

## بررسی عملکرد تزریق در آبرفت C تهران به روش آزمایشگاهی

مرتضی اسماعیلی<sup>\*</sup>، مرتضی قارونی نیک<sup>۲</sup>، حامد حسین پور<sup>۳</sup>

پذیرش مقاله: ۹۰/۱۱/۵

دریافت مقاله: ۹۰/۷/۶

### چکیده

یکی از روش‌های پایدارسازی زمین به منظور حفر فضاهاى زیرزمینی، استفاده از تزریق برای به حداقل رساندن نفوذپذیری و افزایش مقاومت خاک در حین عملیات ساخت است. با توجه به گسترش روزافزون ساخت و ساز مترو و فضاهاى زیرزمینی در کشور و امکان برخورد با سازندهای سست، مطالعه اثرات تزریق و پارامترهای مؤثر بر آن در خاک‌های آبرفتی در بستر مناطق شهری ضروری به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر یک مطالعه آزمایشگاهی به منظور بررسی میزان تزریق‌پذیری روی چند خاک منطبق بر دانه‌بندی آبرفت C تهران صورت گرفته است. نمونه‌های ساخته شده استوانه‌ای بوده و در دو تراکم ۵۰ و ۷۰ درصد تهیه شده‌اند. در این تحقیق در گام نخست با انجام عمل تزریق با دوغاب‌های با نسبت آب به سیمان مختلف و تحت فشارهای متفاوت، میزان تزریق‌پذیری نمونه‌های خاک با توجه به اختلاف وزن نمونه‌ها قبل و بعد از تزریق بررسی شده است و بر این اساس معیاری عددی برای بیان تزریق‌پذیری آبرفت C تهران براساس پارامترهای دانه‌بندی خاک و سیمان، نسبت آب به سیمان دوغاب و درصد ریزدانه خاک و همچنین فشار تزریق و درصد تراکم خاک ارائه گردیده است. در گام بعد با تعیین مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تزریق شده و مقایسه مقاومت آن‌ها با نمونه‌های شاهد، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقاومت نمونه‌های استوانه‌های با نتیجه تزریق موفق ارائه شده است. در پایان میزان کاهش نفوذپذیری نمونه‌های تزریق شده نسبت به حالت قبل از انجام عمل تزریق با استفاده از آزمایش نفوذپذیری بررسی شده است.

**کلید واژه‌ها:** آبرفت C تهران، قابلیت تزریق‌پذیری، دوغاب سیمانی، فشار تزریق، محتوای ریز دانه خاک.

۱- استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، خط و سازه های ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ m\_esmaeili@iust.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، خط و سازه های ریلی، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ Gharouni@doctor.com

۳- کارشناس ارشد مهندسی راه آهن، خط و سازه های ریلی، از دانشگاه علم و صنعت ایران؛ hoseinpour@hotmail.com

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

از عمده معضلات پیش رو در حفر تونل در مناطق شهری، شرایط مقاومتی ضعیف زمین و سطح بالای آب زیرزمینی است. در این میان، کنترل نشست خاک برای به حداقل رساندن جابه‌جایی ساختمان‌های مجاور و تأسیسات به عنوان یک جنبه مهم طراحی و ساخت تونل‌های شهری و فضاهای زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر ورود جریان‌های آب زیرزمینی به داخل تونل و فضاهای زیرزمینی در حین ساخت، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات تکمیل موفق پروژه‌های مذکور به شمار می‌رود. ریزش حین حفاری می‌تواند منجر به سختی حفاری و نگهداری زمین، حساسیت ساکنین اطراف به تکان‌های ایجاد شده، نشست سطح زمین و افزایش هزینه‌ها شود. از این رو ارائه یک برنامه تزریق (Grouting) مناسب پیش از حفاری می‌تواند منافع مالک (Owner) و پیمانکار (Contractor) را در کاهش احتمال خطر و کنترل هزینه‌های پروژه و تأخیرات فراهم کند (Seung Ryull K, 2006; U.S. Army Corps, 1984).

معمولاً برای این منظور، خاک ناحیه طاق دور تونل قبل از حفاری از طریق جبهه کار و یا توسط تونل راهنما، به وسیله تزریق اصلاح می‌شود. در این شرایط یک مخلوط روان که با گذشت زمان سخت شده و دانه‌های خاک را به هم می‌چسباند تشکیل طاقی متشکل از مواد چسبنده را می‌دهد که قادر است وزن لایه سربار را در هنگام حفاری حداقل تا زمان اجرای پوشش نهایی، تحمل کند (Nicolini and Nova, 2000). یکی از مسائل مهم مرتبط با موفقیت تزریق در یک سازند دانه‌ای مشخص، مسئله دوغاب‌خوری (GR) Groutability است که این موضوع توسط محققین مختلف برای سال‌های متمادی مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقات مقدماتی قابلیت تزریق‌پذیری در ابتدا تنها براساس اندازه دانه‌های خاک و سیمان بیان شده به طوری که در این معیارها این قابلیت تنها بر اساس نسبت  $D_{15}$  یا  $D_{10}$  خاک به  $d_{85}$ ،  $d_{90}$  و  $d_{95}$  دانه‌های سیمان قابل پیش‌بینی می‌باشد (Incecik and Ceren,

1995; Bell, 1993; Burwell, 1958). از طرف دیگر نتایج آزمایش‌های بزرگ مقیاس نشان‌دهنده آن است که میزان GR در خاک‌های دانه‌ای به طور مستقیم و با دقت مناسبی براساس پارامترهای مختلف خاک و دوغاب قابل پیش‌بینی است (Akbulut, 1999; Kutzner, 1996).

(Cambefort 1951, 1977) معتقد است که در یک نمونه خاک، دامنه نفوذ مواد تزریقی توسط دانه‌بندی آن خاک محدود می‌شود. وی در ادامه تحقیقات خود یک معیار براساس اندازه فضای خالی بین ذرات خاک پر شده با ذرات سیمان ارائه داده است.

(Hendron and Lenahan 1976) مشخص کردند که مقدار نفوذ مواد تزریقی توسط دانه‌بندی خاک‌ها محدود می‌شود. مطابق نظر این محققین اگر بیشتر از ۱۰٪ اندازه ذرات در یک خاک از الک نمره ۲۰۰ بگذرد، آن خاک تزریق‌پذیر نمی‌باشد. (Akbulut and Saglamera, 2002) معتقدند که نسبت تزریق‌پذیری اساساً به دانه‌بندی خاک و ذرات آمیزه تزریق بستگی دارد و می‌توان نسبت تزریق‌پذیری برای هر نوع خاک با دانه‌بندی دلخواه را به کمک تغییر در اندازه ذرات مواد تزریق افزایش داد. جدول ۱ نسبت‌های تزریق‌پذیری و نسبت مناسب بین ذرات خاک و ذرات جامد معلق در مایع تزریق پیشنهاد شده توسط محققین مختلف را نشان می‌دهد.

پیش‌بینی دقیق دوغاب‌خوری خاک‌های دانه‌ای با توجه به اثرات پارامترهای مختلف خاک، امری پیچیده است. این پارامترها عبارت از اندازه دانه‌های خاک و دوغاب‌های پایه سیمانی، دانسیته نسبی و محتویات ریزدانه خاک‌ها، نسبت آب به سیمان مخلوط دوغاب و فشار تزریق می‌باشند که مستقیماً بر دوغاب‌خوری افق‌های خاک (Soil media) تأثیر می‌گذارند. با این وجود، دانسیته نسبی، محتوای ریزدانه خاک، نسبت آب به سیمان و فشار تزریق به ندرت در پیش‌بینی دوغاب‌خوری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

جدول ۱. روابط مختلف در تعیین نسبت‌های تزریق‌پذیری و نسبت مناسب بین ذرات خاک و ذرات جامد معلق در دوغاب تزریق (مجدی و ظهیری، ۱۳۸۵).

معیار تزریق ناموفق	معیار تزریق موفق	سال ارائه	نام محقق	رابطه پیشنهادی جهت تزریق‌پذیری
GR < 11	GR > 25	۱۹۵۸	Burwell	$GR = \frac{D_{15} (soil)}{d_{85} (grout)}$
GR < 6	GR > 11	۱۹۶۱	King	$GR = \frac{D_{10} (soil)}{d_{95} (grout)}$
GR < 11	GR > 24	۱۹۷۰	Mitchel	$GR = \frac{D_{15} (soil)}{d_{95} (grout)}$
GR < 11	GR > 24	۱۹۷۶	Hendron	$GR = \frac{D_{15} (soil)}{d_{85} (grout)}$
$d_{maxgrout} < 0.1D_{15}$	$d_{maxgrout} > 0.1D_{15}$	۱۹۸۴	Sherard	-
-	GR > 10	۱۹۹۵	Ceren	$GR = \frac{D_{10} (soil)}{d_{90} (grout)}$
GR < 7	GR > 10	۱۳۸۵	مجدی و ظهیری	$GR = \frac{D_{10} (soil)}{d_{100} (grout)}$

GR = نسبت تزریق‌پذیری

$D_{15} (Soil)$  = اندازه قطر خاک مورد تزریق که ۱۵ درصد آن از نظر وزنی کوچک‌تر از این مقدار است

$D_{10} (Soil)$  = اندازه قطر خاک مورد تزریق که ۱۰ درصد آن از نظر وزنی کوچک‌تر از این مقدار است

$d_{max} (grout)$  = بزرگ‌ترین اندازه ذرات معلق آمیزه تزریق

$d_{85} (grout)$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۸۵ درصد آن از نظر وزنی کوچک‌تر از این مقدار است

$d_{95} (grout)$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۹۵ درصد آن از نظر وزنی کوچک‌تر از این مقدار است

$d_{90} (grout)$  = اندازه قطر ذره آمیزه تزریق که ۹۰ درصد آن از نظر وزنی کوچک‌تر از این مقدار است

خاک است. برای انجام این تحقیق، خاک‌های منطبق بر دانه‌بندی آبرفت C تهران در قالب‌های استوانه‌ای شفاف با استفاده از روش پیشنهادی آزمایش تراکم به دانسیته‌های مورد نظر رسانده شده و سپس دوغاب سیمان با نسبت‌های مختلف آب به سیمان تحت فشارهای متفاوت، در آن تزریق شده است. در این راستا میزان دوغاب‌خوری نمونه‌ها با استفاده از اختلاف وزن آن‌ها قبل و بعد از تزریق مورد توجه قرار داده شده است. در عین حال با تعیین مقاومت تک محوری نمونه‌های دوغاب خورده بعد از ۲۸ روز، عمل‌آوری و مقایسه آن با نمونه قبل از تزریق، رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقاومت فشاری ارائه شده است. همچنین برای بررسی میزان کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها بعد از تزریق چندین آزمایش نفوذپذیری آزمایشگاهی به روش هد متغیر نیز انجام گرفته است.

در این خصوص با مطالعه اثرات این پارامترها بر دوغاب‌خوری، یک رابطه پیشنهادی تجربی برای تخمین دوغاب‌خوری خاک‌های دانه‌ای توسط (Akbulut and Saglamera, 2002) معرفی شده که با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از نمونه‌های ماسه‌ای دوغاب خورده با دانسیته‌های مختلف تایید شده است. در این مطالعه تنها بر قابلیت تزریق‌پذیری خاک‌های دانه‌ای تمرکز شده و رابطه به دست آمده برای پیش‌بینی تزریق‌پذیری خاک‌های ریزدانه قابل استفاده نیست. در عین حال در تحقیق یاد شده معیاری برای پیش‌بینی مقاومت نمونه، پس از تزریق نیز ارائه نشده است. هدف از تحقیق حاضر مطالعه قابلیت تزریق‌پذیری آبرفت C تهران با توجه به پارامترهای اولیه تزریق از قبیل فشار، نسبت آب به سیمان، دانه‌بندی و درصد تراکم خاک و استخراج روابطی برای پیش‌بینی قابلیت تزریق‌پذیری و افزایش مقاومت

## ۲. زمین شناسی آبرفت های تهران

طبقه بندی رسوبات آبرفتی درشت دانه تهران اولین بار توسط ریبن (Rieben) در سال های ۱۹۵۳-۱۹۶۶ انجام شده است. لازم به ذکر است که نتیجه تحقیقات بعدی انجام شده توسط سایر محققین، تغییر عمده ای در این تقسیم بندی ایجاد نکرده است (بربریان و همکاران ۱۳۶۴). در جدول ۲ خلاصه ای از شرایط زمین شناسی آبرفت های تهران که عمده محققین بر روی آن اتفاق نظر دارند ارائه می گردد، همچنین پهنه بندی و پراکندگی آن ها در شکل ۱ نشان داده شده است. (چشمی و همکاران، ۱۳۸۵)

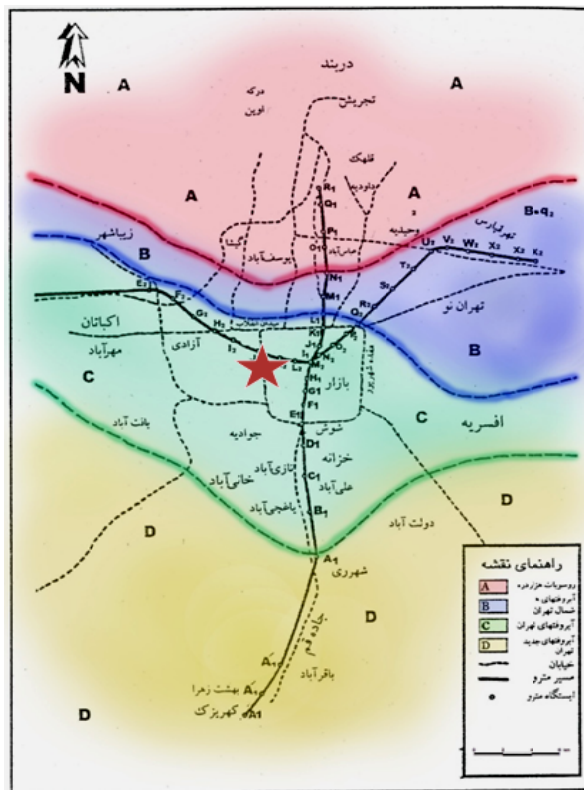
## ۳. روش انجام آزمایش ها در تحقیق حاضر

به منظور انجام آزمایش ها با توجه به گستردگی دانه بندی در آبرفت تیپ C از یکسو و از سوی دیگر محدودیت های موجود در تعداد نمونه های مورد آزمایش، ابتدا چهار دانه بندی متفاوت خاک که بیانگر تمام خواص خاک های محدوده دانه بندی آبرفت C تهران می باشند انتخاب و برای انجام آزمایش، مورد استفاده قرار داده شد. با توجه به تجربیات به دست آمده در خلال آزمایش ها مشخص شد، خاک با تراکم حدود ۵۰٪ بسیار سست و ریزشی است و بدست آوردن خاک با تراکم کمتر از آن برای انجام آزمایش ها مناسب به نظر

نمی رسد و یا به عبارت بهتر با توجه به ساختار آبرفت مورد مطالعه، شاید چنین درصد تراکمی در پهنه شهر تهران موجود نباشد. و لذا به همین دلیل دانسیته ۵۰٪ به عنوان حد پایین تراکم نمونه ها انتخاب شده است. از طرف دیگر از آنجا که خاک با تراکم بیشتر از ۷۰٪ به لحاظ مقاومتی پایدار بوده و حفاری در چنین خاکی با خطر ریزش مواجه نشده و در واقع انجام عملیات حفاری در خاک با چنین تراکمی نیاز به تزریق به منظور اصلاح خاک نخواهد داشت، لذا با این توجیه این درصد تراکم به عنوان حد بالای دانسیته نمونه در طول آزمایشات انتخاب شده است. در نتیجه نمونه های مورد نظر خاک با دو درصد تراکم ۵۰٪ و ۷۰٪ درون قالب های شفاف استوانه ای متراکم شدند. همچنین در حین عملیات تزریق به منظور بررسی اثر افزایش فشار بر عملکرد تزریق و میزان دوغاب خوری فشارهای ۲، ۴ و ۶ بار (bar) مورد استفاده قرار گرفت. پارامتر دیگری که در خلال انجام آزمایش ها مورد بررسی قرار داده شد نسبت آب به سیمان ( $W/C$ ) دوغاب سیمان بود. برای این منظور دو نسبت آب به سیمان ۱ و ۲ در نمونه سازی مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۳ طرح کلی ساخت نمونه های تزریقی خاک برای تمامی چهار نوع دانه بندی منتخب ارائه شده است (حسین پور و همکاران، ۱۳۹۰).

جدول ۲. مقایسه سازندهای گستره تهران براساس طبقه بندی ریبن (چشمی و همکاران، ۱۳۸۵)

سازند				موضوع مقایسه
D	C	B	A	
از حد رس تا قطعات سنگی بزرگ تر از یک متر	از حد رس و سیلت تا حداکثر دانه به قطر ۲۰ سانتی متر	بسیار متغیر با قطعات چند متری	از حد رس تا دانه هایی به قطر ۱۰ تا ۲۵ سانتی متر	دانه بندی
سیمان نشده	سیمان ضعیف تر از A و سخت نشده	متغیر ولی عموماً دارای سیمان ضعیف	سیمان شده و سخت شده	سیمانی شدن
کمتر از ۱۰ متر	حداکثر ۶۰ متر	حداکثر ۶۰ متر (به سمت جنوب کم می شود)	حداکثر ۱۲۰۰ متر	ضخامت



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی تهیه شده بر اساس مطالعات خطوط ۱ و ۲ متروی تهران (امینی، ۱۳۷۳)

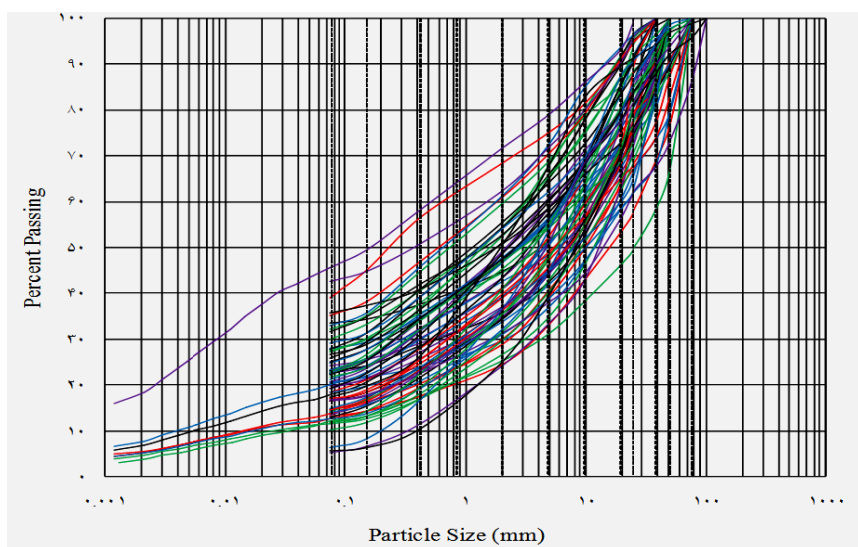
### ۳-۱. مشخصات خاک

پوشش داده شد (شکل ۲ب). با توجه به ضوابط آزمایش تک محوری و به دلیل ابعاد کوچک و قطر محدود قالب شفاف مورد استفاده (قطر ۱۰cm و ارتفاع ۲۵cm)، تمامی خاک‌ها از الک نمره  $3/8$  عبور داده شده و حداکثر اندازه سنگدانه‌ها به حدود ۱۰ میلی‌متر محدود گردیده است. البته پر واضح است که این امر منجر به دوغاب‌خوری کمتر نمونه‌ها و ایجاد مقداری خطا در نتایج به دست آمده می‌شود. بنابراین در دیاگرام دانه‌بندی، خاک‌های با دانه‌بندی شماره ۲، ۳ و ۴ در نقطه معادل با قطر الک  $3/8$  درصد عبوری برابر ۱۰۰٪ دارند و بر یکدیگر منطبق شده‌اند. جدول ۴ خواص خاک‌های مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد. حداکثر تراکم به دست آمده برای هر خاک و نحوه تراکم هر نمونه در لوله استوانه‌ای شفاف با استفاده از آزمایش تراکم استاندارد ASTM D-698 تعیین شده است.

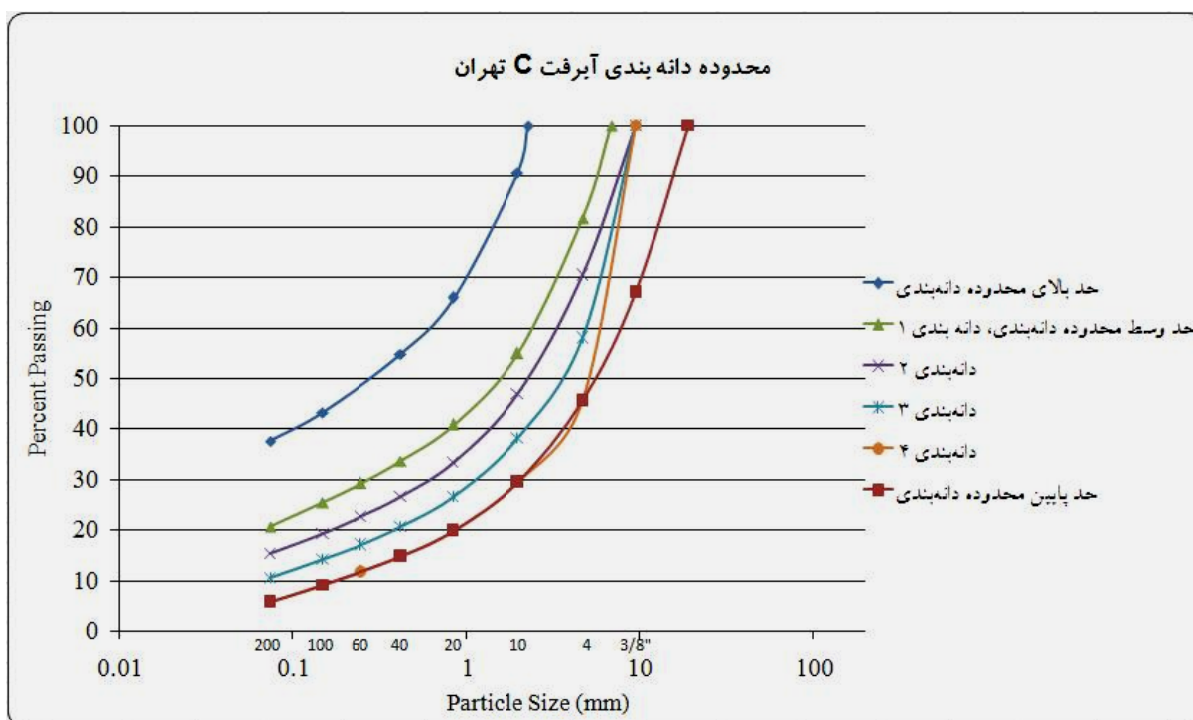
خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها بر اساس دیاگرام‌های دانه‌بندی به دست آمده از نمونه‌گیری از آبرفت C تهران و در نظر گرفتن یک محدوده دانه‌بندی مشخص برای ساخت خاک مورد نظر، در آزمایشگاه ساخته شد. محل اخذ نمونه‌های اولیه محل تقاطع خط ۲ و خط ۷ مترو مجاور ایستگاه نواب انتخاب شده است (اصغری، ۱۳۸۹) (شکل ۱)، علامت ستاره همان‌طور که در شکل ۲-الف ملاحظه می‌شود تمام دیاگرام‌های دانه‌بندی در یک محدوده مشخص قرار می‌گیرند که از دیاگرام‌های مربوط به مصالح ریزدانه تا خاک درشت‌دانه را شامل می‌شود. به دلیل بسیار ریزدانه بودن دیاگرام‌های سمت چپ محدوده مورد نظر که تقریباً تماماً از رس و لای تشکیل شده‌اند و ساخت آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های تزریق در آن‌ها بسیار مشکل است، محدوده دانه‌بندی نصف شده و بخش سمت راست آن با چهار دیاگرام دانه‌بندی

جدول ۳. طرح ساخت نمونه‌های استوانه‌ای از هر دانه‌بندی

شماره نمونه از هر دانه‌بندی	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8	S 9	S 10	S 11	S 12
درصد تراکم نسبی	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
فشار تزریق (bar) $\approx$ (kg/cm <sup>2</sup> )	۲	۴	۶	۲	۴	۶	۲	۴	۶	۲	۴	۶
نسبت آب به سیمان	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲



شکل ۲ الف. دیاگرام‌های دانه‌بندی به دست آمده از آبرفت C



شکل ۲ ب. دیاگرام‌های دانه‌بندی منطبق شده بر شکل الف به منظور پوشش محدوده دانه‌بندی

جدول ۴. خواص خاک‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

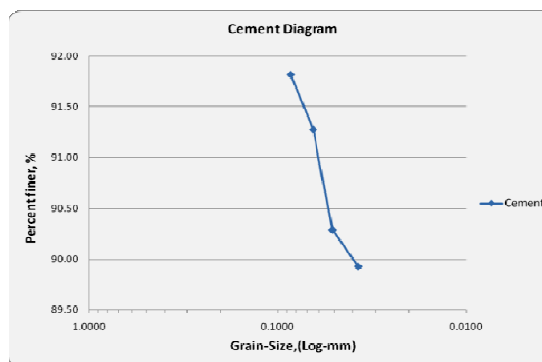
شماره دانه‌بندی خاک	$(\rho_d)_{Max} (kg/m^3)$	w opt %	LL	PL	PI	Cc	Cu	نوع خاک
۱	۱۸۹۰	۱۳/۵	۳۵/۸۱	۲۱/۵۵	۱۴/۲۶	۳/۵۷	۲۰۴	SC
۲	۱۹۱۰	۱۰/۳۴	۳۶/۷۰	۲۳/۴۱	۱۳/۲۹	۲/۶۹	۷۴/۸۸	SC
۳	۱۹۵۰	۱۲/۱	۳۴/۸۶	۲۰/۸۹	۱۳/۹۷	۲/۴۰	۴۸/۵۶	SW-SC
۴	۱۹۶۰	۱۱/۹	۴۵/۶۳	۲۲/۶۵	۲۲/۹۸	۲/۲۷	۳۷/۶۶	GW-GC

بیرون آوردن نمونه از داخل قالب، به هنگام عملیات سرپوش گذاری (Capping) بریده شد. این کار به دلیل حذف غیریکنواختی‌های بالای نمونه ناشی از عملیات تزریق و ایجاد تناسب ۲ به ۱ مابین ارتفاع و قطر نمونه انجام گرفت.

برای آنکه پس از عمل تراکم، تزریق امکان‌پذیر باشد در هنگام تراکم یک لوله در وسط استوانه قرار داده شد تا حفره‌ای برای انجام عمل تزریق ایجاد شود و سپس توسط ابزار کوبش خاص طراحی شده برای انجام این آزمایش، عمل تراکم صورت گرفت (شکل ۴). لازم به ذکر است برای اطمینان از حصول تراکم ۵۰ و ۷۰ درصد، به روش مبتنی بر سعی و خطا آزمایش‌های متعددی انجام و مشخص گردید که با قرار دادن لایه‌های خاک در سه لایه و با تعداد کوبش ۵ و ۱۰ ضربه با کوبه آزمایش تراکم استاندارد، به ترتیب تراکم ۵۰ و ۷۰ درصد حاصل می‌گردد (اقتباس از آزمایش تراکم استاندارد ASTM D-698). در این حالت انرژی تراکم نسبت به آزمایش تراکم استاندارد به ترتیب معادل ۰/۱ و ۰/۲ به دست آمده است. پس از آماده شدن نمونه و آب‌بندی سر و ته نمونه با صفحات و واشرهای نشان داده شده در شکل ۵، نمونه برای شروع عملیات تزریق آماده گردید. برای انجام تزریق از سطل و سایر ادوات تزریق نشان داده شده در شکل ۶ استفاده شده است. همچنین مطابق با جدول ۳ برای تزریق نمونه‌ها از دو دوغاب سیمانی با نسبت آب به سیمان،  $(W/C)$  ۱ و ۲ بدون هیچ‌گونه افزودنی استفاده شد تا تأثیر افزایش میزان آب بر مقدار دوغاب‌خوری نمونه‌ها بررسی شود (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

### ۳-۲. سیمان مورد استفاده جهت عملیات تزریق

به دلیل کاربرد فراوان سیمان پرتلند II در صنایع ساختمانی این نوع سیمان برای انجام عملیات تزریق انتخاب شد که دیگرام دانه‌بندی آن با استفاده از آزمایش هیدرومتری استخراج و در شکل ۳ نشان داده شده است (اقتباس از استاندارد ASTM D-422). با توجه به این دیگرام قطر ۹۰ درصد عبوری یا D90 سیمان مورد استفاده معادل با ۰/۳۹ میلی‌متر می‌باشد. لازم به یاد آوری است که بلین سیمان مورد استفاده برابر ۳۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم بوده است.



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی سیمان مورد استفاده

### ۴. آماده سازی نمونه‌های خاک و انجام عملیات تزریق

به منظور انجام تزریق در نمونه خاک لازم است که آماده سازی نمونه با تراکم مورد نظر صورت گرفته و سپس با اعمال فشارهای تعریف شده تزریق صورت گیرد. قطر قالب استوانه‌ای شفاف برابر ۱۰ و ارتفاع آن‌ها برابر ۲۵ cm در نظر گرفته شده که ۵ cm ابتدایی نمونه بعد از عملیات تزریق و

شد، بدلیل محدودیت‌های موجود در سیستم برای تحمل فشار، فشار عملیات تزریق از ۶ بار بالاتر نرفت، زیرا در یک مورد در ابتدای عملیات نمونه‌سازی افزایش فشار تا ۱۰ بار منجر به ترکیدن قالب شفاف نمونه‌سازی و توقف عملیات تزریق گردید.

#### ۵. پردازش نتایج بدست آمده از عملیات تزریق

۱-۵. ارائه معیار جهت تزریق پایدیری خاک مورد آزمایش بعد از تخلیه خاک تزریق شده از درون قالب‌ها همانطور که توضیح داده شد به جهت بدست آوردن میزان دوغاب‌خوری وزن نمونه تزریق شده محاسبه و از وزن اولیه نمونه کسر شد. همچنین نتیجه عملیات تزریق با استفاده از مشاهدات بصری با سه عبارت موفق، ناکافی و ناموفق ثبت شد (شکل ۷) تا براساس آن رابطه‌ای برای پیش‌بینی نتیجه عملیات تزریق براساس پارامترهای پیش از تزریق از قبیل فشار، درصد تراکم، محتوای ریزدانه خاک و نسبت آب به سیمان ارائه شود. همانطور که ملاحظه می‌شود در نمونه با نتیجه تزریق موفق دوغاب تمام خلل و فرج موجود در نمونه را پر کرده است، در تزریق ناکافی تقریباً نیمی از فضای نمونه تحت تأثیر دوغاب قرار نگرفته است و در تزریق ناموفق دوغاب تنها در چند نقطه خاک را شکافته و به جداره لوله استوانه‌ای شفاف رسیده است. در جدول (۵) مشخصات نمونه های ساخته شده به همراه نتیجه عملیات تزریق و آزمایش تک‌محوری آورده شده است. (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل ۷. شمای نتیجه تزریق سه نمونه: موفق، ناکافی، ناموفق



شکل ۵. قالب ساخت نمونه

#### ۴-۱. برنامه ساخت نمونه‌ها

همان‌گونه که بیان شد نمونه‌سازی مطابق با جدول ۳ برای هر خاک با دانه‌بندی مشخص، انجام گرفته است. در هر نوبت سه نمونه استوانه‌ای خاک آماده شده و عملیات تزریق مطابق برنامه، با فشارها و نسبت‌های آب به سیمان مختلف اجرا شد. مطابق این جدول از هر نوع دانه‌بندی خاک ۱۲ نمونه استوانه‌ای ساخته شد. بدین صورت که ابتدا مثلاً نمونه‌های با تراکم ۷۰٪، آماده و تحت ۳ فشار متفاوت ۲، ۴ و ۶ بار با نسبت آب به سیمان ۱ تزریق شدند و در نوبت بعد نمونه‌های با ۷۰٪ تراکم با همان ۳ فشار ولی این بار با نسبت آب به سیمان ۲ تحت تزریق قرار گرفتند. سپس نمونه‌های با ۵۰٪ تراکم آماده و تحت فشارهای متفاوت با نسبت آب به سیمان ۱ و ۲ تزریق شدند. روش انجام عملیات تزریق از استاندارد ASTM D-4320 اقتباس شده است.

حداکثر فشار مورد استفاده در آزمایش‌ها برابر ۶ بار در نظر گرفته شد و ملاحظه شد که در عمده نمونه‌سازی‌های انجام شده یک فشار تزریق برابر با ۴ بار نیز برای انجام عملیات تزریق موفق، کافی است. در مواردی که حتی با وجود افزایش فشار تزریق نتیجه عملیات به صورت ناموفق و یا ناکافی ثبت



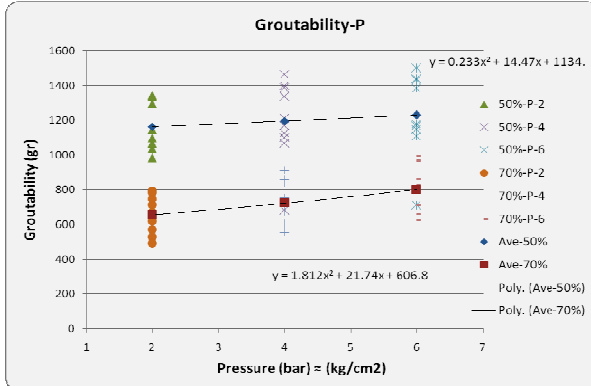
جدول ۵. مشخصات نمونه های ساخته شده به همراه ذکر نتیجه آزمایش ها

نام نمونه	RD %	فشار تزریق (bar) $\approx$ (kg/cm <sup>2</sup> )	w/c	نتیجه تزریق	FC %	D <sub>10</sub> (خاک)	d <sub>90</sub> (دوغاب)	میزان دوغاب خوری (gr)	مقاومت حداکثر نمونه (kg/cm <sup>2</sup> )
S 1-1	70	2	1	ناکافی	39.57	0.010	0.039	710	1.23
S 1-2	70	4	1	ناموفق	39.57	0.010	0.039	755	0.14
S 1-3	70	6	1	ناموفق	39.57	0.010	0.039	655	1.70
S 1-4	70	2	2	ناکافی	39.57	0.010	0.039	792	0.23
S 1-5	70	4	2	موفق	39.57	0.010	0.039	914	0.35
S 1-6	70	6	2	موفق	39.57	0.010	0.039	994	0.40
S 1-7	50	2	1	ناکافی	39.57	0.010	0.039	1097	1.10
S 1-8	50	4	1	ناموفق	39.57	0.010	0.039	682	1.19
S 1-9	50	6	1	ناموفق	39.57	0.010	0.039	711	1.35
S 1-10	50	2	2	موفق	39.57	0.010	0.039	1295	1.41
S 1-11	50	4	2	ناکافی	39.57	0.010	0.039	1400	0.36
S 1-11*	50	4	2	موفق	39.57	0.010	0.039	1387	0.61
S 1-12	50	6	2	موفق	39.57	0.010	0.039	1438	0.81
S 2-1	70	2	1	موفق	29.86	0.043	0.039	674	1.54
S 2-2	70	4	1	موفق	29.86	0.043	0.039	720	2.02
S 2-3	70	6	1	موفق	29.86	0.043	0.039	786	1.21
S 2-4	70	2	2	ناکافی	29.86	0.043	0.039	782	0.13
S 2-5	70	4	2	موفق	29.86	0.043	0.039	862	1.32
S 2-6	70	6	2	موفق	29.86	0.043	0.039	967	0.26
S 2-7	50	2	1	موفق	29.86	0.043	0.039	1148	0.65
S 2-8	50	4	1	موفق	29.86	0.043	0.039	1215	0.49
S 2-9	50	6	1	موفق	29.86	0.043	0.039	1180	0.56
S 2-10	50	2	2	موفق	29.86	0.043	0.039	1038	0.35
S 2-11	50	4	2	موفق	29.86	0.043	0.039	1339	0.55
S 2-12	50	6	2	موفق	29.86	0.043	0.039	1383	0.65
S 2-2 P	70	4	1	موفق	29.86	0.043	0.039	674	-----
S 2-9 P	50	6	1	موفق	29.86	0.043	0.039	1170	-----
S 3-1	70	2	1	ناموفق	24.03	0.090	0.039	525	1.21
S 3-2	70	4	1	ناموفق	24.03	0.090	0.039	601	0.95
S 3-3	70	6	1	ناکافی	24.03	0.090	0.039	711	1.71
S 3-4	70	2	2	ناکافی	24.03	0.090	0.039	748	0.33
S 3-5	70	4	2	ناکافی	24.03	0.090	0.039	837	0.36
S 3-6	70	6	2	موفق	24.03	0.090	0.039	860	2.04
S 3-7	50	2	1	موفق	24.03	0.090	0.039	1070	1.11
S 3-8	50	4	1	موفق	24.03	0.090	0.039	1101	0.46
S 3-9	50	6	1	ناکافی	24.03	0.090	0.039	1146	0.69
S 3-10	50	2	2	موفق	24.03	0.090	0.039	1345	0.51
S 3-11	50	4	2	موفق	24.03	0.090	0.039	1465	0.76
S 3-12	50	6	2	موفق	24.03	0.090	0.039	1500	0.89
S 3-1 P	70	2	1	ناموفق	24.03	0.090	0.039	616	-----
S 3-2 P	70	4	1	موفق	24.03	0.090	0.039	601	-----
S 3-8 P	50	4	1	موفق	24.03	0.090	0.039	1128	-----
S 4-1	70	2	1	ناموفق	17.16	0.201	0.039	489	0.49
S 4-2	70	4	1	ناموفق	17.16	0.201	0.039	555	0.68
S 4-3	70	6	1	ناموفق	17.16	0.201	0.039	623	1.22
S 4-4	70	2	2	ناکافی	17.16	0.201	0.039	668	0.28
S 4-5	70	4	2	ناکافی	17.16	0.201	0.039	710	0.84
S 4-6	70	6	2	ناکافی	17.16	0.201	0.039	825	0.91
S 4-7	50	2	1	موفق	17.16	0.201	0.039	984	0.86
S 4-8	50	4	1	موفق	17.16	0.201	0.039	1070	1.08
S 4-9	50	6	1	ناکافی	17.16	0.201	0.039	1108	1.37
S 4-10	50	2	2	موفق	17.16	0.201	0.039	1337	0.52
S 4-11	50	4	2	موفق	17.16	0.201	0.039	1171	0.35
S 4-12	50	6	2	موفق	17.16	0.201	0.039	1431	0.71
S 4-1 P	70	2	1	ناموفق	17.16	0.201	0.039	573	-----

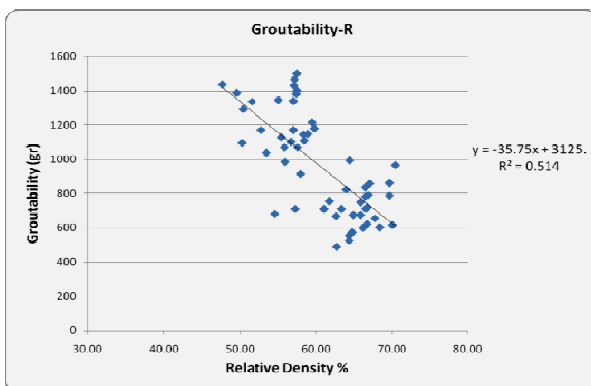
RD (Relative Density) : تراکم نسبی نمونه، w/c : نسبت آب به سیمان، FC (Fine Content) : محتوای ریزدانه خاک،\* : نمونه‌ای که به دلیل ناقص شدن نمونه اصلی بازسازی شده است، P (Permeability) : نمونه‌هایی که به منظور انجام آزمایش نفوذپذیری ساخته شده‌اند. عدد اول (از سمت چپ) در نام هر نمونه بیانگر شماره دانه‌بندی خاک مورد استفاده در شکل ۲ ب و عدد دوم نشان دهنده شماره نمونه در جدول ۲ می‌باشد. برای مثال S 3-8 بیانگر نمونه هشتم از خاک با دانه‌بندی شماره ۳ است

شده است که با افزایش این نسبت میزان دوغاب‌خوری در نمونه‌های خاک افزایش می‌یابد.

با توجه به تجربیات به دست آمده و نتایج ثبت شده در خلال آزمایش‌ها، مشخص شد که میزان دوغاب‌خوری نمونه‌ها معیاری مناسب برای تفکیک نتیجه عملیات تزریق به دو دسته موفق و ناموفق می‌باشد. به دلیل اینکه عدد دوغاب‌خوری نمونه‌های با نتیجه تزریق ناکافی در هر دو محدوده تزریق موفق و ناموفق قرار دارد، دسته‌بندی نمونه‌ها تنها به صورت دودسته موفق و ناموفق بیان شد. بر این اساس میزان دوغاب‌خوری نمونه‌ها در مقابل نتیجه عملیات تزریق ترسیم شده است (شکل ۱۱). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود نمونه‌های بالای مرز دوغاب‌خوری ۷۵۰ گرم، عمدتاً نمونه‌های با نتیجه عملیات تزریق موفق و نمونه‌های زیر این مرز، عمدتاً در دسته نمونه‌های با نتیجه عملیات تزریق ناموفق قرار دارند. در نتیجه عدد دوغاب‌خوری ۷۵۰ گرم به‌عنوان مرز دسته‌بندی نمونه‌ها به دو دسته موفق و ناموفق قرار داده شد. محور افقی نمودار، بیانگر ارزیابی چشمی نتیجه تزریق است.



شکل ۸. تغییرات میزان دوغاب‌خوری در مقابل افزایش فشار



شکل ۹. تغییرات میزان دوغاب‌خوری خاک در مقابل درصد تراکم نمونه

میزان دوغاب‌خوری هر نمونه خاک با استفاده از اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از تزریق به دست آمد. مقادیر عددی دوغاب‌خوری در جدول ۵ آورده شده است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر میزان دوغاب‌خوری خاک، فشار تزریق است. نتایج به دست آمده از تزریق نشان داد که با افزایش فشار تزریق (P) میزان دوغاب‌خوری خاک افزایش پیدا می‌کند (شکل ۸).

در این شکل میانگین دوغاب‌خوری معادل با فشارهای به کار گرفته شده برای نمونه‌های با تراکم ۵۰٪ و ۷۰٪ به طور جداگانه در مقابل فشار ترسیم شده است. نتیجه تزریق نمونه‌های با تراکم ۷۰٪ عمدتاً به صورت ناکافی و یا ناموفق ثبت شد که بر این اساس همان‌طور که در دیاگرام برازش شده برای این نقاط ملاحظه می‌شود، این منحنی دارای شیب بیشتری است؛ به این معنی که نمونه‌ها به طور کامل اشباع نشده‌اند و با افزایش فشار تزریق همچنان امکان دوغاب‌خوری بیشتر نمونه‌ها وجود دارد. در صورتی که شیب منحنی برازش شده بر نقاط با تراکم ۵۰٪ که نتیجه تزریق آن‌ها عمدتاً موفق بوده، کمتر است. این امر نشان‌دهنده اشباع فضای محدود داخل قالب و عدم دوغاب‌خوری بیشتر با افزایش فشار تزریق است.

از دیگر پارامترهای مهم تأثیرگذار بر میزان دوغاب‌خوری خاک و متعاقب آن نتیجه عملیات تزریق، درصد تراکم خاک است. مشاهدات تجربی حین آزمایش‌ها نشان داد این پارامتر مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر نتیجه عملیات تزریق است و همان‌طور که ذکر شد نتیجه تزریق اکثر نمونه‌های با تراکم ۵۰٪ به صورت موفق ثبت شده است. در طول عملیات تزریق مشخص گردید که با افزایش میزان تراکم خاک، دوغاب‌خوری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد (شکل ۹).

در این آزمایش‌ها همچنین تأثیر تغییرات نسبت آب به سیمان بر میزان دوغاب‌خوری نمونه‌های استوانه‌ای خاک بررسی شده است. به این منظور از دو دوغاب با نسبت آب به سیمان به ترتیب برابر ۱ و ۲ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود میانگین دوغاب‌خوری معادل با هر دو نسبت آب به سیمان در مقابل نسبت آب به سیمان ترسیم

بین پارامترهای ورودی و نتایج خروجی (دوغاب‌خوری) به روش‌های مختلف و با چیدمان‌های مختلف پارامترهای ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS، در نهایت ضرایب معادله دوغاب‌خوری به صورت زیر به‌دست آمد که متعاقب آن می‌توان نتیجه عملیات تزریق را پیش‌بینی کرد:

(۱)

$$GR = -16.59 \frac{D_{10}(Soil)}{d_{90}(grout)} + 1.29P \times \frac{w}{c} + 17.19 \frac{10^4}{R \times FC} - 36.08$$

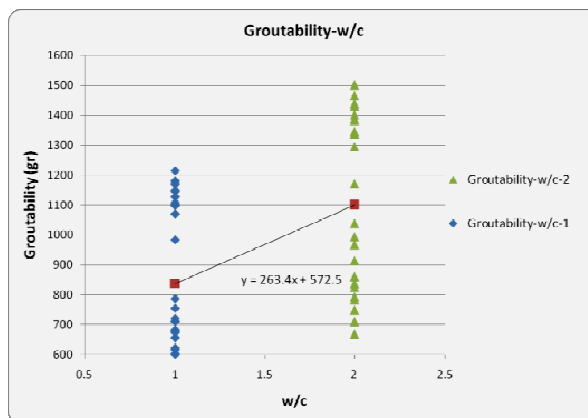
که در این معادله مقادیر درصد تراکم (RD) و محتوای ریزدانه خاک (FC) بر حسب درصد و واحد فشار نیز بر حسب بار است. به منظور بی بعد کردن معادله، واحد ضریب جمله دوم معادله به صورت  $\frac{1}{\text{بار}}$  در نظر گرفته شده است. ضریب همبستگی پیرسون (R-Squared Value) برای این معادله برابر با ۰/۸۱ است.

بر این اساس با جای‌گذاری پارامترهای اولیه عملیات تزریق در یک پروژه واقعی (فشار تزریق، نسبت آب به سیمان و...) در این معادله می‌توان نتیجه عملیات تزریق را پیش‌بینی کرد. بدین صورت که اگر  $GR > 25$  باشد نتیجه عملیات تزریق را می‌توان به صورت موفق در نظر گرفت و در غیر این صورت نتیجه عملیات تزریق ناموفق است.

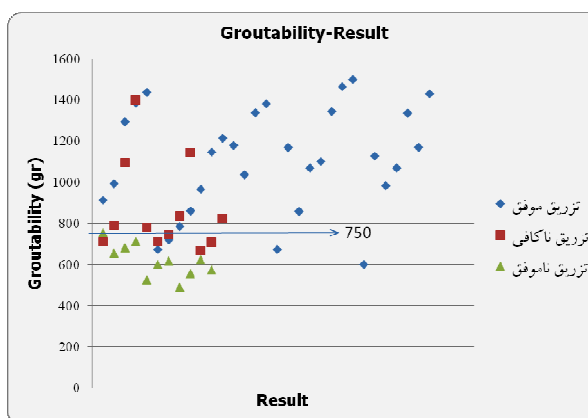
#### ۲-۵. ارائه معیار مقاومت تک محوری نمونه پس از تزریق

به منظور رسیدن دوغاب سیمانی به یک مقاومت مطلوب، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در داخل کیسه پلاستیکی قرار داده شدند تا عمل‌آوری دوغاب سیمانی با رطوبت داخل نمونه انجام شود. سپس برای اینکه بارگذاری در آزمایش تک محوری به صورت یکنواخت روی نمونه استوانه‌ای وارد شود، درپوش‌گذاری در دو سوی نمونه‌ها با استفاده از اندود گچی انجام شده و نمونه‌ها تحت بار آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند (اقتباس از استاندارد ASTM D-2166). در شکل ۱۲ یک نمونه آماده برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری دیده می‌شود. همچنین در شکل ۱۳ یک نمونه شکسته شده با زاویه تقریباً ۴۵ درجه ملاحظه می‌گردد.

(حسین‌پور و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل ۱۰. تغییرات میزان دوغاب‌خوری خاک در مقابل نسبت آب به سیمان



شکل ۱۱. تفکیک نتیجه مشاهدات بصری نمونه‌ها در مقابل میزان دوغاب‌خوری

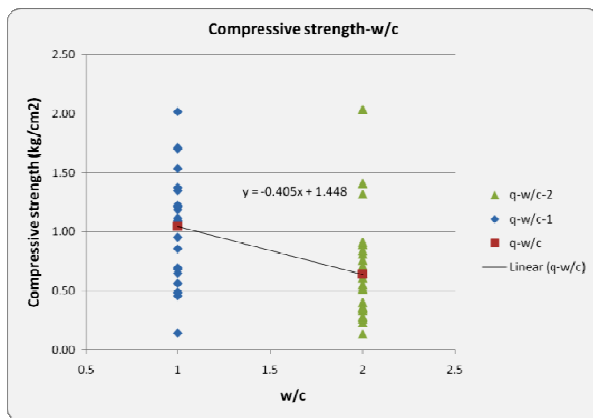
با توجه به جدول ساخت نمونه‌های استوانه‌ای جدول ۳ پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، فشار تزریق (P)، نسبت آب به سیمان w/c، درصد تراکم خاک (RD)، و دانه‌بندی خاک است. در این تحقیق دانه‌بندی خاک با لحاظ دو پارامتر  $D_{10}$  و محتوای ریزدانه خاک (FC) در روند محاسبات دخالت داده شده است. همچنین تأثیر دانه‌بندی سیمان بر دوغاب‌خوری نیز به صورت  $d_{90}$  در معادله وارد شده است.

برای سهولت در امر فرموله کردن معادله دوغاب‌خوری و به دست آوردن ضرایب منطقی برای پارامترهای معادله، نتایج به دست آمده برای دوغاب‌خوری نمونه‌ها به گونه‌ای که مرز دوغاب‌خوری ۷۵۰ معادل با عدد ۲۵ باشد با تقسیم بر عدد ۳۰، مقیاس شده‌اند. بر این اساس با انجام چندین درون‌یابی

نمونه‌های معادل با هر دو نسبت آب به سیمان در مقابل نسبت آب به سیمان ترسیم شده است که با توجه به شیب منحنی برازش داده شده بر نقاط، یک کاهش حدوداً معادل با ۵۰٪ در میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها ملاحظه می‌شود.

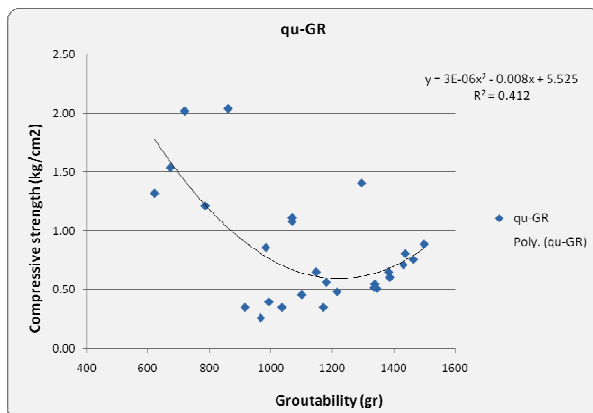
جدول ۶. مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت پایه نمونه‌های تزریق نشده

نام نمونه	RD %	qu(kg/cm <sup>2</sup> )
S B1-50	50	0.004
S B2-50	50	0.003
S B3-50	50	0.003
S B4-50	50	0.002
S B1-70	70	0.071
S B2-70	70	0.035
S B3-70	70	0.065
S B4-70	70	0.069



شکل ۱۴. تغییرات میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقابل

افزایش نسبت آب به سیمان



شکل ۱۵. تغییرات میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقابل

افزایش میزان دوغاب‌خوری



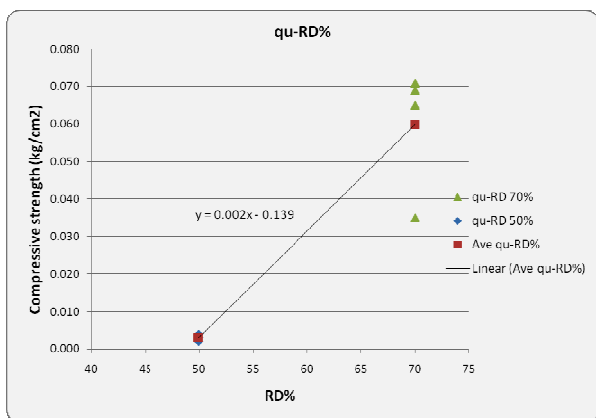
شکل ۱۳. یک نمونه شکسته شده با زاویه تقریباً ۴۵ درجه



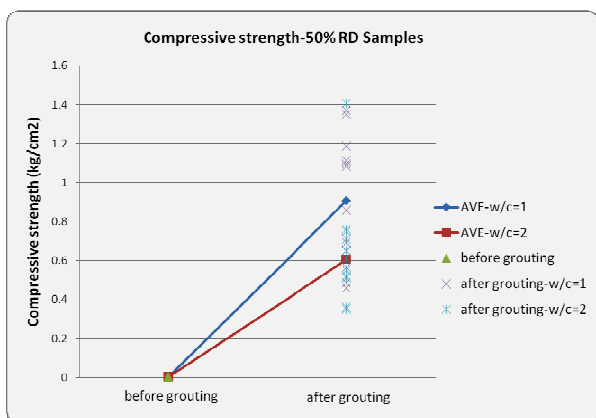
شکل ۱۲. یک نمونه سرپوش گذاری شده آماده برای شکستن

برای به دست آوردن نسبت مقاومت پس از تزریق نمونه‌های دوغاب خورده به مقاومت نمونه پیش از عملیات تزریق، از هر دانه‌بندی دو نمونه با تراکم‌های ۵۰٪ و ۷۰٪ ساخته شد و مقاومت آن‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش تک محوری اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است.

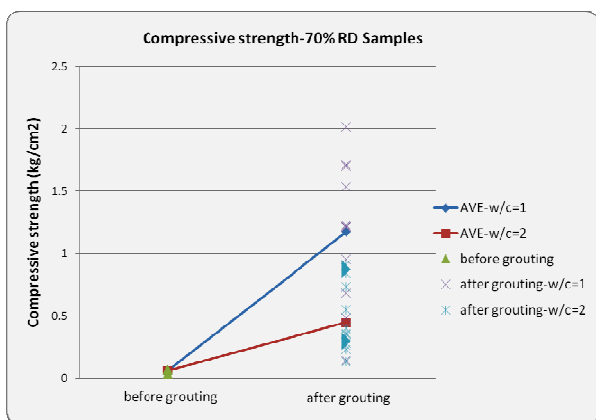
ارزیابی مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌ها نشان داد که همانند آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌های خاک نیز کاهش پیدا می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، میانگین مقاومت فشاری



شکل ۱۶. میانگین تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های پایه دوغاب نخورده در مقابل افزایش درصد تراکم



شکل ۱۷. افزایش مقاومت برای نمونه‌های با تراکم ۵۰٪



شکل ۱۸. افزایش مقاومت برای نمونه‌های با تراکم ۷۰٪

همان‌طور که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ دیده می‌شود برای نمونه‌های با تراکم پایه ۵۰٪ و نسبت آب به سیمان ۱، حدود ۳۰۰ برابر افزایش مقاومت رخ داده است که همان‌طور که

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تک محوری، مشخص شد که مقاومت فشاری نمونه‌ها با میزان دوغاب‌خوری آن‌ها مرتبط است که این مسئله در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل (که تنها برای نمونه‌های با نتیجه تزریق موفق ترسیم شده) ملاحظه می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌ها با یک منحنی درجه دوم با میزان دوغاب‌خوری نمونه‌ها مرتبط است. با توجه به شکل، در ابتدا با افزایش میزان دوغاب‌خوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش در ناحیه انتقال از نسبت آب به سیمان ۱ به ۲ قرار دارد و همان‌طور که توضیح داده شد مقاومت نمونه‌ها با افزایش نسبت آب به سیمان، کاهش می‌یابد. از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان دوغاب‌خوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که نمونه‌های واقع در این ناحیه دارای نسبت آب به سیمان ۲ بوده و با افزایش میزان دوغاب‌خوری، مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش پیدا کرده است.

انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری روی نمونه‌های پایه نشان داد نمونه‌های دوغاب‌خورد با تراکم ۷۰٪ مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های با تراکم ۵۰٪ دارند (شکل ۱۶). در نتیجه درصد تراکم نمونه‌ها نیز به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در مقاومت فشاری نمونه‌ها در نظر گرفته شد. با انجام عملیات تزریق همان‌طور که انتظار می‌رود مقاومت نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند که تأثیر تزریق بر این افزایش مقاومت برای نمونه‌های با درصد تراکم پایه ۵۰٪ بیشتر است. دلیل آن مقاومت پایه بسیار کمتر حالت قبل از تزریق برای نمونه‌های با درصد تراکم ۵۰٪ و میزان دوغاب‌خوری بیشتر این نمونه‌ها است. این مسئله باعث آن شده است که در تعیین نسبت افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها برای نمونه‌های با تراکم ۵۰٪، مخرج کسر بسیار کوچک شده و در نتیجه نسبت افزایش ظرفیت باربری برای این نمونه‌ها عدد بسیار بزرگی شود (شکل ۱۷).

کاهش نفوذپذیری آبرفت C تهران مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور ابتدا از هر خاک، ۲ نمونه با تراکم ۵۰ و ۷۰ درصد تهیه شد و نمونه‌ها تحت آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر قرار گرفتند تا نفوذپذیری خاک قبل از عملیات تزریق اندازه‌گیری شود (استاندارد ASTM D 2434-87). سپس با توجه به تجربیات به دست آمده از نمونه‌سازی برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، دو نمونه از هر خاک با پیش‌بینی نتیجه عملیات تزریق موفق و ناموفق یا ناکافی ساخته شد و نمونه‌ها یک روز بعد از تزریق تحت آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر قرار گرفتند تا میزان کاهش نفوذپذیری خاک بعد از عملیات تزریق، نسبت به حالت قبل از تزریق مورد ارزیابی قرار گیرد. در جدول ۷ مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش نفوذپذیری آورده شده است. در شکل ۱۹ یک نمونه خاک بعد از عملیات تزریق تحت آزمایش نفوذپذیری مشاهده می‌شود. (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل ۱۹. نمونه خاک تزریق شده تحت آزمایش نفوذپذیری با هد متغیر

توضیح داده شد دلیل این امر مقاومت بسیار کم نمونه‌های پایه دوغاب نخورده و در نتیجه افزایش نسبت ظرفیت باربری است. همچنین برای همین نمونه‌ها و نسبت آب به سیمان ۲ حدود ۲۰۰ برابر افزایش مقاومت دیده می‌شود. برای نمونه‌های با تراکم پایه ۷۰٪ و نسبت آب به سیمان ۱، یک افزایش حدود ۲۰ برابری در میزان مقاومت نمونه‌ها و برای همین نمونه‌ها با نسبت آب به سیمان ۲، حدود ۸ برابر افزایش مقاومت ایجاد شده است.

با توجه به مطالب بیان شده مشخص شد که از پارامترهای عمده تأثیرگذار بر مقاومت فشاری نمونه‌ها میزان دوغاب‌خوری، نسبت آب به سیمان و درصد تراکم نمونه‌ها می‌باشد. بر این اساس با انجام چندین درون‌یابی بین پارامترهای ورودی و نتایج خروجی (مقاومت فشاری) به روش‌های مختلف و با چیدمان‌های مختلف، پارامترهای ذکر شده با استفاده از نرم‌افزار تحلیل آماری SPSS، در نهایت ضرایب معادله پیش‌بینی مقاومت فشاری نمونه‌های با نتیجه تزریق موفق، به صورت زیر به دست آمد:

(۲)

$$q_u \text{ (kg/cm}^2\text{)} =$$

که در آن GR عدد دوغاب‌خوری به دست آمده از معادله ۱ است (برای نمونه‌های با نتیجه تزریق موفق). RD نیز به صورت درصد در معادله وارد می‌شود. ضریب همبستگی پیرسون (R-Squared Value) برای این معادله برابر با ۰/۶۱ است.

از این معادله برای پیش‌بینی نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های استوانه‌ای به دست آمده از محل، با این شرط که پیش‌بینی اولیه نتیجه عملیات تزریق با استفاده از معادله ۱ و براساس پارامترهای اولیه محل و عملیات تزریق، با عبارت موفق مشخص شده باشد، می‌توان استفاده کرد.

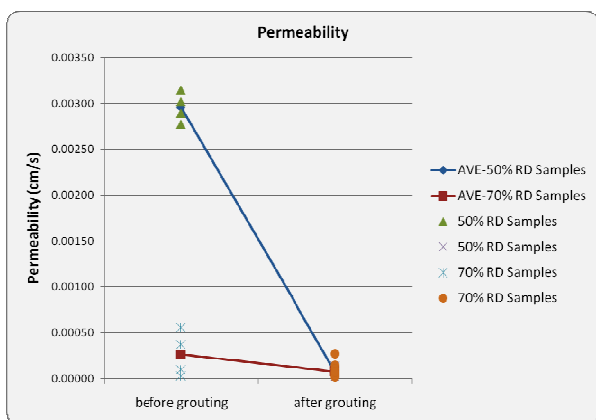
### ۳-۵. تحلیل نتایج نفوذپذیری

در بخش دیگری از این تحقیق نفوذپذیری هر چهار تیپ خاک قبل و بعد از تزریق اندازه‌گیری شد تا تأثیر تزریق بر

جدول ۷. مشخصات نمونه‌های آزمایش نفوذپذیری

نام نمونه	S 1P-50	S 1P-70	S 1P-1	S 1P-2	S 1P-3	S 2P-50	S 2P-70	S 2P-1	S 2P-2	S 2P-3	S 2P-4
RD %	50	70	50	70	70	50	70	70	50	70	70
دوغاب خوری	-----	-----	827	523	720	-----	-----	674	1170	660	600
نتیجه تزریق	نمونه پایه	نمونه پایه	ناکافی	ناموفق	ناموفق	نمونه پایه	نمونه پایه	موفق	موفق	ناموفق	ناموفق
P (cm/s)	0.00278	0.00010	0.00002	0.00001	0.00003	0.00290	0.00056	0.00004	0.00013	0.00027	0.00015
نام نمونه	S 3P-50	S 3P-70	S 3P-1	S 3P-2	S 3P-3	S 3P-4	S 4P-50	S 4P-70	S 4P-1	S 4P-2	S 4P-3
RD %	50	70	70	70	50	70	50	70	70	70	70
دوغاب خوری	-----	-----	616	601	1128	510	-----	-----	573	390	422
نتیجه تزریق	نمونه پایه	نمونه پایه	ناموفق	موفق	موفق	ناموفق	نمونه پایه	نمونه پایه	ناموفق	ناموفق	ناموفق
P (cm/s)	0.00315	0.00003	0.00011	0.00005	0.00007	0.00003	0.00302	0.00037	0.00005	0.00003	0.00007

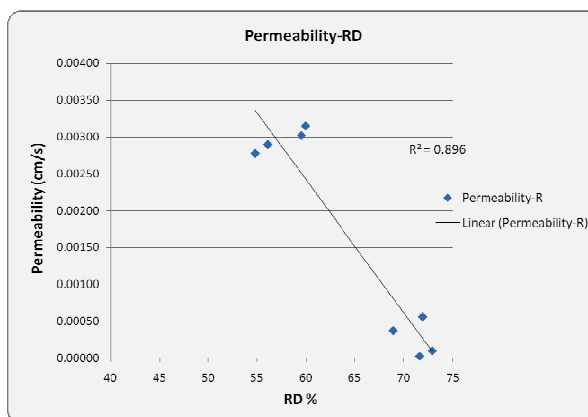
نتایج به دست آمده مطابق شکل ۲۱ نشان داد تأثیر تزریق، در کاهش مقدار نفوذپذیری آب در خاک برای نمونه‌های با تراکم ۵۰٪ بیشتر از ۷۰٪ است. دلیل این امر نفوذپذیری بیشتر نمونه‌های خاک با تراکم ۵۰٪ قبل از تزریق و نیز دوغاب‌خوری بیشتر نمونه‌های با تراکم ۵۰٪ و متعاقب آن کاهش بیشتر نفوذپذیری این نمونه‌های خاک است.



شکل ۲۱. تأثیر تزریق در کاهش میزان نفوذپذیری نمونه‌ها

در شکل ۲۱ میانگین نفوذپذیری نمونه‌های خاک در قبل و بعد از تزریق آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود

مطابق با جدول ساخت نمونه‌های آزمایش نفوذپذیری، نفوذپذیری نمونه‌های خاک برای هر دو تراکم ۵۰ و ۷۰ درصد، قبل و بعد از تزریق اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود درصد تراکم، یک پارامتر مهم در میزان نفوذپذیری خاک است که با افزایش درصد تراکم، نفوذپذیری خاک‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر اگر در یک پروژه تونل‌سازی هدف از تزریق تنها کاهش تراوش آب به داخل تونل باشد در مناطقی از طول تونل که درصد تراکم خاک‌ها بالا است، شاید نیاز به انجام عملیات تزریق نباشد.



شکل ۲۰. تغییرات میزان نفوذپذیری خاک‌ها در مقابل افزایش

درصد تراکم برای نمونه‌های پایه

۲- پارامتر مؤثر دیگر در میزان دوغاب‌خوری خاک‌ها، نسبت آب به سیمان است. همان‌طور که نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزایش نسبت آب به سیمان قابلیت تزریق‌پذیری خاک را افزایش داده اما به طور معکوس تأثیر منفی بر میزان افزایش مقاومت خاک دارد. در نتیجه در یک عملیات واقعی تزریق، ابتدا باید هدف از تزریق شناسایی شده و سپس مبادرت به تصمیم‌گیری در مورد انتخاب پارامترهای اولیه عملیات تزریق شود. برای مثال اگر هدف از تزریق تنها جلوگیری از تراوش آب به داخل تونل باشد، یک تزریق با نسبت آب به سیمان ۲ می‌تواند کافی باشد و در صورتی که تونل به دلیل بار سازه‌های اطراف با خطر ریزش مواجه باشد در انتخاب نسبت آب به سیمان باید توجه کافی به عمل آید.

۳- درصد تراکم خاک محل نیز تأثیر قابل توجهی بر نتیجه عملیات تزریق دارد. در این تحقیق نشان داده شد که عمده نمونه‌های با نتیجه تزریق، موفق درصد تراکم پایینی دارند و هر چه درصد تراکم خاک بالا می‌رود برای رسیدن به یک نتیجه تزریق موفق، افزایش فشار تزریق و یا بالا بردن نسبت آب به سیمان و یا تأثیر هر دو باید بررسی شود.

از هر دو رابطه به دست آمده می‌توان برای پیش‌بینی نتیجه عملیات تزریق در انجام پروژه‌های واقعی استفاده کرد و این امر می‌تواند در برآورد هزینه‌های اولیه عملیات تزریق که بخش قابل توجهی از بار مالی پروژه‌های تونل‌سازی را به خود اختصاص می‌دهد مؤثر واقع شود. همچنین با توجه به اینکه عموماً در اکثر پروژه‌های عمرانی خاک به عنوان مصالح ناشناخته ارزیابی می‌شود و اطلاعات اندکی راجع به شرایط واقعی خاک در محل وجود دارد، استفاده از این رابطه باعث خواهد شد که از انجام کورکورانه تزریق پرهیز شده و یک دید کلی نسبت به نتیجه عملیات تزریق و انتخاب پارامترهای اولیه ایجاد شود.

نفوذپذیری نمونه‌های بعد از تزریق برای نمونه‌های معادل با هر دو درصد تراکم، با یکدیگر برابر است. با توجه به دیاگرام ارائه شده تأثیر تزریق بر کاهش میزان نفوذپذیری خاک‌های با تراکم حدود ۵۰٪ تقریباً معادل با ۹۷٪ می‌باشد و برای خاک‌های با تراکم ۷۰٪ معادل ۶۹٪ است (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

#### ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق مطالعه قابلیت تزریق‌پذیری آبرفت C تهران با توجه به پارامترهای مؤثر بر نتیجه عملیات تزریق از قبیل فشار، نسبت آب به سیمان، دانه‌بندی و درصد تراکم خاک و استخراج رابطه‌ای برای پیش‌بینی قابلیت تزریق‌پذیری و میزان افزایش مقاومت تک محوری خاک بوده است. برای این منظور از تراکم خاک‌های با دانه‌بندی مشخص در قالب‌های شفاف استوانه‌ای و تزریق دوغاب سیمانی با نسبت‌های آب به سیمان مختلف، تحت فشارهای متفاوت استفاده شده است. همچنین برای بیان تأثیر جنس و دانه‌بندی خاک و سیمان بر نتیجه عملیات تزریق، پارامترهای مربوط به اندازه دانه‌های خاک و سیمان و محتوای ریزدانه خاک‌ها نیز وارد رابطه دوغاب‌خوری خاک گردید. در مجموع عمده نتایج به دست آمده از این سری آزمایش‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- با توجه به دیاگرام‌های ارائه شده ملاحظه شد که قابلیت تزریق‌پذیری خاک‌ها رابطه‌ای مستقیم با فشار تزریق دارد. بدین ترتیب که برای خاک‌های با درصد تراکم بالاتر با افزایش فشار تزریق دوغاب‌خوری خاک، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و به منظور رسیدن به یک نتیجه تزریق موفق، افزایش فشار تزریق می‌تواند یک راهکار مناسب باشد.



## منابع

- اصغری، ا. (۱۳۸۹). گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی ایستگاه I2Q7. مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار.
- امینی، م. (۱۳۷۳). ویژگی‌های ژئوتکنیکی رسوبات کواترنر دشت تهران، مجموعه مقالات نخستین سمپوزیوم بین‌المللی کواترنر. دانشگاه تهران، ص. ۱۷۱-۱۷۵.
- بربریان، م. قریشی، م. ارژنگ، ا. مهاجر اشجعی، ا. (۱۳۶۴). پژوهش و بررسی ژرف نو زمین‌ساخت و خطر زمین لرزه، گسلش در گستره تهران و پیرامون. گزارش شماره ۵۶ سازمان زمین‌شناسی کشور.
- چشمی، ا. فاخر، ع. خامه‌چیان، م. (۱۳۷۸). زمین‌شناسی آبرفت‌های تهران و ارزیابی طبقه‌بندی ریبین جهت مطالعات زمین‌شناسی مهندسی. مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و چهارم شماره ۲ (۱-۱۵).
- حسین پور، ح. اسماعیلی، م. قارونی‌نیک، م. (۱۳۹۰). بررسی عملکرد تزریق در آبرفت C تهران به روش آزمایشگاهی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خط و سازه‌های ریلی. دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی راه آهن.
- مجدی، ع. ظهیری، م. (۱۳۸۵). مدل ریاضی نسبت تزریق‌پذیری خاک‌های دانه‌ای. نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۲ (۲۳۷ - ۲۴۹).
- Akbulut, S., 1999. The improvement of geotechnical properties in granular soils by grouting. Ph.D. Thesis, The Institute of the Istanbul Technical University, Istanbul.
- Akbulut, S., Saglamera, A., 2002. Estimating the groutability of granular soils: a new approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17: 371-380.
- ASTM, American Society for Testing and Materials, 1991. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA Vol.04.08.
- Bell, F.G., 1993. *Engineering Treatment of Soils*. E&FN Spon, London, pp. 10-160.
- Burwell, E.B., 1958. Cement and clay grouting of foundations, Practice of the corps of engineering. Soil Mechanics Foundation Div, ASCE 84, 1551y1-1551y22.
- Cambefort, H., 1951. Foliate gravelly alluvium with opened structure (In French). Proceedings of the Fourth Conference on Large Dams, New Delhi, Vol. IV, PP. 434-452.
- Cambefort, H., 1977. The principals and applications of grouting. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 10: 57-95.
- Department of the U.S. Army Corps of Engineers, 1984. *Engineering and Design Grouting Technology*, Washington DC. Engineer Manual (EM 1110-2-3506).
- Hendron, J., Lenahan, T., 1976. *Grouting in Soils, Vol. 2: Design and Operations Manual*. Federal Highway Administration, Halliburton Services, Duncan, Oklahoma, Technical Report.
- Incecik, M., Ceren, I., 1995. Cement grouting model tests. *Bulletin of The Technical University of Istanbul, Istanbul*, Vol. 48(2) : 305-317.
- Kutzner, C., 1996. *Grouting of Rock and Soil*. Balkema, Netherlands, pp. 10-195.
- Nicolini, E., Nova, R., 2000. Modelling of a tunnel excavation in a non-cohesive soil improved with cement mix injections. *Milan University of Technology, Computers and Geotechnics*, 27: 249-272.

Seung Ryull, K., 2006. Technical Solutions and Case Histories for Soft Ground Tunnelling in Urban Area. Training Course, President and CEO ESCO Consultant and Engineers Company, Korea.