Archive of SID

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"

Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

دوره پنجم، شماره نهم، سال 8389، صفحه 8 تا 82

Vol. 5, No. 9, 2010, pp.1-12

تحلیل کیفیت تزریق با استفاده از منحنی‌های P-Q (فشار- دبی) و شکل مغزه‌ها در عملیات کنترل کیفی تزریق قطعه S_2-X_2 خط 2 تونل متروی تهران

عباس مجدی[8] *، مسعود ظهیری[2]، سید رضا سجادی[3]

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

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

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن، E-mail: porya_sajjadi@yahoo.com

(دریافت 3 آذر 8387، پذیرش 8 آذر 8388)

چکیده

حفاری خط 2 تونل متروی تهران با استفاده از ماشین حفار با سپر محافظ انجام گرفته و سپس به‌وسیله قطعات بتن‌آرمه پیش‌ساخته 9 قطعه‌ای (8+8)، پوشش نگهداری دائمی‌نصب شد. برای جلوگیری از نفوذ آب‌های اطراف به داخل تونل و تحکیم رسوبات آبرفتی اطراف تونل، از عملیات تزریق سیمانی به‌عنوان 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 S2-X2 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

* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

8- 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 نشت‌های غیرمجاز به داخل تونل‌ها یا فضاهای زیرزمینی صورت می‌گیرد[1].

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 1). نفوذپذیری محیط بر اساس نرخ خورند آب، فشار آزمایش و طول مقطع آزمایش بصورت رابطه 1 تعیین می‌شود[2].

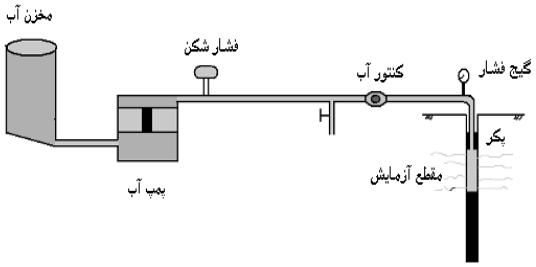
$$Lu = \frac{10Q}{P} \qquad (1)$$

که در آن:

Q = میزان آب بر حسب لیتر بر متر بر دقیقه

P = بالاترین فشار موثر در آزمایش (بار)

Lu = مقدار لوژان



شکل8: نمای کلی آرایش تجهیزات آزمایش لوژان

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

کاتزنز[1] بر اساس تجربیات خود نمودارهای P-Q حاصل از آزمایشات لوژان را به 5 دسته تقسیم نمود (جدول1) [3]. به عقیده اورت[2] نمودارهای P-Q نه تنها ابزار مفیدی جهت نشان دادن نفوذپذیری هستند، بلکه معرف رفتار تغییرشکل زمین نسبت به فشار نیز می‌باشند (جدول1)[4].

مجدی- محمودی در سال 2002 میلادی برای اولین بار آزمایش لوژان را در خاک تزریق شده خط 1 تونل متروی تهران، بر روی 83 گمانه تزریقی انجام دادند. طبقه‌بندی صورت گرفته بر اساس آزمایش لوژان شامل7 نمودار P-Q بوده که 3 نمودار آن مشابه رفتار سنگی و 4 نمودار در محیط‌های خاکی تزریق شده تحلیل گردید[5].

هولسبی[3] نیز بر اساس 811 آزمایش لوژان انجام شده رفتارهای مختلف را طبقه‌بندی نموده و بر اساس آن عدد لوژان معرف برای هر نوع رفتار را پیشنهاد کرد[6]. جدول 1 طبقه‌بندی‌های ارائه شده توسط تعدادی از محققین برای نمودارهای P-Q حاصل از آزمایشات لوژان را نشان می‌دهد[3]،[4]،[5]،[6] و [7].

2- عملیات تزریق قطعه S_2-X_2 خط 2 متروی تهران

قطعه S_2-X_2 خط 2 تونل متروی تهران (حد فاصل چهارراه سلیمان تا درهشت) در طول رسوبات آبرفتی شهر تهران قرار گرفته است. از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی 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 بطوری که در بخش از نقاط به قلوه سنگ و حتی تخته سنگ نیز برخورد شده است [8].

حفاری خط 2 تونل متروی تهران با استفاده از ماشین حفار با سپر محافظ انجام گرفته و سپس توسط قطعات بتن‌آرمه پیش‌ساخته 9 قطعه‌ای (1+8)، 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:

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

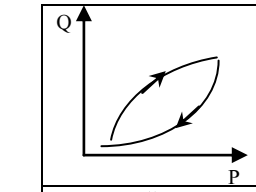
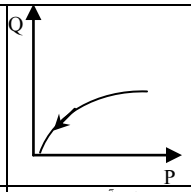
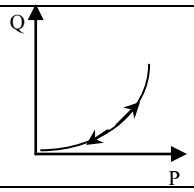
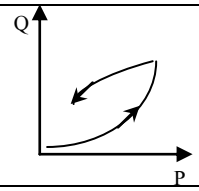
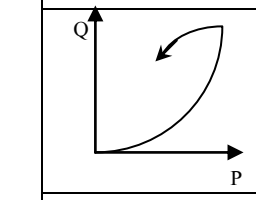
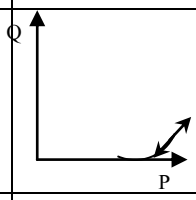
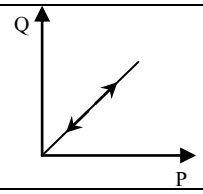
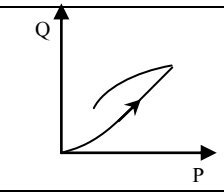
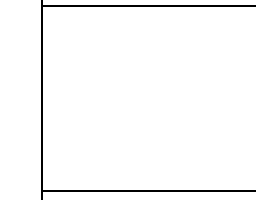
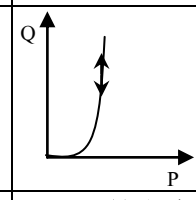
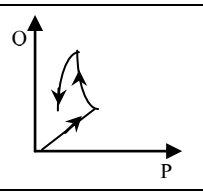
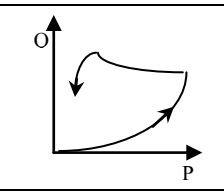
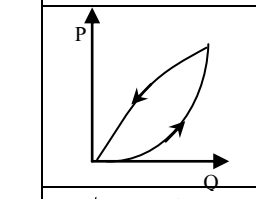
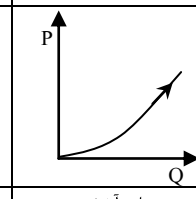
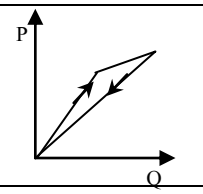
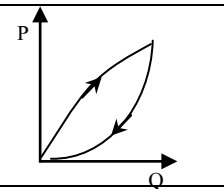
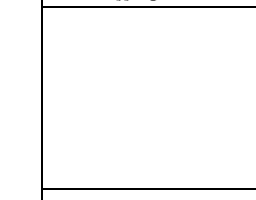
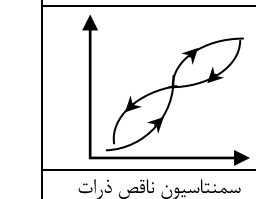
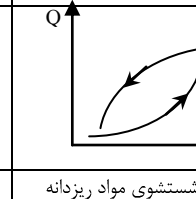
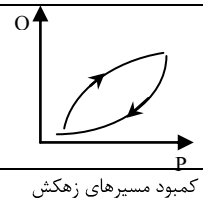
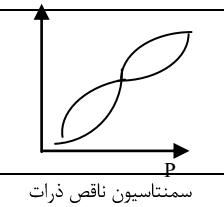
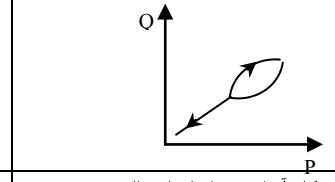
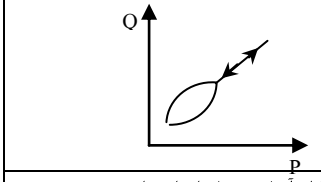
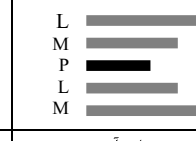
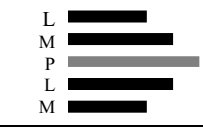
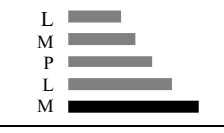
2- تزریق نفوذی: در این روش آمیزه تزریق به داخل فضاهای خالی و حفرات خاک تزریق می‌گردید. از این تکنیک، برای کنترل جریان آب به داخل تونل و یا بهبود ساختار خاک، استفاده می‌شد. عمق گمانه‌ها 40 سانتی‌متر پشت پوشش نگهداری تونل بود.

3- 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 80 سانتی‌متر پشت پوشش نگهداری در قسمت‌های پایین تا 150 سانتی‌متر در راس تونل تغییر می‌کرد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول8: طبقه‌بندی‌های ارائه شده مختلف برای نمودارهای P-Q

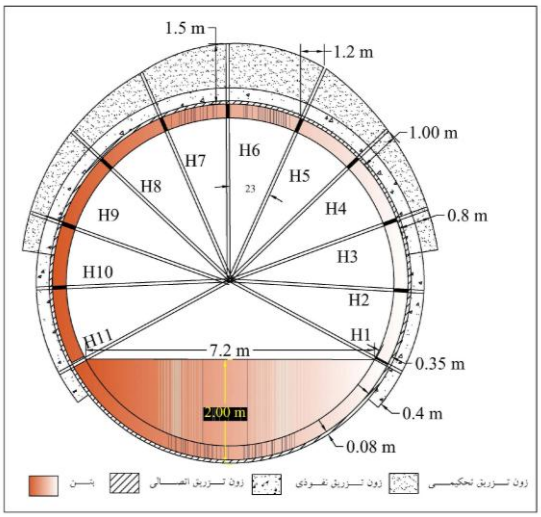
طبقه بندی کاتزنر [3] (1996)	 جریان آرام	 جریان آشفته	 تغییر شکل الاستیک	 فرسایش ترکها	پرشدن خلل و فرج
طبقه بندی اورت [4] (1994)	 سنگ ناتراوا	 سنگ با تراوایی متغیر	 سنگ با تراوایی تغییر ناپذیر	 سنگ با تراوایی بسیار متغیر	سنگ با تراوایی بسیار متغیر
طبقه بندی اورت [4] (1994)	 سنگ با تراوایی بسیار متغیر	 سنگ با تراوایی متغیر	 سنگ با تراوایی تغییر ناپذیر	 سنگ با تراوایی تغییر ناپذیر	
طبقه بندی ISRM [7] (1996)	 جریان آرام	 جریان آشفته	 شکست هیدرولیکی	 فرسایش درزه‌ها	بسته شدن درزه‌ها
طبقه بندی ISRM [7] (1996)	 جریان احتمالی اطراف پکر				
طبقه بندی مجدی- محمودی [5] (2002)	 جریان آرام	 شستشوی مواد ریزدانه	 کمبود مسیرهای زهکش	 سمنتاسیون ناقص ذرات	سمنتاسیون ناقص ذرات
طبقه بندی مجدی- محمودی [5](2002)	 استحکام آبرفت در فشارهای بالا	 استحکام آبرفت در فشارهای پایین	راهنما L = فشار کم M = فشار متوسط P = فشار ماکزیمم عدد لوژان		
طبقه بندی هولسبی [6]	جریان خطی میانگین 5 پله عدد لوژان معرف است	 جریان آشفته مقدار لوژان در فشار ماکزیمم عدد لوژان معرف است	 اتساع میانگین مقدار لوژان در فشارهای کم و متوسط عدد لوژان معرف است	 آبشست بیشترین مقدار لوژان عدد لوژان معرف است	پر شدن درزه‌ها کمترین مقدار لوژان عدد لوژان معرف است

www.SID.ir

Archive of SID

شکل 2 زون تزریق ایجاد شده اطراف تونل قطعهS_2-X_2 خط 2 متروی تهران حاصل از تزریق‌های سه گانه اتصالی، نفوذی و تحکیمی‌را نشان می‌دهد.

شکل 3 پروفیل زمین‌شناسی در مسیر تونل قطعهS_2-X_2 خط 2 متروی تهران را نشان می‌دهد.



شکل2: زون تزریق اطراف تونل

3- اجرای آزمایشات لوژان در عملیات کنترل کیفی تزریق قطعهS_2-X_2 خط 2 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:

1- از لحاظ مهم تزریق، کاهش آبگذرانی رسوبات آبرفتی و افزایش مقاومت رسوبات بعد از تزریق می‌باشد. کاهش آبگذرانی رسوبات آبرفتی بوسیله پرشدن مواد تزریقی مابین ذرات خاک که باعث کاهش تخلخل و بسته‌شدن مسیرهای هیدرولیکی می‌شود و افزایش مقاومت در اثر سمنتاسیون ذرات سیمان با ذرات خاک انجام می‌گیرد. بنابراین رفتار خاک پس از تزریق بطور محسوسی تغییر کرده بطوری که رفتار شبه‌سنگی یا شبه بتنی پیدا می‌کند. جدول 2 تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی خط 2 تونل متروی تهران قبل و بعد از تزریق را نشان می‌دهد. شکل 4 زون خاک تزریق‌شده پشت پوشش نگهداری سگمنتی را در عملیات تزریق قطعه S_2-X_2 نشان می‌دهد.

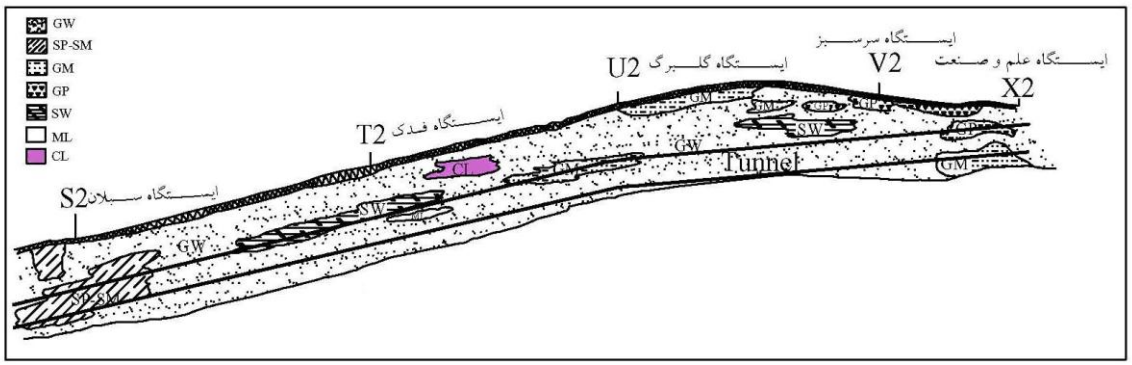
2- به دلیل انجام موفقیت‌آمیز آزمایشات لوژان در خاک تزریق شده در عملیات تزریق خط 1 و شرایط مشابه خاک و نوع تزریق خط 1 با خط 2 در عملیات کنترل کیفیت تزریق خط 2 نیز مشابه خط 1 از آزمایشات لوژان استفاده گردید.

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 0 تا 6 بار انجام می‌گرفت. برای هر پله حداقل 3 قرائت انجام می‌شده و در صورتی‌که اختلاف بین دو قرائت از 5 درصد کمتر بود، فشار آزمایش تغییر می‌کرد.

شکل 5 مراحل افزایش (مرحله رفت) و کاهش فشار (مرحله برگشت) در آزمایشات لوژان انجام شده در قطعه S_2-X_2 خط 2 متروی تهران را نشان می‌دهد.

شکل 6 نحوه حفر گمانه جهت مغزه‌گیری و اجرای آزمایش لوژان در قطعه S_2-X_2 را نشان می‌دهد.

در این مقاله تعداد 155 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 3: پروفیل زمین‌شناسی قطعه S2-X2 خط 2 متروی تهران

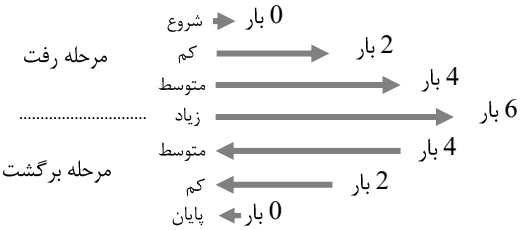
www.SID.ir

Archive of SID

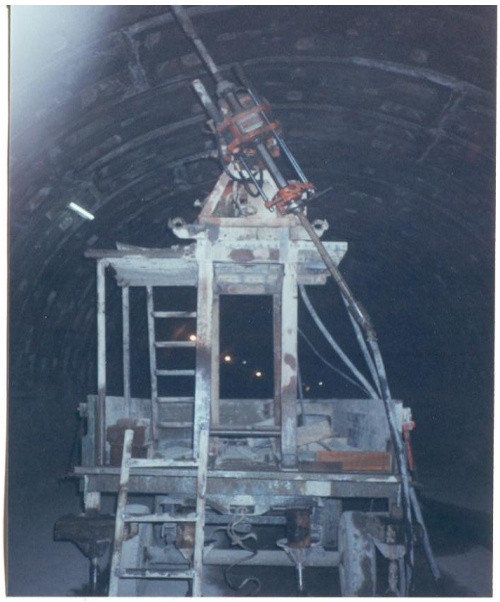
جدول2: تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی رسوبات آبرفتی خط 2 تونل متروی تهران قبل و بعد از تزریق

پارامترها / نوع خاک	φ (درجه)	C (MPa)	Average E (GPa)	γ (gr/cm3)	Average ν	مرجع
خاک قبل از تزریق	-38 34	− .0/4 0/01	0/17	1/7 -2	0/27	[8]
خاک بعد از تزریق	67/7 − 47/1	− 7/6 2/3	18/14	− 2/5 1/7	0/16	[9]

شکل 4: زون خاک تزریق شده در عملیات تزریق قطعه S_2-X_2



شکل5: مراحل افزایش و کاهش فشار بصورت پله‌ای در آزمایشات لوژان انجام شده در قطعهS_2-X_2



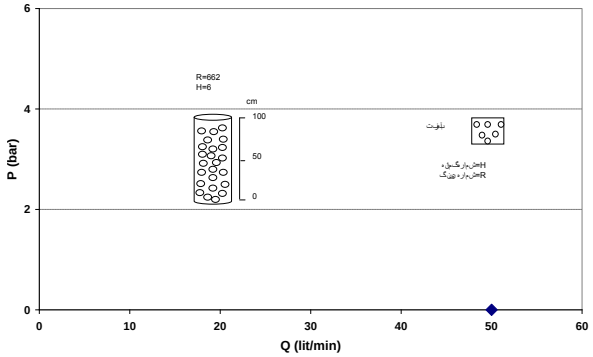
شکل 6: حفر گمانه جهت مغزه گیری و اجرای آزمایش لوژان خط 2 تونل متروی تهران S_2-X_2در قطعه

حالت 1: خاک تزریق نشده

رفتار جریان در این حالت نشان می‌دهد که خاک تزریق نشده است. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود در فشار صفر، میزان دبی ثابت و برابر با ظرفیت پمپاژ می‌باشد. در این حالت به علت بالا بودن خورند آب و عدم فشارگیری، عملاً آزمایش لوژان معیار مناسبی برای تعیین نفوذپذیری نمی‌باشد (طبق رابطه 1 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.

www.SID.ir

Archive of SID



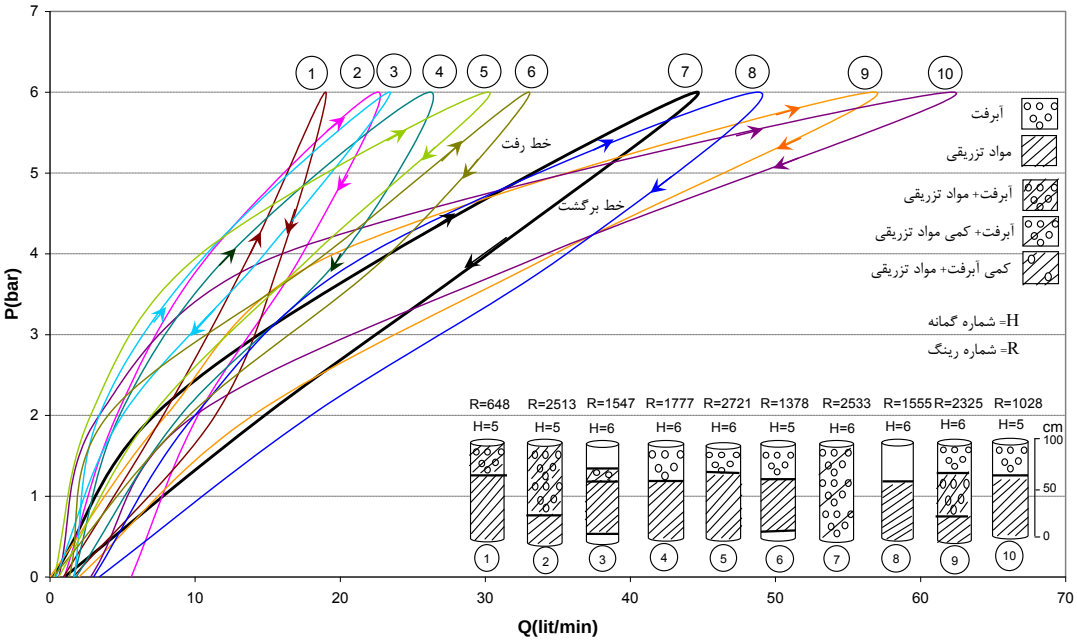
شکل7:شکل تیپیک مغزه و نمودار P-Q برای حالتی که خاک تزریق نشده است.

حالت 2: 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 7 شکل 8) 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 درشت دانه‌تر 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.

حالت3: کمبود مسیرهای زهکش و پر شدن آنها

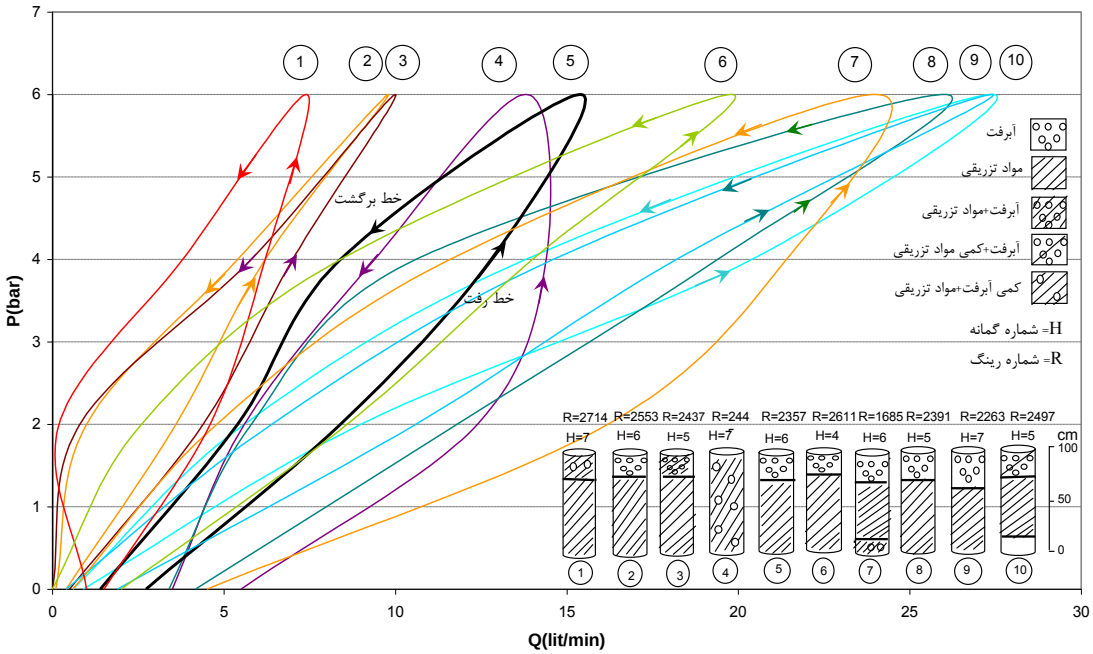
در این حالت دبی آب در مرحله رفت بیشتر از دبی آب در مرحله برگشت (خط رفت و برگشت در نمودار شماره 6 شکل 9) بوده که این رفتار حاکی از کمبود مسیرهای زهکش و تمایل آب به بازگشت به سمت گمانه می‌باشد. به علت استحکام خوب آبرفت تزریق شده، فشار آب قادر به شستشو و تخریب اتصالات آنها و ایجاد مسیرهای زهکش جدید نبوده، 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.



شکل8: شکل مغزه‌ها و نمودارهای P-Q موید تخریب سمنتاسیون ضعیف و شستشوی مواد ریز دانه در آزمایشات لوژان صورت گرفته در عملیات کنترل کیفی قطعه S_2-X_2

www.SID.ir

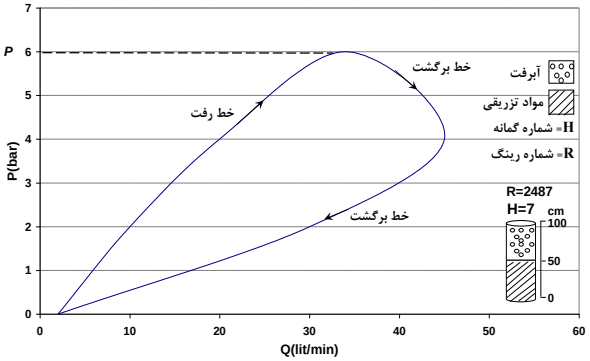
Archive of SID



شکل9: شکل مغزه‌ها و نمودارهای P-Q موید کمبود مسیرهای زهکش و پر شدن آنها بوسیله آب در آزمایشات لوژان صورت گرفته در عملیات کنترل کیفی قطعه S_2-X_2

حالت 4: شکست هیدرولیکی و تخریب کامل

در این حالت وقتی اندازه فشار به فشار بحرانی (Pc در شکل 10) رسید، به علت شکست هیدرولیکی، فشار به‌طور ناگهانی افت کرده و همزمان با این افت، میزان خورند به‌طور غیرمتعارف افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل 10 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 2 در نوع رفتار مواد تزریقی در خاک می‌باشد. در حالت 2 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.



شکل81: شکل مغزه و نمودار P-Q موید شکست هیدرولیکی در آزمایشات لوژان صورت گرفته در عملیات کنترل کیفی قطعه S_2-X_2

حالت 5: تخریب ناقص در فشار پایین‌تر از فشار ماکزیمم

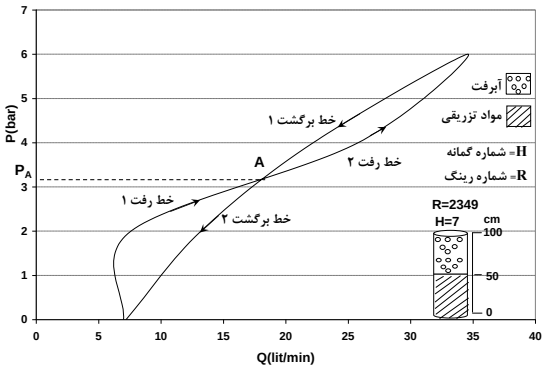
در این حالت در یک فشار قبل از فشار نهایی یک نقطه تلاقی (نقطه A در شکل11) وجود دارد که ماهیت نمودارها قبل و بعد از این نقطه تفاوت دارد. قبل از نقطه A ماهیت نمودار شبیه حالت 2 و بعد از نقطه A ماهیت نمودار شبیه حالت 3 می‌باشد.

این روند را بدین‌صورت 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 2 در شکل 1). به‌دلیل محدود بودن این مسیرها در مرحله برگشت از فشار ماگزیمم

www.SID.ir

Archive of SID

تا نقطه A خورند کاهش می‌یابد (خط برگشت 1 در شکل 1). با وجود کاهش خورند در مرحله برگشت در زیر نقطه A همچنان آبخوری در مرحله برگشت بیشتر از مرحله رفت می‌باشد، که تأثیر تخریب صورت گرفته را نشان می‌دهد. این نوع نمودار نشان می‌دهد که آبرفت تزریق شده در فشار زیر نقطه A مستحکم می‌باشد. بنابراین هرچه نقطه A بالاتر باشد، نشانگر استحکام بهتر خاک تزریق شده است.



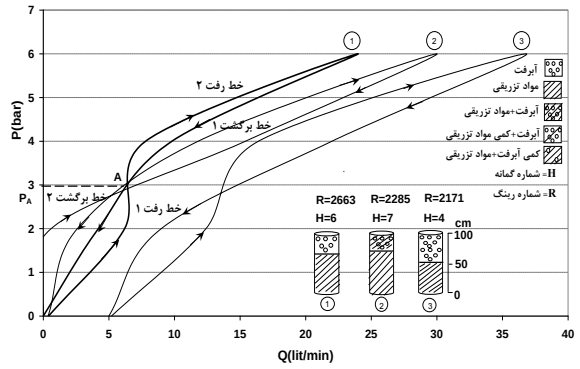
شکل88: شکل مغزه و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار پایین‌تر از فشار ماکزیمم (فشار در نقطه A) در آزمایشات لوژان صورت گرفته در قطعه S_2-X_2

حالت6: تخریب ناقص در فشار ماکزیمم

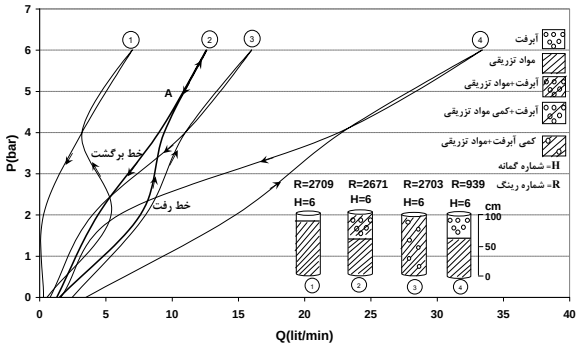
شکل نمودار در این حالت برعکس حالت 5 می‌باشد (شکل12) ولی دلیل بر رفتار متضاد محیط در این دو حالت نیست. این حالت نشان می‌دهد که در فشارهای بالاتر از فشار نقطه A (P_A) مسیرهای زهکش جدید با گذردهی هیدرولیکی کم باز می‌شوند که باعث افزایش خورند در فشار برگشت می‌گردند. ولی به دلیل اشباع سریع این مسیرها خورند 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 7: آبخوری ثابت در فشارهای بالا

شکل نمودار در این حالت (شکل 13) شبیه حالت 6 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 به‌وجود 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 تعداد محدودی مسیر هیدرولیکی باقی می‌ماند که آبگذرانی 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 13 هر چه نقطه شروع انطباق خطوط در فشار کمتری باشد نشانه استحکام بهتر خاک تزریق شده است.



شکل82: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار ماکزیمم در آزمایشات لوژان صورت گرفته در قطعه S_2-X_2



شکل83: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار ماکزیمم در عملیات کنترل کیفی قطعه S_2-X_2

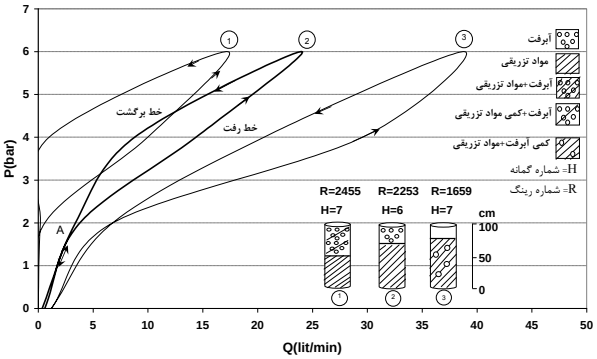
حالت 8: آبخوری ثابت در فشارهای پایین

این حالت برعکس حالت 7 و شبیه حالت 5 است با این تفاوت که قبل از نقطه A خطوط رفت و برگشت بر هم منطبق هستند (شکل14). در این حالت در یک فشار معین به سمت فشار مینیمم خطوط رفت و برگشت برهم 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 7 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 7 و 8 بیشتر باشد، از نظر استحکام و نفوذپذیری دارای شرایط بهتری است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل84: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q برای حالت تخریب ناقص در فشار کمتر از فشار ماگزیمم (فشار در نقطه A) در آزمایشات لوژان قطعه S_2-X_2

حالت9: 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 (شکل15). این حالت نشان دهنده استحکام کافی آبرفت است که فشارهای اعمالی قادر نمی‌باشد هیچ‌گونه تغییری در ماهیت آبرفت تزریق شده ایجاد نماید.

حالت10: خاک کامل تزریق شده

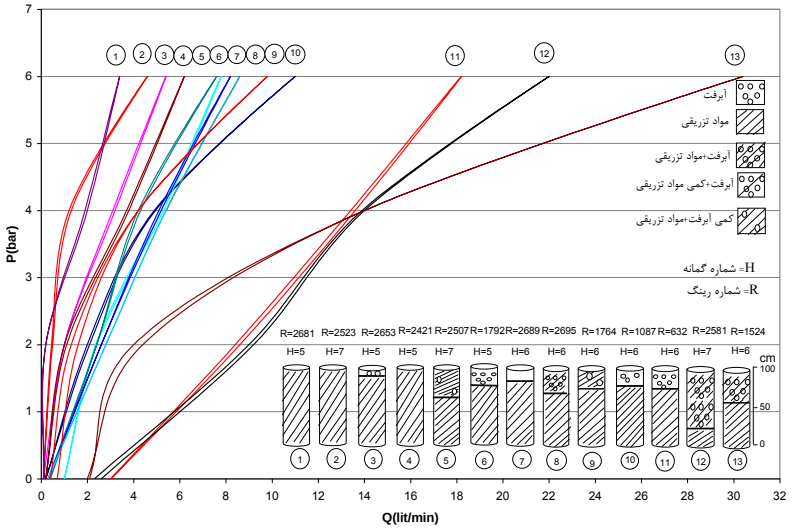
در این حالت رسوبات بطور کامل تزریق شده‌اند و محیط دارای خواص همگن و همسان می‌باشد که در شکل 16 نیز مشاهده می‌شود افزایش و کاهش فشار تأثیری در میزان جذب آب نداشته و میزان دبی در تمام فشارها صفر و یا در حد صفر می‌باشد. در این حالت رسوبات آبرفتی خاصیت یک بتن کامل یا تودهٔ سنگ یکپارچه با خاصیت آبگیرانی بسیار ناچیز را دارند.

4- 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 می یابد. 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:

1- مغزه کاملاً از ماده تزریقی تشکیل شده است.

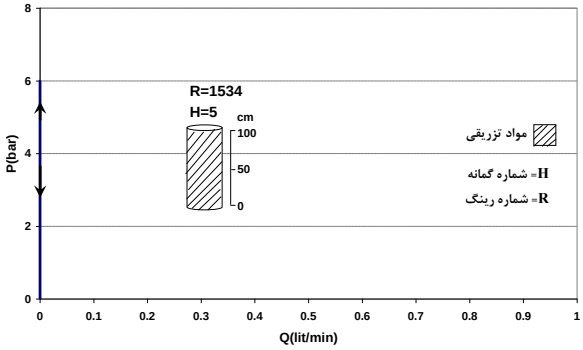
2- مغزه بصورت ترکیبی از ماده تزریق و خاک بوده که در این حالت نسبت ماده تزریقی در این ترکیب بسیار مهم می‌باشد.



شکل85: شکل مغزه‌ها و نمودار P-Q موید استحکام خاک تزریق شده در آزمایشات لوژان قطعه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل86: شکل تیپیک مغزه و نمودار P-Q موید استحکام خاک کامل تزریق شده در آزمایشات لوژان قطعه S_2-X_2

3- مغزه حاوی خاک بدون ماده تزریقی می‌باشد.
4- مغزه خالی است که می‌تواند حاصل از آب اندازی ماده تزریقی باشد.

رابطه تجربی 2 درصد کیفی تزریق را با استفاده از شکل مغزه‌ها که بر اساس آنالیز 155 نمونه مغزه‌گیری شده در عملیات کنترل کیفی خط 2 متروی تهران نتیجه شده، نشان می‌دهد:

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

که در آن

GSQ: درصد کیفی تزریق

L: طول کل مغزه (Cm)

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

B_i: طولی از مغزه که ترکیبی از ماده تزریقی و خاک باشد (Cm)

C_i: نسبت ماده تزریقی در مقطع B_i

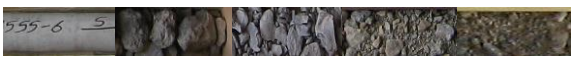
i=1: این حالت مبین ترکیب ماده تزریقی با کمی‌آبرفت می‌باشد که در این حالت C_1=0.75

i=2: این حالت مبین ترکیب ماده تزریقی با آبرفت بطور تقریباً مساوی می‌باشد که در این حالت C_2=0. 5

i=3: این حالت مبین ترکیب کمی‌ماده تزریقی با آبرفت می‌باشد که در این حالت C_3=0.25

شکل 17 انواع حالت‌های مختلف شکل مغزه در یک توده خاک تزریق شده را بصورت شماتیک نشان می‌دهد.

خاک				A
	B_3	B_2	B_1	
	C_3	C_2	C_1	



شکل 87: انواع حالت‌های مختلف شکل مغزه در یک توده خاک تزریق شده

هرچه مقدار GSQ کمتر باشد نشان‌دهنده گسترش کم ماده تزریقی در خاک بوده که این عامل مبین کیفیت پایین توده تزریق شده می‌باشد. برعکس حالت فوق هرچه مقدار GSQ بالا باشد مبین کیفیت بالای توده تزریق شده است. بسته به محدوده عددی GSQ می‌توان کیفیت خاک تزریق شده را به‌صورت جدول 3 طبقه‌بندی کرد.

جدول3: طبقه‌بندی کیفیت خاک تزریق شده با استفاده از محدوده عددی GSQ

عالی	خوب	متوسط	ضعیف
GSQ≤100 91≤	GSQ<91 71≤	51≤ GSQ<71	GSQ<51

به‌طور مثال در شکل 17 با فرض یک نمونه مغزه بطول صد سانتی‌متر که به 5 قسمت مساوی تقسیم شده GSQ بصورت ذیل محاسبه می‌گردد.

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

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

جواب حاصل نشان می‌دهد که GSQ برابر 50 شده که با استفاده از جدول 3 می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت خاک تزریق شده متوسط می‌باشد.

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

از عدد لوژان در عملیات تزریق به‌عنوان یک معیار در سنجش نفوذپذیری و کنترل کیفی تزریق می‌توان استفاده نمود. از طرفی در بخش قبل میزان گسترش آمیزه تزریق در خاک به‌عنوان 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 می‌گردد. بنابراین بین شکل مغزه که گویای گسترش آمیزه تزریق می‌باشد و عدد لوژان می‌توان رابطه‌ای برقرار نمود. با ترسیم شکل مغزه‌ها و محاسبه GSQ برای هر مغزه و همچنین محاسبه عدد لوژان برای آنها می‌توان ارتباطی بین GSQ و عدد لوژان و نوع نمودار فشار- دبی را بدست آورد.

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 1 بدست می‌آید. بعد از تعیین عدد لوژان در هر پله فشار، طبق روش

www.SID.ir

Archive of SID

پی‌شنهادی هولسبی (جدول (1) سطر آخر) عدد لوژان معرف هر آزمایی‌ش محاسبه می شود.

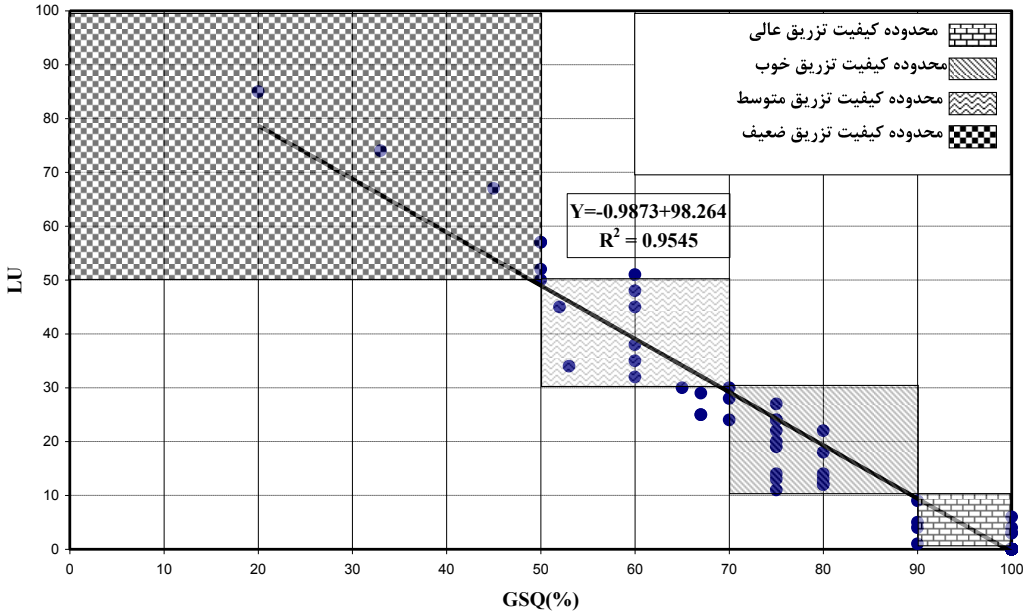
جدول 4 نمودارهای فشار- دبی بدست آمده در این مقاله را به همراه شکل مغزه‌ها، اعداد لوژان و GSQ منتسب به هر نوع نمودار را نشان می‌دهد. با رسم نمودار عدد لوژان و GSQ برای هر گمانه با خطای بسیار کم می‌توان بین عدد لوژان و GSQ و کیفیت تزریق به‌صورت شکل 18 ارتباط برقرار نمود.

از جدول 4 و شکل 18، جدول 5 نتیجه می‌شود.

6- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل صورت گرفته در این مقاله از 155 مورد آزمایشات لوژان و مغزه‌های گرفته شده در عملیات کنترل کیفی قطعه S_2-X_2 خط 2 تونل متروی تهران موارد ذیل نتیجه گیری شده است:

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



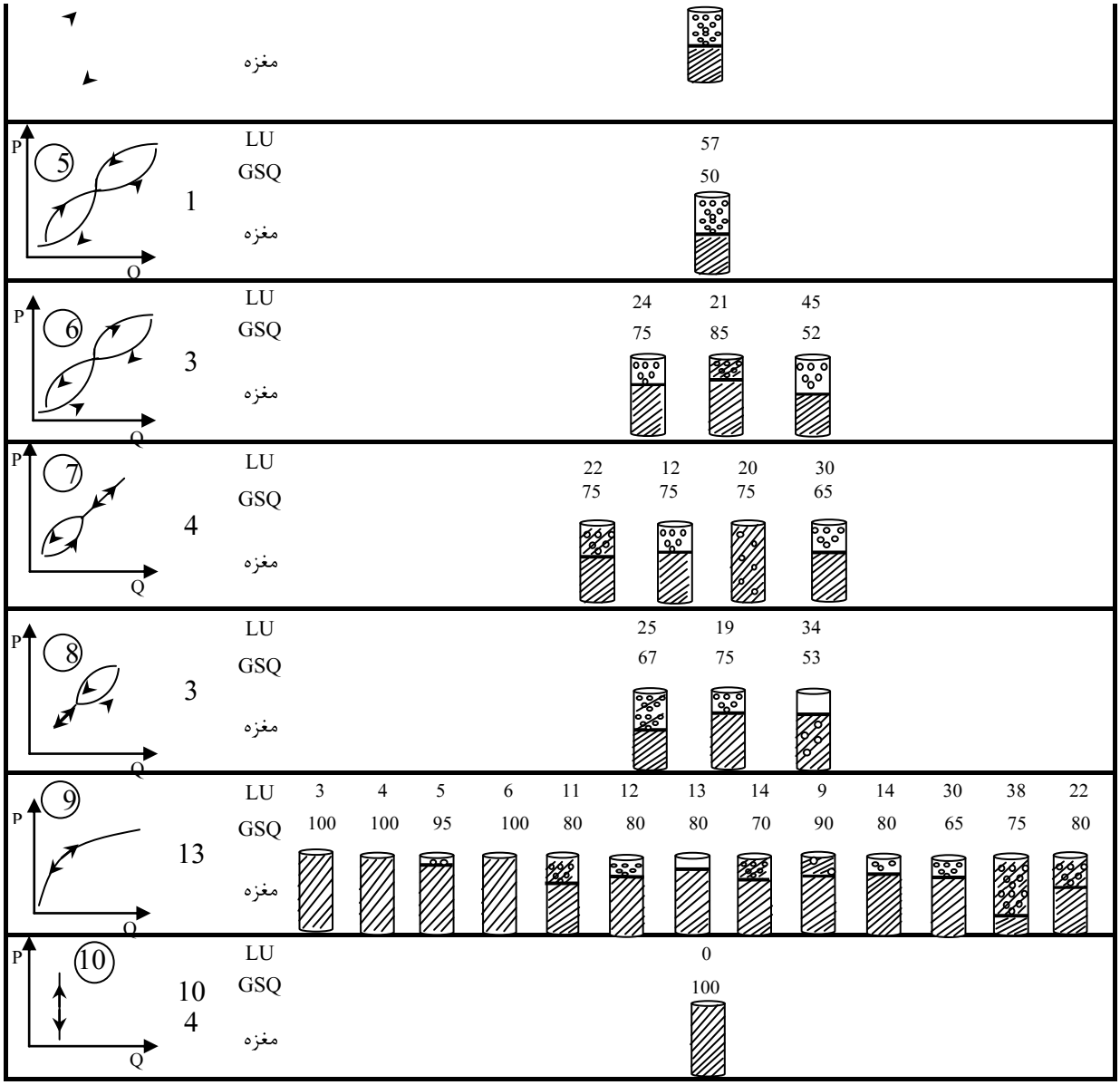
شکل 88: رابطه بین عدد لوژان و GSQ و محدوده کیفیت تزریق

جدول 4: نمودارهای P-Q با شکل مغزه‌ها، اعداد لوژان و GSQ منتسب به هر نوع نمودار

نوع نمودار	تعداد	شکل مغزه، عدد لوژان و GSQ										
1	6	LU	–									
		GSQ	0									
		مغزه										
2	10	LU	57	51	27	45	35	52	74	85	67	48
		GSQ	50	60	68	60	70	50	33	20	45	60
		مغزه										
3	10	LU	1	18	4	25	24	13	24	29	32	28
		GSQ	90	80	90	67	70	80	75	67	60	70
		مغزه										
4	1	LU	50									
		GSQ	50									

www.SID.ir

Archive of SID



جدول5: رابطه تجربی بین کیفیت تزریق با محدوده عدد لوژان، GSQ و نوع نمودار

کیفیت تزریق	GSQ	LU	نوع نمودار	تعداد حالت‌ها	کیفیت تزریق قطعه S_2-X_2 (درصد)
عالی	<100 GSQ90≤	≤ 10 LU	9 و 10	111	71/6
خوب	<90 GSQ70≤	≤30LU10<	3، 6، 7، 8 و 9	19	12/3
متوسط	<70 GSQ50≤	≤50 LU30<	2، 3، 6، 7 و 8	12	7/7
ضعیف	< 50 GSQ	> 50 LU	1، 2، 4 و 5	13	8/4

- 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 مهمی‌در 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 155 نمونه مغزه گیری 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.

www.SID.ir

Archive of SID

پس از بررسی آزمایشات صورت گرفته مشخص گردید که کیفیت تزریق بیش از 71/6 درصد محیط تزریق شده در تراز 1 متری مقطع تونل متروی تهران در قطعه S_2-X_2 در حد عالی، 12/3درصد در حد خوب، 7/7 در حد متوسط و 8/4 درصد در حد ضعیف می‌باشد.

منابع

[1] مجدی، عباس؛ 1373؛ **راهنمای بررسی طرح تزریق در تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی**؛ شرکت متروی تهران.

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

[3] Kutzner, C.; 1996;پ*Grouting of Rock and Soil";* Balkema, Netherlands, pp. 10ت95.

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

[5] Majdi, A., Mahmoudi, F.; 2002; ب*Quality Assessment of Grouted Alluviums by Water Pressure Test*پ; 4th International Conference on Ground Improvement Techniques; Kuala Lampur Malasia; pp.505-512.

[6] Houlsby, A. C.; 1990; ب*Construction and Design of Cement Grouting*پ; New York, John Wiely and Sons, Inc.

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

[8] مجدی، عباس؛ 1377؛ **طرح تزریق‌های سه گانه خط 2 تونل متروی تهران**؛ کارفرما شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو).

[9] شرکت خاک آزما؛ 1384؛**آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ بر روی نمونه‌های پروژه مترو**؛ کارفرما شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو).

پی‌نوشت

[1] Kutzner
[2] Ewert
[3] Houlsby

www.SID.ir