم نمودارهای فشار-دبی (P-Q) در آزمایشات لوژان می‌تواند راهنمای خوبی برای درک رفتار جریان توده تزریق شده باشد. این نمودارها به صورت وسیعی در عملیات تزریق مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کاتزرن<sup>۱</sup> بر اساس تجربیات خود نمودارهای P-Q حاصل از آزمایشات لوژان را به ۵ دسته تقسیم نمود (جدول ۱) [۳]. به عقیده اورت<sup>۲</sup> نمودارهای P-Q نه تنها ابزار مفیدی جهت نشان دادن نفوذپذیری هستند، بلکه معرف رفتار تغییرشکل زمین نسبت به فشار نیز می‌باشند (جدول ۱) [۴].

مجدی- محمودی در سال ۲۰۰۲ میلادی برای اولین بار آزمایش لوژان را در خاک تزریق شده خط ۱ تونل متروی

تهران، بر روی ۸۳ گمانه تزریقی انجام دادند. طبقه‌بندی صورت گرفته بر اساس آزمایش لوژان شامل ۷ نمودار P-Q بوده که ۳ نمودار آن مشابه رفتار سنگی و ۴ نمودار در محیط‌های خاکی تزریق شده تحلیل گردید [۵].

هولسی<sup>۳</sup> نیز بر اساس ۸۱۱ آزمایش لوژان انجام شده رفتارهای مختلف را طبقه‌بندی نموده و بر اساس آن عدد لوژان معرف برای هر نوع رفتار را پیشنهاد کرد [۶]. جدول ۱ طبقه‌بندی‌های ارائه شده توسط تعدادی از محققین برای نمودارهای P-Q حاصل از آزمایشات لوژان را نشان می‌دهد [۳]، [۴]، [۵]، [۶] و [۷].

۲- عملیات تزریق قطعه  $S_2-X_2$  خط ۲ متروی تهران

قطعه  $S_2-X_2$  در خط ۲ تونل متروی تهران (حد فاصل چهار راه سبلان تا دردشت) در دل رسوبات آبرفتی شهر تهران قرار گرفته است. از دیدگاه زمین‌شناسی به دلیل قرارگیری این قطعه به موازات رشته کوه البرز تغییرات سازندهای زمین ساختی آن چندان محسوس نیست. خاک‌ها از شن و ماسه غیر یکنواخت نسبتاً متراکم تشکیل گردیده که دارای آژند ضعیف می‌باشد. درصد شن و ماسه در قسمت‌های مختلف متفاوت بوده، به طوری که در بعضی از نقاط به قلوه سنگ و حتی تخته سنگ نیز برخورد شده است [۸].

حفاری خط ۲ تونل متروی تهران با استفاده از ماشین حفار با سپر محافظ انجام گرفته و سپس توسط قطعات بتن‌آرمه پیش‌ساخته ۹ قطعه‌ای (۸+۱)، پوشش نگهداری دائمی نصب شد. جهت آب‌بندی و جلوگیری از یورش آب‌های سطحی و فاضلاب‌ها به داخل تونل و همچنین تحکیم رسوبات آبرفتی اطراف تونل از عملیات تزریق به سه روش ذیل استفاده گردید:

۱- تزریق اتصالی: هدف از این تزریق پر کردن فضای خالی بین پوشش نگهداری تونل و خاک‌های اطراف بوده است.

۲- تزریق نفوذی: در این روش آمیزه تزریق به داخل فضاهای خالی و حفرات خاک تزریق می‌گردد. از این تکنیک، برای کنترل جریان آب به داخل تونل و یا بهبود ساختار خاک، استفاده می‌شود. عمق گمانه‌ها ۴۰ سانتی‌متر پشت پوشش نگهداری تونل بود.

۳- تزریق تحکیمی: این روش با هدف استحکام بخشیدن زمین‌های سست و یا زمین‌های آبدار اجرا می‌شد و در این مرحله فقط قسمت فوقانی تونل تزریق می‌گردید. عمق گمانه‌ها در این مرحله متغیر بوده و از ۸۰ سانتی‌متر پشت پوشش نگهداری در قسمت‌های پایین تا ۱۵۰ سانتی‌متر در راس تونل تغییر می‌کرد.

جدول ۱: طبقه‌بندی‌های ارائه شده مختلف برای نمودارهای P-Q

					طبقه بندی کاتزنر [۳] (۱۹۹۶)
پرسدن خلل و فرج	فرسایش ترکها	تغییر شکل الاستیک	جریان آشفته	جریان آرام	
					طبقه بندی اورت [۴] (۱۹۹۴)
سنگ با تراوایی بسیار متغیر	سنگ با تراوایی بسیار متغیر	سنگ با تراوایی تغییر ناپذیر	سنگ با تراوایی متغیر	سنگ ناتراوا	
					طبقه بندی اورت [۴] (۱۹۹۴)
	سنگ با تراوایی تغییر ناپذیر	سنگ با تراوایی تغییر ناپذیر	سنگ با تراوایی متغیر	سنگ با تراوایی بسیار متغیر	
					طبقه بندی ISRM [۷] (۱۹۹۶)
بسته شدن درزه‌ها	فرسایش درزه‌ها	شکست هیدرولیکی	جریان آشفته	جریان آرام	
					طبقه بندی ISRM [۷] (۱۹۹۶)
				جریان احتمالی اطراف پکر	
					طبقه بندی مجدی-محمودی [۵] (۲۰۰۲)
سمتاسیون ناقص ذرات	سمتاسیون ناقص ذرات	کمبود مسیرهای زهکش	شستشوی مواد ریزدانه	جریان آرام	
راهنما L = فشار کم M = فشار متوسط P = فشار ماکزیمم عدد لوژان					طبقه بندی مجدی-محمودی [۵] (۲۰۰۲)
	استحکام آبرفت در فشارهای پایین		استحکام آبرفت در فشارهای بالا		
					طبقه بندی هولسبی [۶]
پر شدن درزه‌ها	آبشست	اتساع	جریان آشفته	جریان خطی	
کمترین مقدار لوژان عدد لوژان معرف است	بیشترین مقدار لوژان عدد لوژان معرف است	میانگین مقدار لوژان در فشارهای کم و متوسط عدد لوژان معرف است	مقدار لوژان در فشار ماکزیمم عدد لوژان معرف است	میانگین ۵ پله عدد لوژان معرف است	

رسوبات آبرفتی بوسیله پر شدن مواد تزریقی مابین ذرات خاک که باعث کاهش تخلخل و بسته شدن مسیرهای هیدرولیکی می‌شود و افزایش مقاومت در اثر سمناسیون ذرات سیمان با ذرات خاک انجام می‌گیرد. بنابراین رفتار خاک پس از تزریق بطور محسوسی تغییر کرده بطوری‌که رفتار شبه سنگی یا شبه بتنی پیدا می‌کند. جدول ۲ تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی خط ۲ تونل متروی تهران قبل و بعد از تزریق را نشان می‌دهد. شکل ۴ زون خاک تزریق شده پشت پوشش نگهداری سگمنتی را در عملیات تزریق قطعه  $S_2-X_2$  نشان می‌دهد.

۲- به دلیل انجام موفقیت‌آمیز آزمایشات لوژان در خاک تزریق شده در عملیات تزریق خط ۱ و شرایط مشابه خاک و نوع تزریق خط ۱ با خط ۲ در عملیات کنترل کیفیت تزریق خط ۲ نیز مشابه خط ۱ از آزمایشات لوژان استفاده گردید.

نحوه اجرای آزمایش لوژان بدین صورت بود که ابتدا گمانه‌های انتخاب شده برای آزمایش به اندازه یک متر حفاری و مغزه‌گیری شده و سپس با نصب پکر و لوله مشبک داخل گمانه تزریق آب با فشار بصورت پله‌ای و از فشار ۰ تا ۶ بار انجام می‌گرفت. برای هر پله حداقل ۳ قرائت انجام می‌شده و در صورتی‌که اختلاف بین دو قرائت از ۵ درصد کمتر بود، فشار آزمایش تغییر می‌کرد.

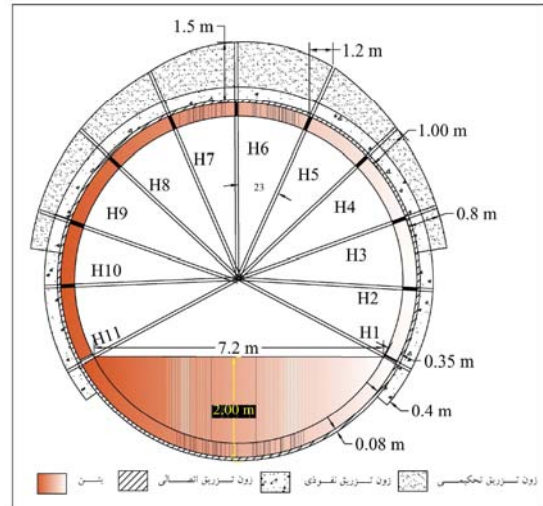
شکل ۵ مراحل افزایش (مرحله رفت) و کاهش فشار (مرحله برگشت) در آزمایشات لوژان انجام شده در قطعه  $S_2-X_2$  خط ۲ متروی تهران را نشان می‌دهد.

شکل ۶ نحوه حفر گمانه جهت مغزه‌گیری و اجرای آزمایش لوژان در قطعه  $S_2-X_2$  را نشان می‌دهد.

در این مقاله تعداد ۱۵۵ مورد از آزمایشات لوژان انجام گرفته در قطعه  $S_2-X_2$  مورد بررسی قرار گرفت و نمودارهای P-Q (فشار-دبی) ترسیم و در شکل‌های مختلف طبقه‌بندی شده‌اند که رفتار رسوبات تزریق شده برای هر نوع نمودار بطور مفصل تحلیل می‌گردد.

شکل ۲ زون تزریق ایجاد شده اطراف تونل قطعه  $S_2-X_2$  خط ۲ متروی تهران حاصل از تزریق‌های سه گانه اتصالی، نفوذی و تحکیمی را نشان می‌دهد.

شکل ۳ پروفیل زمین‌شناسی در مسیر تونل قطعه  $S_2-X_2$  خط ۲ متروی تهران را نشان می‌دهد.



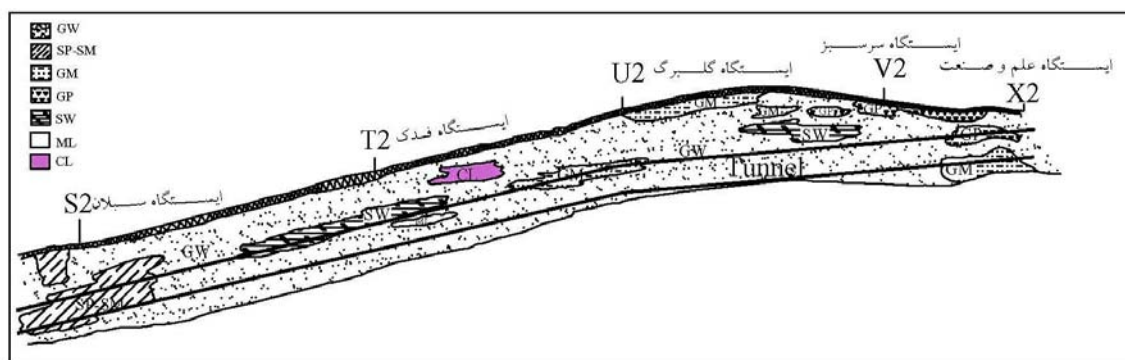
شکل ۲: زون تزریق اطراف تونل

### ۳- اجرای آزمایشات لوژان در عملیات کنترل کیفی

#### تزریق قطعه $S_2-X_2$ خط ۲ متروی تهران

به منظور کنترل کیفی تزریق‌های انجام شده و ارزیابی نفوذپذیری برجا مواد تزریقی و آبرفت‌های تزریق شده اطراف تونل در قطعه مذکور از آزمایش لوژان استفاده گردید. روش معمول در تعیین نفوذپذیری برجا خاک‌ها معمولاً روش لوفران می‌باشد و از روش لوژان معمولاً جهت تعیین نفوذپذیری سنگ‌ها استفاده می‌شود. ولی به دلایل ذیل در قطعه مذکور آزمایشات لوژان انجام گرفت:

۱- از اهداف مهم تزریق، کاهش آبگذرانی رسوبات آبرفتی و افزایش مقاومت رسوبات بعد از تزریق می‌باشد. کاهش آبگذرانی



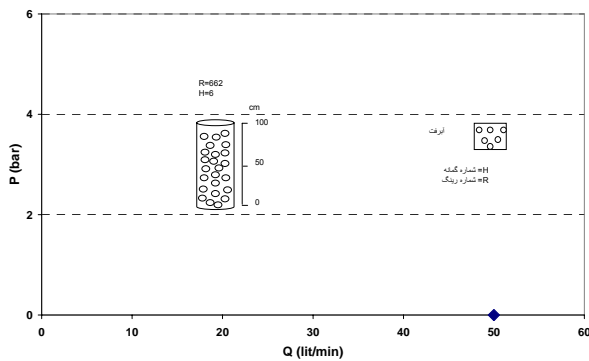
شکل ۳: پروفیل زمین‌شناسی قطعه  $S_2-X_2$  خط ۲ متروی تهران

جدول ۲: تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی خط ۲ تونل متروی تهران قبل و بعد از تزریق

مرجع	Average $\nu$	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	Average E (GPa)	C (MPa)	$\phi$ (درجه)	پارامترها
						نوع خاک
[۸]	۰/۲۷	۱/۷-۲	۰/۱۷	۰/۰۱-۰/۰۴	۳۴-۳۸	خاک قبل از تزریق
[۹]	۰/۱۶	۱/۷-۲/۵	۱۸/۱۴	۲/۳-۷/۶	۴۷/۱-۶۷/۷	خاک بعد از تزریق

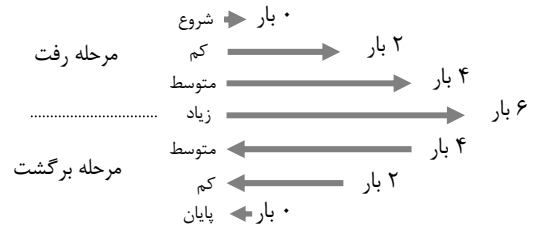
## حالت ۱: خاک تزریق نشده

رفتار جریان در این حالت نشان می‌دهد که خاک تزریق نشده همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در فشار صفر، میزان دبی ثابت و برابر با ظرفیت پمپاژ می‌باشد. در این حالت به علت بالا بودن خوردن آب و عدم فشارگیری، عملاً آزمایش لوژان معیار مناسبی برای تعیین نفوذپذیری نمی‌باشد (طبق رابطه ۱ عدد لوژان بی‌نهایت می‌گردد) و باید از دیگر روش‌های تعیین نفوذپذیری خاک مانند لوفران استفاده نمود. نمودار P-Q در این حالت یک نقطه روی محور Q را نشان می‌دهد (زیرا فشار صفر است) که آن نقطه نشان‌دهنده نرخ پمپاژ خواهد بود.



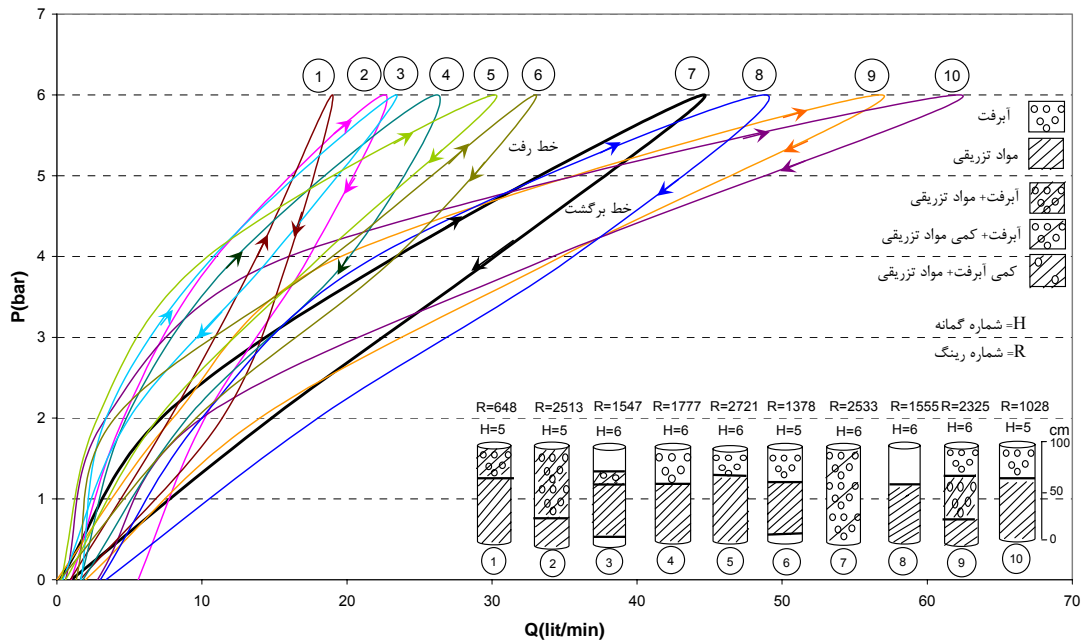
شکل ۷: شکل تبیین مغزه و نمودار P-Q برای حالتی که خاک تزریق نشده است.

حالت ۲: تخریب سمنتاسیون ضعیف بین خاک و مواد تزریقی در این حالت میزان دبی آب در فشار رفت کمتر از میزان دبی آب در فشار برگشت معادل آن می‌باشد. (خط رفت و برگشت در نمودار شماره ۷ شکل ۸) در این شرایط، آبخوری نسبت به آبرفت خالص، به طور مشخصی کمتر بوده ولی نسبت به دیگر حالت‌ها آبخوری نسبتاً بالا می‌باشد. این رفتار نشانگر شستشوی مواد سست و ریزدانه از لابه‌لای ذرات درشت‌تر آبرفت و تخریب سمنتاسیون ضعیف بین ذرات آمیزه تزریق شده و ذرات خاک می‌باشد. بنابراین اینگونه رفتار بیانگر استحکام خاک تزریق شده در حالت عادی و عدم مقاومت کافی در برابر فشار آب می‌باشد. در این حالت مواد تزریق شده به آبرفت باعث استحکام کافی آن نشده و فقط خاصیت پرکنندگی را دارا می‌باشند، به همین دلیل نفوذپذیری خاک در حالت معمولی کمتر شده ولی در مقابل فشار آب، نفوذپذیر است.

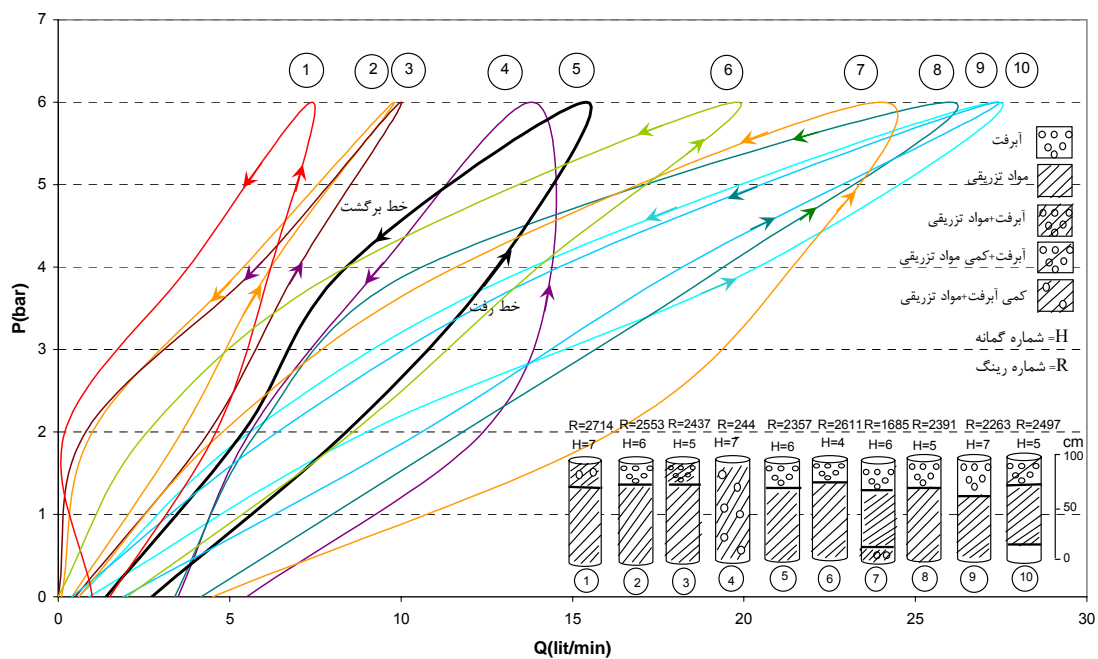
شکل ۴: زون خاک تزریق شده در عملیات تزریق قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub>شکل ۵: مراحل افزایش و کاهش فشار بصورت پله‌ای در آزمایشات لوژان انجام شده در قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub>شکل ۶: حفر گمانه جهت مغزه‌گیری و اجرای آزمایش لوژان خط ۲ تونل متروی تهران S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub> در قطعه

تخریب اتصالات آنها و ایجاد مسیرهای زهکش جدید نبوده، بنابراین مسیرهای زهکش موجود در مرحله رفت پر می‌گردد، لذا پس از کاهش فشار در مرحله برگشت تمایل آب به بازگشت به داخل گمانه می‌باشد. این رفتار نشان دهنده گسترش مناسب آمیزه تزریق در اطراف گمانه مورد آزمایش و نمایش دهنده محیطی مطلوب از نظر آب‌بندی و تحکیم می‌باشد.

حالت ۳: کمبود مسیرهای زهکش و پر شدن آنها در این حالت دبی آب در مرحله رفت بیشتر از دبی آب در مرحله برگشت (خط رفت و برگشت در نمودار شماره ۶ شکل ۹) بوده که این رفتار حاکی از کمبود مسیرهای زهکش و تمایل آب به بازگشت به سمت گمانه می‌باشد. به علت استحکام خوب آبرفت تزریق شده، فشار آب قادر به شستشو و



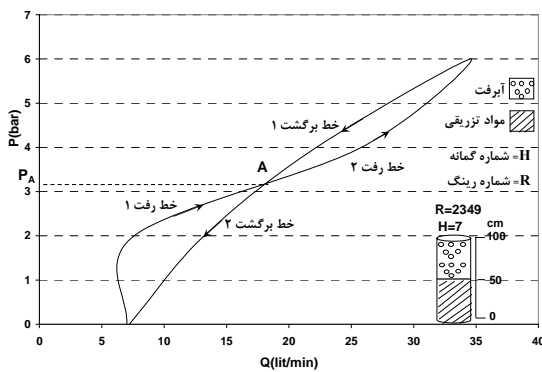
شکل ۸: شکل مغزه‌ها و نمودارهای P-Q مویب تخریب سمناسیون ضعیف و شستشوی مواد ریز دانه در آزمایشات لوژان صورت گرفته در عملیات کنترل کیفی قطعه  $S_2-X_2$



شکل ۹: شکل مغزه‌ها و نمودارهای P-Q مویب کمبود مسیرهای زهکش و پر شدن آنها بوسیله آب در آزمایشات لوژان صورت گرفته در عملیات کنترل کیفی قطعه  $S_2-X_2$



حالت ۴: شکست هیدرولیکی و تخریب کامل در این حالت وقتی اندازه فشار به فشار بحرانی (Pc) در شکل ۱۰ رسید، به علت شکست هیدرولیکی، فشار به طور ناگهانی افت کرده و همزمان با این افت، میزان خوردن به طور غیرمتعارف افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، همزمان با شکست هیدرولیکی، مجاری‌های جدید با گذردهی هیدرولیکی بالا بوجود آمده که باعث فرار آب و بالا رفتن آبخوری شده و در نتیجه موجب افت فشار می‌شود. تفاوت این حالت با حالت ۲ در نوع رفتار مواد تزریقی در خاک می‌باشد. در حالت ۲ شکست اتفاق نمی‌افتد و فقط انتقال مواد ریزدانه و تخریب سمنتاسیون ناقص رخ می‌دهد. ولی در این حالت شکست ایجاد شده و مسیرهای جدید با ظرفیت هیدرولیکی بالا به سمت آبرفت خالص باز می‌گردد. این رفتار نشانگر مقاومت خاک تزریق شده تا قبل از رسیدن به فشار بحرانی می‌باشد و اندازه فشار بحرانی موید مقاومت خاک تزریق شده و میزان آبخوری بعد از شکست، اثر شکست را نشان می‌دهد. با این نمودار می‌توان فشار بحرانی آب‌های نفوذی را نیز تخمین زد.

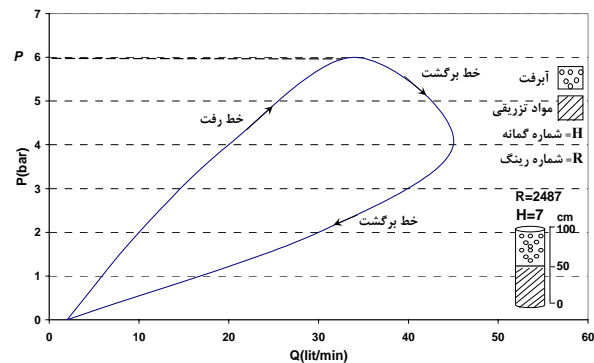


شکل ۱۱: شکل مغزه و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار پایین‌تر از فشار ماکزیمم (فشار در نقطه A) در آزمایشات لوژان صورت گرفته در قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub>

حالت ۶: تخریب ناقص در فشار ماکزیمم شکل نمودار در این حالت برعکس حالت ۵ می‌باشد (شکل ۱۲) ولی دلیل بر رفتار متضاد محیط در این دو حالت نیست. این حالت نشان می‌دهد که در فشارهای بالاتر از فشار نقطه A (P<sub>A</sub>) مسیرهای زهکش جدید با گذردهی هیدرولیکی کم باز می‌شوند که باعث افزایش خوردن در فشار برگشت می‌گردند. ولی به دلیل اشباع سریع این مسیرها خوردن کاهش پیدا کرده و در پایین نقطه A خط برگشت بالاتر از خط رفت می‌شود. این حالت نشان دهنده استحکام خوب خاک تزریق شده بوده و هر چه نقطه A در فشار بالاتر باشد نشان‌دهنده استحکام بیشتر خاک تزریق شده می‌باشد.

حالت ۷: آبخوری ثابت در فشارهای بالا شکل نمودار در این حالت (شکل ۱۳) شبیه حالت ۶ می‌باشد فقط بعد از نقطه A به سمت فشار ماکزیمم خطوط رفت و برگشت بر هم منطبق می‌گردند. این امر بدین معنی است که در فشارهای بالاتر تغییر محسوسی در وضعیت رسوبات تزریق شده به وجود نمی‌آید. بنابراین رسوبات تزریق شده در این حالت نسبت به حالت قبل مستحکم‌تر می‌باشند. خط رفت قبل از شروع انطباق خطوط، منافذ و خلل و فرج را اشباع کرده و فقط

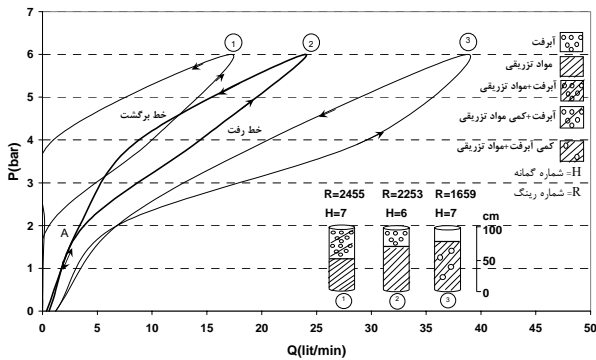
حالت ۵: تخریب ناقص در فشار پایین‌تر از فشار ماکزیمم در این حالت در یک فشار قبل از فشار نهایی یک نقطه تلاقی (نقطه A در شکل ۱۱) وجود دارد که ماهیت نمودارها قبل و بعد از این نقطه تفاوت دارد. قبل از نقطه A ماهیت نمودار شبیه حالت ۲ و بعد از نقطه A ماهیت نمودار شبیه حالت ۳ می‌باشد. این روند را بدین صورت می‌توان تحلیل کرد که فشار در نقطه A باعث ایجاد تخریب‌های موضعی در خاک تزریق شده می‌گردد. به همین علت میزان آبخوری در مرحله رفت بعد از نقطه A افزایش می‌یابد (خط رفت ۲ در شکل ۱). به دلیل



شکل ۱۰: شکل مغزه و نمودار P-Q موید شکست هیدرولیکی در آزمایشات لوژان صورت گرفته در عملیات کنترل کیفی قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub>

حالت ۵: تخریب ناقص در فشار پایین‌تر از فشار ماکزیمم در این حالت در یک فشار قبل از فشار نهایی یک نقطه تلاقی (نقطه A در شکل ۱۱) وجود دارد که ماهیت نمودارها قبل و بعد از این نقطه تفاوت دارد. قبل از نقطه A ماهیت نمودار شبیه حالت ۲ و بعد از نقطه A ماهیت نمودار شبیه حالت ۳ می‌باشد.

این روند را بدین صورت می‌توان تحلیل کرد که فشار در نقطه A باعث ایجاد تخریب‌های موضعی در خاک تزریق شده می‌گردد. به همین علت میزان آبخوری در مرحله رفت بعد از نقطه A افزایش می‌یابد (خط رفت ۲ در شکل ۱). به دلیل



شکل ۱۱: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار کمتر از فشار ماکزیمم (فشار در نقطه A) در آزمایشات لوژان قطعه  $S_2-X_2$

حالت ۹: استحکام خاک تزریق شده

در این حالت هیچ تغییری در وضعیت رسوبات تزریق شده رخ نمی‌دهد و میزان آب خروجی یا جذب شده یکسان است (شکل ۱۵). این حالت نشان دهنده استحکام کافی آبرفت است که فشارهای اعمالی قادر نمی‌باشد هیچ‌گونه تغییری در ماهیت آبرفت تزریق شده ایجاد نماید.

حالت ۱۰: خاک کامل تزریق شده

در این حالت رسوبات بطور کامل تزریق شده‌اند و محیط دارای تخلخل بسیار ناچیزی خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۱۶ نیز مشاهده می‌شود افزایش و کاهش فشار تأثیری در میزان جذب آب ندارد و میزان دبی در تمام فشارها صفر و یا در حد صفر می‌باشد. در این حالت رسوبات آبرفتی خاصیت یک بتن کامل یا توده سنگ یکپارچه با خاصیت آنگذرنایی بسیار ناچیز را دارند.

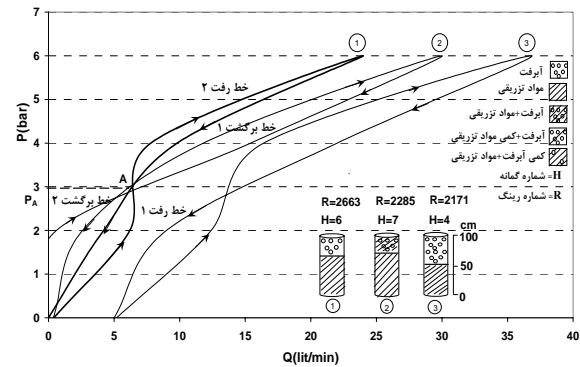
#### ۴- تعیین کیفیت تزریق با استفاده از شکل مغزه‌ها

نحوه گسترش آمیزه تزریق در خاک‌ها عامل مهمی در کیفیت توده تزریق شده است. هرچه میزان گسترش آمیزه تزریق در خاک بیشتر باشد، نفوذپذیری کاهش و مقاومت افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که هر دو عامل در روند بهبود کیفیت موثر هستند. نوع نمودار فشار-دبی و اعداد لوژان نیز به این پارامتر وابسته است. بنابراین می‌توان از شکل مغزه که موید میزان گسترش ماده تزریقی در توده خاک می‌باشد، کیفیت توده تزریق شده، نوع نمودار فشار-دبی و محدوده اعداد لوژان را تخمین زد. معمولاً یک مغزه حاصل از خاک تزریق شده ترکیبی از یک یا چند حالت ذیل می‌باشد:

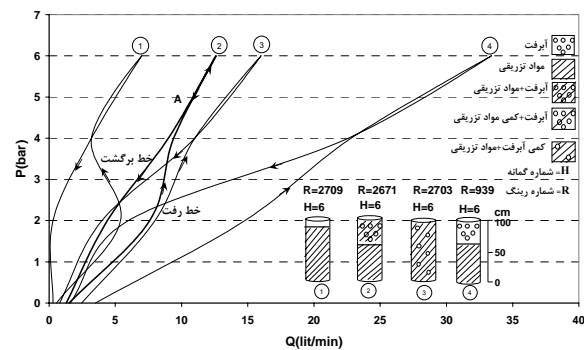
۱- مغزه کاملاً از ماده تزریقی تشکیل شده است.

۲- مغزه بصورت ترکیبی از ماده تزریق و خاک بوده که در این حالت نسبت ماده تزریقی در این ترکیب بسیار مهم می‌باشد.

تعداد محدودی مسیر هیدرولیکی باقی می‌ماند که آنگذرنایی ثابتی دارد و به همین دلیل خطوط رفت و برگشت بر هم منطبق می‌شوند. ولی در زیر نقطه انطباق بدلیل پر شدن خلل و فرج در مرحله رفت، خط برگشت بالاتر از خط رفت قرار می‌گیرد. در شکل ۱۳ هر چه نقطه شروع انطباق خطوط در فشار کمتری باشد نشانه استحکام بهتر خاک تزریق شده است.



شکل ۱۲: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار ماکزیمم در آزمایشات لوژان صورت گرفته در قطعه  $S_2-X_2$



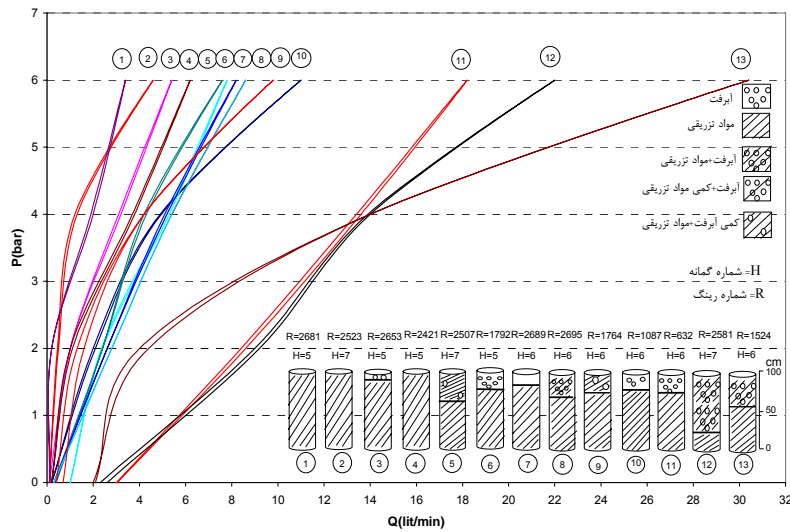
شکل ۱۳: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار ماکزیمم در عملیات کنترل کیفی قطعه  $S_2-X_2$

حالت ۸: آبخوری ثابت در فشارهای پایین

این حالت برعکس حالت ۷ و شبیه حالت ۵ است با این تفاوت که قبل از نقطه A خطوط رفت و برگشت بر هم منطبق هستند (شکل ۱۴). در این حالت در یک فشار معین به سمت فشار مینیمم خطوط رفت و برگشت بر هم منطبق شده‌اند. این حالت نشان می‌دهد که فشار در نقطه انطباق باعث تخریب و شستشو شده که این مسیرها در خط برگشت پر شده و مجدداً محیط به حالت قبلی بر می‌گردد. در این حالت برعکس حالت ۷ هر چه نقطه انطباق در فشار بالاتری باشد بیان‌گر استحکام بهتر خاک تزریق شده می‌باشد.

بطور کلی هرچه طول خطوط منطبق شده رفت و برگشت در هر دو حالت ۷ و ۸ بیشتر باشد، از نظر استحکام و نفوذپذیری دارای شرایط بهتری است.





شکل ۱۵: شکل مغزه ها و نمودار P-Q موید استحکام خاک تزریق شده در آزمایشات لوزان قطعه

1: این حالت مبین ترکیب ماده تزریقی با کمی آبرفت می باشد که در این حالت  $C_1=0.75$

2: این حالت مبین ترکیب ماده تزریقی با آبرفت تقریباً مساوی می باشد که در این حالت  $C_2=0.5$

3: این حالت مبین ترکیب کمی ماده تزریقی با آبرفت می باشد که در این حالت  $C_3=0.25$

شکل ۱۷ انواع حالت های مختلف شکل مغزه در یک توده خاک تزریق شده را بصورت شماتیک نشان می دهد.

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	خاک
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	

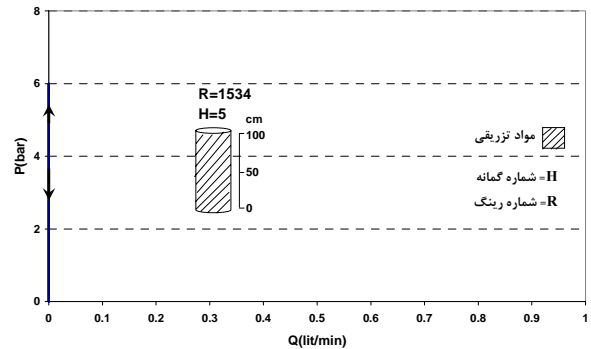
شکل ۱۷: انواع حالت های مختلف شکل مغزه در یک توده خاک تزریق شده

هرچه مقدار GSQ کمتر باشد نشان دهنده گسترش کم ماده تزریقی در خاک بوده که این عامل مبین کیفیت پایین توده تزریق شده می باشد. برعکس حالت فوق هرچه مقدار GSQ بالا باشد مبین کیفیت بالای توده تزریق شده است. بسته به محدوده عددی GSQ می توان کیفیت خاک تزریق شده را به صورت جدول ۳ طبقه بندی کرد.

جدول ۳: طبقه بندی کیفیت خاک تزریق شده با استفاده از

محدوده عددی GSQ

ضعیف	متوسط	خوب	عالی
$GSQ < 50$	$50 \leq GSQ < 70$	$70 \leq GSQ < 90$	$90 \leq GSQ < 100$



شکل ۱۶: شکل تیپیک مغزه و نمودار P-Q موید استحکام خاک کامل تزریق شده در آزمایشات لوزان قطعه S<sub>2</sub>-X<sub>2</sub>

۳- مغزه حاوی خاک بدون ماده تزریقی می باشد.

۴- مغزه خالی است که می تواند حاصل از آب اندازی ماده تزریقی باشد.

رابطه تجربی ۲ درصد کیفی تزریق را با استفاده از شکل مغزه ها که بر اساس آنالیز ۱۵۵ نمونه مغزه گیری شده در عملیات کنترل کیفی خط ۲ متروی تهران نتیجه شده، نشان می دهد:

$$GSQ = \frac{A + \sum_{i=1}^3 (B_i \times C_i)}{L} \times 100 \quad (2)$$

که در آن

GSQ: درصد کیفی تزریق

L: طول کل مغزه (Cm)

A: طولی از مغزه که بطور کامل ماده تزریقی باشد (Cm)

B<sub>i</sub>: طولی از مغزه که ترکیبی از ماده تزریقی و خاک باشد (Cm)

C<sub>i</sub>: نسبت ماده تزریقی در مقطع B<sub>i</sub>

طریقه تعیین عدد لوژان هر آزمایش بدینصورت می باشد که ابتدا دبی متوسط برای هر پله فشار محاسبه شده و بر اساس آن، عدد لوژان در هر پله فشار طبق رابطه ۱ بدست می آید. بعد از تعیین عدد لوژان در هر پله فشار، طبق روش پیشنهادی هولسبی (جدول ۱) سطر آخر) عدد لوژان معرف هر آزمایش محاسبه می شود.

جدول ۴ نمودارهای فشار- دبی بدست آمده در این مقاله را به همراه شکل مغزه ها، اعداد لوژان و GSQ منتسب به هر نوع نمودار را نشان می دهد. با رسم نمودار عدد لوژان و GSQ برای هر گمانه با خطای بسیار کم می توان بین عدد لوژان و GSQ کیفیت تزریق به صورت شکل ۱۸ ارتباط برقرار نمود. از جدول ۴ و شکل ۱۸، جدول ۵ نتیجه می شود.

#### ۶- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل صورت گرفته در این مقاله از ۱۵۵ مورد آزمایشات لوژان و مغزه های گرفته شده در عملیات کنترل کیفی قطعه  $S_2-X_2$  خط ۲ تونل متروی تهران موارد ذیل نتیجه گیری شده است:

- خاک های تزریق شده رفتار شبه سنگ یا شبه بتنی داشته و می توان از آزمایشات لوژان جهت ارزیابی نفوذپذیری و کیفیت تزریق بهره گرفت.
- با تحلیل نمودارهای P-Q می توان رفتار خاک تزریق شده را بررسی کرده و بر اساس آن کیفیت تزریق انجام شده را تخمین زد.

به طور مثال در شکل ۱۷ با فرض یک نمونه مغزه بطول صد سانتی متر که به ۵ قسمت مساوی تقسیم شده GSQ بصورت ذیل محاسبه می گردد.

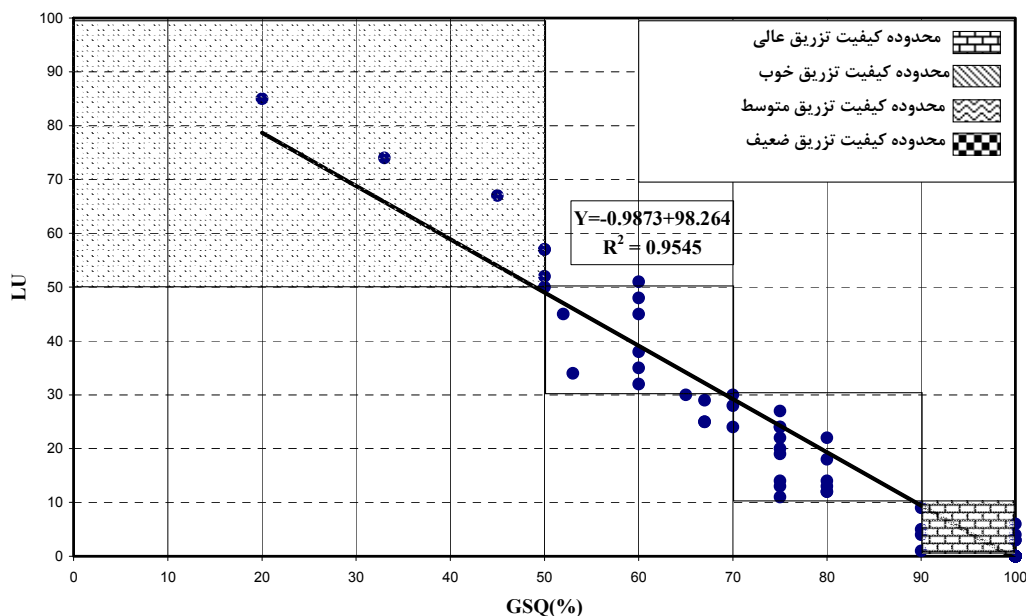
$$GSQ = \frac{A + [(B_1 \times C_1) + (B_2 \times C_2) + (B_3 \times C_3)]}{L} \times 100$$

$$GSQ = \frac{20 + [(20 \times 0.75) + (20 \times 0.5) + (20 \times 0.25)]}{100} \times 100 = 50$$

جواب حاصل نشان می دهد که GSQ برابر ۵۰ شده که با استفاده از جدول ۳ می توان نتیجه گرفت که کیفیت خاک تزریق شده متوسط می باشد.

#### ۵- تعیین رابطه بین GSQ و کیفیت تزریق با عدد لوژان و نوع نمودار P-Q

از عدد لوژان در عملیات تزریق به عنوان یک معیار در سنجش نفوذپذیری و کنترل کیفی تزریق می توان استفاده نمود. از طرفی در بخش قبل میزان گسترش آمیزه تزریق در خاک به عنوان یک پارامتر کنترل کیفی تعریف گردید. بدیهی است هرچه گسترش آمیزه تزریق در خاکی بیشتر باشد نفوذپذیری کاهش و مقاومت افزایش یافته که هر دو عامل فوق باعث کاهش عدد لوژان می گردد. بنابراین بین شکل مغزه که گویای گسترش آمیزه تزریق می باشد و عدد لوژان می توان رابطه ای برقرار نمود. با ترسیم شکل مغزه ها و محاسبه GSQ برای هر مغزه و همچنین محاسبه عدد لوژان برای آنها می توان ارتباطی بین GSQ و عدد لوژان و نوع نمودار فشار- دبی را بدست آورد.



شکل ۱۸: رابطه بین عدد لوژان و GSQ و محدوده کیفیت تزریق

جدول ۴: نمودارهای P-Q با شکل مغزه‌ها، اعداد لوژان و GSQ متناسب به هر نوع نمودار

نوع نمودار	تعداد	شکل مغزه، عدد لوژان و GSQ															
		LU	-														
	۶	GSQ	0														
		مغزه															
	۱۰	LU	57	51	27	45	35	52	74	85	67	48					
		GSQ	50	60	68	60	70	50	33	20	45	60					
		مغزه															
	۱۰	LU	1	18	4	25	24	13	24	29	32	28					
		GSQ	90	80	90	67	70	80	75	67	60	70					
		مغزه															
	۱	LU	50														
		GSQ	50														
		مغزه															
	۱	LU	57														
		GSQ	50														
		مغزه															
	۳	LU	24			21		45									
		GSQ	75			85		52									
		مغزه															
	۴	LU	22				12		20		30						
		GSQ	75				75		75		65						
		مغزه															
	۳	LU	25			19		34									
		GSQ	67			75		53									
		مغزه															
	۱۳	LU	3	4	5	6	11	12	13	14	9	14	30	38	22		
		GSQ	100	100	95	100	80	80	80	70	90	80	65	75	80		
		مغزه															
	۱۰۴	LU	0														
		GSQ	100														
		مغزه															

جدول ۵: رابطه تجربی بین کیفیت تزریق با محدوده عدد لوژان، GSQ و نوع نمودار

کیفیت تزریق	GSQ	LU	نوع نمودار	تعداد حالتها	(درصد) $S_2-X_2$ کیفیت تزریق قطعه
عالی	$GSQ \leq 90 < 100$	$LU \leq 10$	۹ و ۱۰	۱۱۱	۷۱/۶
خوب	$GSQ \leq 90 < 70$	$LU < 10 \leq 30$	۳، ۶، ۷، ۸ و ۹	۱۹	۱۲/۳
متوسط	$GSQ \leq 50 < 70$	$LU < 30 \leq 50$	۲، ۳، ۶، ۷ و ۸	۱۲	۷/۷
ضعیف	$GSQ < 50$	$LU > 50$	۱، ۲، ۴ و ۵	۱۳	۸/۴

Ground Improvement Techniques; Kuala Lumpur Malaysia; pp.505-512.

[6] Houlsby, A. C.; 1990; "Construction and Design of Cement Grouting"; New York, John Wiley and Sons, Inc.

[7] Widmann R.; 1996; "Commission on Rock Grouting", International Journal of Rock Mechanics & Mining science & Geomechanical Abstracts; Vol. 33, No. 8, pp. 803-847.

[۸] مجدی، عباس؛ ۱۳۷۷؛ طرح تزریق‌های سه گانه خط ۲ تونل متروی تهران؛ کارفرما شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو).

[۹] شرکت خاک آزما؛ ۱۳۸۴؛ آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ بر روی نمونه‌های پروژه مترو؛ کارفرما شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو).

#### پی‌نوشت

<sup>1</sup> Kutzner

<sup>2</sup> Ewert

<sup>3</sup> Houlsby

• با استفاده از نتایج آزمایشات لوژان و رسم نمودارهای P-Q می‌توان رفتار خاک تزریق شده و تزریق نشده به راحتی تشخیص داد.

• میزان گسترش آمیزه تزریق در خاک‌ها عامل مهمی در کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت بوده بنابراین می‌توان از این پارامتر که در شکل مغزه‌ها مشخص می‌شود، کیفیت محیط تزریق شده را تخمین زد.

• در این مقاله برای اولین بار با آنالیز ۱۵۵ نمونه مغزه‌گیری شده در خاک‌های تزریق شده اطراف تونل، بر اساس شکل مغزه رابطه‌ای تعریف شده است که با استفاده از آن می‌توان درصد کیفی خاک تزریق شده را محاسبه نمود.

• در این مقاله برای اولین بار کیفیت تزریق خاک تزریق شده بر اساس اعداد لوژان طبقه‌بندی شده است.

پس از بررسی آزمایشات صورت گرفته مشخص گردید که کیفیت تزریق بیش از ۷۱/۶ درصد محیط تزریق شده در تراز ۱ متری مقطع تونل متروی تهران در قطعه  $S_2-X_2$  در حد عالی، ۱۲/۳ درصد در حد خوب، ۷/۷ در حد متوسط و ۸/۴ درصد در حد ضعیف می‌باشد.

#### منابع

[۱] مجدی، عباس؛ ۱۳۷۳؛ راهنمای بررسی طرح تزریق در تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی؛ شرکت متروی تهران.

[2] Foyo, A., Sanchez, M. A.; 2005; "Permeability Tests for Rock Masses. A Proposal for a New Expression for the Equivalent Lugeon Unit (ELU)"; Dam Engineering; Vol XIII, Issue 3, pp. 199-218.

[3] Kutzner, C.; 1996; "Grouting of Rock and Soil"; Balkema, Netherlands, pp. 10-195.

[4] Ewert, F. K.; 1994; "Evaluation and Interpretation of Water Pressure Tests", Proc. Of the Conf. on Grouting in the Ground; Thomas Telford; London.

[5] Majdi, A., Mahmoudi, F.; 2002; "Quality Assessment of Grouted Alluviums by Water Pressure Test"; 4<sup>th</sup> International Conference on