

اصلاح خاکهای ماسه‌ای کربناته با استفاده از تزریق شیمیایی

محمود حسنلوراد^۱، حسین صالح زاده^۲، حبیب شاه نظری^۳

چکیده

در این مقاله قابلیت اصلاح ماسه کربناته محصول جزیره کیش با استفاده از یک دوغاب شیمیایی بررسی می‌گردد. ویژگی اصلی این خاک نسبت منافذ بالای داخل دانه ها و حالت خرد شدگی آنها در حین بارگذاری می‌باشد. فرآیند اصلاح خاک یادشده با استفاده از تزریق دوغاب سیلیکات سدیم همراه با افزودنی‌هایی مانند فرم آمید و آلومینات سدیم صورت گرفت. نمونه‌ها با دانسیته‌های نسبی اولیه مختلف ساخته و تزریق شدند. مقاومت تک محوری بیشینه، مدول مماسی اولیه و کرنش لحظه گسیختگی در نسبت آب به سیلیکات سدیم برابر ۰/۵ حاصل گردید. مقاومت تک محوری و مدول مماسی اولیه با گذشت زمان افزایش یافت ولی تغییرات کرنش لحظه گسیختگی، تابع نسبت آب به سیلیکات سدیم و مقادیر افزودنیها بود. فرماید باعث افزایش و آلومینات سدیم باعث کاهش مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته مماسی اولیه می‌گردند. علاوه براین افزایش اندازه دانه ها باعث کاهش مقاومت تک محوری خاک تزریق شده می‌گردد. دانه بندی یکنواخت منجر به رفتار تنش-کرنش ترد و دانه بندی گسترده منجر به رفتار تنش-کرنش نرم می‌گردد. وجود املاحی مانند سولفاتها و کلرایدهای محلول در آب باعث کاهش مقاومت تک محوری و افزایش مدول مماسی اولیه خاک تزریق شده می‌گردد.

کلمات کلیدی

خاک کربناته، تزریق، سیلیکات سدیم، مقاومت تک محوری

Improvement of Calcareous Sand by Using Chemical Grouting

M. Hassanlourad, H. Salehzadeh, H. Shahnazari

ABSTRACT

In this paper, the improvement potential of calcareous sand produced in Kish Island by using a chemical grout is investigated. The main characteristics of this sand are its high voids ratio and tendency to be crushed under moderate stresses. The improvement process of sand is conducted using a sodium silicate grout injected with additives such as formamide and sodium aluminate. Samples were prepared in different initial relative densities and then grouted. It is observed that the maximum uniaxial strength, initial tangent modulus and failure strain are obtained in water/silicate ratio of 0.5. Uniaxial strength and initial tangent modulus are increased with time but failure strain variation with time is a function of water/sodium silicate ratio and additives content. Formamide increases and sodium aluminate decreases the uniaxial strength and initial tangent modulus. Furthermore, increasing of grain size decreases grouted sand uniaxial strength. Uniform grading results in brittle and non-uniform grading results in ductile stress-strain behavior. Presence of sulphates and chlorides solved in water reduces the uniaxial strength and increases the initial tangent modulus of grouted sand.

KEYWORDS

^۱ عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان و دانشجوی دکتری دانشگاه علم و صنعت ایران
Email: mhassanlourad@iust.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران
Email: salehzadeh@iust.ac.ir

ⁱⁱⁱ استادیار دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران
Email: hshahnazari@iust.ac.ir

Calcareous sand, particle crushing, chemical grout, uniaxial strength.

که دوغاب سیلیکات سدیم در شرایط انجماد و یخ زدندگی متوالی، از نظر ابعادی در دماهای مختلف، مقاومت در برابر اسیدها، بازها، نمکها، باکتریها و قارچها دارای پایداری خوبی است [۱۲].

در این مقاله پارامترهای موثر بر روی مقاومت برشی خاک کربناته تزریق شده مانند نسبت آب به سیمان، دانسته نسبی اولیه خاک مورد تزریق، افزودنیها، زمان عمل آوری، سولفاتها و کلرایدهای محلول در آب و دانه بندی ماسه تزریقی بررسی می‌شوند. نتایج آزمایشها نشان می‌دهند که سازگاری خوبی بین دوغاب سیلیکات سدیم، افزودنیهای آن و خاک کربناته مورد تحقیق وجود دارد.

۲- ویژگیهای ماسه مورد استفاده

ماسه مورد بررسی از جزیره کیش واقع در شمال خلیج فارس به دست آمد. درصد کربنات کلسیم ماسه از طریق آزمایشهایی مانند XRF، XRD و استاندارد BS-۱۳۷۷ به دست آمد. جهت مشاهده بافت و ساختار دانه های ماسه تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی (SEM) تهیه گردید. طبق جدول (۱) درصد کلسیم خاک برابر ۶۲/۱ می‌باشد. آزمایش XRD نشان می‌دهد که ترکیب اصلی خاک CaCO_3 با مقدار کمی MgCaCO_3 (کربنات کلسیم دولومیتی) است. درصد کربنات کلسیم طبق استاندارد BS-۱۳۷۷ برابر ۹۳ می‌باشد. آزمایشهای یاد شده نشان می‌دهند که ترکیب اصلی خاک، کربنات کلسیم می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی خاک در شکل (۱) نشان داده شده است. طبق این شکل مقدار قابل توجهی از دانه‌های خاک متخلخل بوده و دارای ساختار بیولوژیکی هستند. دانسیته بیشینه، کمینه و چگالی ویژه دانه های جامد نیز در جدول (۱) نشان داده شده است. همان طور که در مقدمه بیان شد مشکل اصلی این خاک ها خرد شدگی دانه های آن تحت بارگذاری می‌باشد. بر همین اساس منحنی دانه بندی ماسه فوق قبل و بعد از یک آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده (CD) تحت تنش های همه جانبه اولیه ۶۰۰ kPa با دانسیته نسبی ۵۰ درصد در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۲) نشان می‌دهد که در مقایسه با مقادیر گزارش شده توسط محققان دیگر [۵] و [۶] ماسه کربناته جزیره کیش قابلیت خردشدگی کمی دارد.

خاکهای کربناته به طور فراوان در مناطق استوایی گسترده شده‌اند. این نوع از خاکها در بسیاری از مناطق دارای مخازن نفت و گاز یافت می‌شوند (خلیج فارس، سواحل استرالیا، هند و ...) به خاطر بروز مشکلاتی در ارتباط با مسائل پی سازی در این خاکها توجه زیادی در جهت شناسایی رفتار آن معطوف شده است.

در سال ۱۹۸۸ Semple [۱] رفتار مکانیکی خاکهای کربناته را تشریح نمود. در سال ۱۹۹۹ Coop [۲] تاثیر شرایط محل را بر روی رفتار ماسه های کربناته مورد بررسی قرار داد. در سال ۱۹۹۹ Carter و Airey [۳] آزمایشهای آزمایشگاهی خاکهای کربناته را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند.

مشاهدات مختلفی در ارتباط با رفتار برشی، حالت بحرانی، کاهش حجم و اثر خرد شدگی دانه ها تحت آزمایشهای مختلف گزارش شده است [۴]، [۵] و [۶].

اغلب خاکهای کربناته در طبیعت به صورت سیمانمانه هستند. درجه سیمانی شدن می‌تواند کاملاً ضعیف تا بسیار قوی باشد. رفتار خاک کربناته با سیمان طبیعی و یافتن سیمانی مصنوعی برای شبیه سازی رفتار آن از دیگر کارهای تحقیقاتی صورت گرفته در این زمینه می‌باشد [۷]، [۸]، [۹] و [۱۰].

اصلاح خاکهای کربناته و کاهش یا حذف اثرات خردشدگی دانه ها یا سیمان بر روی باربری شمع ها یکی از مسائل پیش روی مهندسان است. شمع های تزریقی یکی از گزینه ها جهت غلبه بر اثرات خردشدگی دانه های خاک بر روی مقاومت شمع های اصطکاکی می‌باشد.

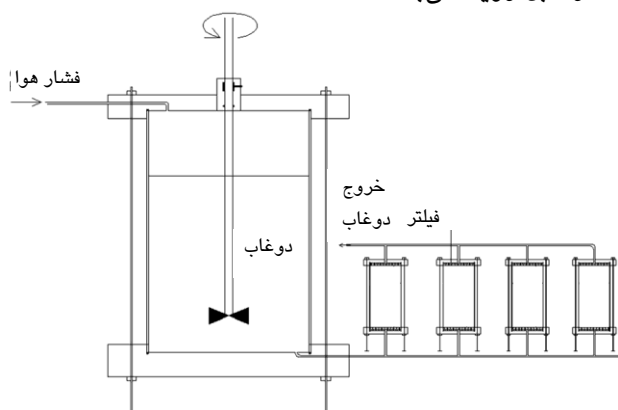
در شمع‌های تزریقی، دوغاب در بین دانه های خاک نفوذ نموده و با ایجاد پیوند بین دانه ها، آنها را با همدیگر یکپارچه می‌سازد. در ماسه های ریز دانه، تزریق سیمان پرتلند معمولی مشکل بوده و حتی گاهی غیر ممکن می‌باشد. به نظر می‌رسد سیمان بسیار ریزدانه یا دوغاب‌های شیمیایی گزینه های مناسبی در این زمینه باشند.

در این مقاله قابلیت تزریق ماسه کربناته با استفاده از دوغاب سیلیکات سدیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. این دوغاب یک دوغاب با اساس شیمیایی بوده که جهت اصلاح خصوصیات مکانیکی خاکها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۹۹، Alaa Ata [۱۱] عوامل موثر بر روی خصوصیات مکانیکی و خزشی ماسه‌های سیلیکاته تزریق شده با این دوغاب را مورد بررسی قرار داد. آزمایشها و مشاهدات نشان داده اند

جدول (۱): مشخصات فیزیکی خاک کربناته جزیره کیش

e_{min}	e_{max}	$\gamma_{d(max)}$	$\gamma_{d(min)}$	Gs
۰/۵۱	۰/۷۲	۱۷/۸	۱۵/۶	۲/۶۸
XRF				CaCO ₃ (%) (BS)
Mg(%)	Si(%)	Ca(%)	۹۳	
۱/۷۲	۲/۶۸	۶۲/۱		

می‌کند. فشار هوای اعمالی به دوغاب که نزدیک به اندازه فشار دوغاب نیز می‌باشد توسط یک گیج فشار سنج هوا اندازه گیری می‌گردد. ظرفیت دستگاه از نظر مقدار فشار قابل تحمل به اندازه ۶ بار می‌باشد. دستگاه طوری طراحی شده است که همزمان می‌توان چند نمونه را تزریق نمود. اندازه و تعداد نمونه ها نیز قابل تغییر می‌باشد. همه دستگاه بر روی یک میز چهار پایه سوار و قابل جابه جا کردن است. لازم است بعد از هر تزریق، دستگاه باز و تمیز شده و برای آزمایش بعدی آماده گردد. علاوه بر تزریق، می‌توان از آن جهت انجام آزمایش نفوذپذیری نیز استفاده کرد. جنس قالبها و مخزن از نوعی پلاستیک شفاف (Plaxi glass) و لوله ها از جنس پلاستیک شفاف انعطاف پذیر می‌باشد. به نحوی که در حین انجام تزریق، روند کار قابل رویت می‌باشد.

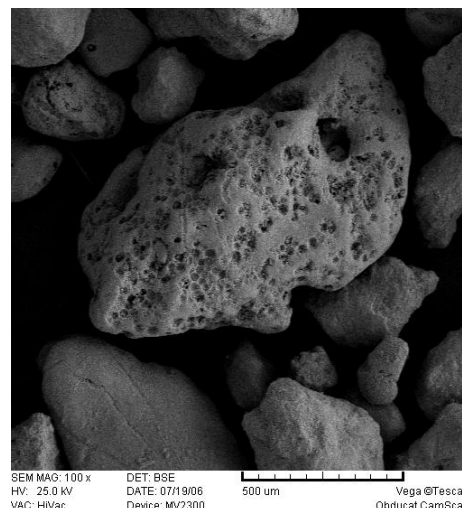


شکل (۲): دستگاه استفاده شده جهت تزریق نمونه ها

۴ - ساخت نمونه ها

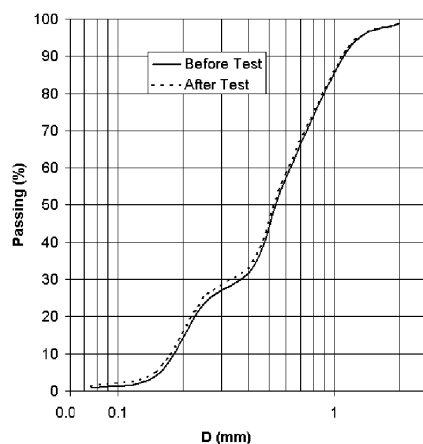
نمونه‌ها به روش ریزش خشک (Dry deposition) ساخته شدند. در این روش ابتدا خاک در کوره خشک می‌گردد. سپس با استفاده از یک قیف استوانه ای شکل به صورت خیلی آرام و با حرکت مار پیچ و سرعت ثابت، خاک از ارتفاع نزدیک صفر به داخل قالب ریخته می‌شود (قطر خروجی قیف ۱۲mm می‌باشد). سپس با زدن ضربات آرام به بدنه قالب می‌توان مقدار خاک مشخصی را در قالب جا داد تا دانسیته نسبی مورد نظر ایجاد گردد. بهتر است خاک به ۳ الی ۵ قسمت مساوی تقسیم شده و با تقسیم ارتفاع قالب به همان تعداد لایه، نمونه در چند مرحله ساخته شود تا نمونه همگنی ایجاد گردد.

نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای به قطر ۴ cm و ارتفاع ۸ cm ساخته شدند که نسبت حداکثر اندازه دانه به قطر نمونه برابر ۰/۱۱ و کمتر از حد بالایی آن (۰/۱۶) می‌باشد. به روش گفته شده سه نمونه با دانسیته های نسبی اولیه ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد ساخته شد و با ترکیبات مختلف دوغاب تزریق گردیدند.



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی از خاک کربناته جزیره

کیش



شکل (۲): منحنی دانه بندی خاک کربناته جزیره کیش قبل و بعد از انجام آزمایش سه محوری تحکیم یافته-زهکشی شده (CD)

۳ - دستگاه تزریق

جهت تزریق در آزمایشگاه دستگاهی مطابق شکل ۳ ساخته شد. دستگاه تزریق متشکل از یک مخزن دوغاب، یک همزن متصل به یک موتور جهت هم زدن دوغاب، چند سری قالب جهت ساخت نمونه ها و سیستم لوله کشی جهت ورود و خروج دوغاب از نمونه ها می‌باشد. مخزن دستگاه متصل به یک کمپرسور می‌باشد که با استفاده از فشار هوا که به روی دوغاب داخل مخزن اعمال می‌شود آن را به داخل نمونه ها هدایت

۵- ترکیب دوغاب تزریقی

دوغاب انتخابی برای تزریق در خاک با اساس شیمیایی به نام سیلیکات سدیم با ترکیب شیمیایی $(\text{Na}_2\text{O}_2\text{SiO}_2)$ می‌باشد. این دوغاب توانایی نفوذ در خاکهایی با دانه های بزرگتر از ۷۵ میکرون را دارا می‌باشد. هزینه آن نیز تا حد پایین بوده و پایداری متوسطی در عمل دارد و اجرای آن نیز آسان می‌باشد. از مزایای دیگر اثرات زیست محیطی پایین آن است [۱۲].

به خاطر نوع خاک و ترکیبات شیمیایی آن، یونهای موجود در خاک، بافت، دانه بندی، اندازه دانه‌ها، تراکم اولیه، قابلیت عبور دوغاب از توده خاک و شرایط نگهداری بر روی مقاومت خاک تزریق شده تاثیر گذار است و ترکیب دوغاب می‌تواند متفاوت انتخاب گردد. با ساخت دوغابها و نمونه‌های مختلف، روند افزایش مقاومت نمونه های تزریق شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

ترکیب اصلی این دوغاب، سیلیکات سدیم به عنوان ماده اصلی ایجاد کننده پیوندها و آب به عنوان عنصر ترکیبی و عامل کاهش ویسکوزیته می‌باشد. برای این که ترکیب آب و سیلیکات سدیم قابلیت واکنش داشته باشند ماده ای به عنوان فعال کننده نیاز است تا واکنشهای شیمیایی شروع گردد. برای این کار می‌توان از فرمامید و بیکرینات سدیم استفاده کرد. پایداری کم بیکرینات سدیم در طبیعت، با وجود گرانی، از فرمامید با فرمول شیمیایی (HCONH_2) جهت این کار استفاده گردید. از طرفی لازم است ماده‌ای جهت تسریع واکنشها اضافه گردد. برای این کار نیز می‌توان از کلرید کلسیم یا آلومینات سدیم استفاده کرد. به خاطر این که احتمال می‌رود کلر موجود در کلرید کلسیم تشکیل اسید کلریدریک بدهد لذا آلومینات سدیم با فرمول شیمیایی (NaAlO_2) به عنوان تسریع کننده استفاده گردید.

گفتنی است که دوغاب سیلیکات سدیم در کارهای مهندسی برای افزایش ظرفیت باربری و آب بندی کردن و کنترل تراوش زیر زمینی (در خاک های سیلیسی) استفاده می‌شود. آزمایشها و تجربیات نشان می‌دهند که دوغاب سیلیکات سدیم در محیطهای اسیدی، قلیایی، نمکی، قارچی مقاوم می‌باشد [۱۲]. جدول (۲) ترکیبهای مختلف دوغابهای آزمایش شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): ترکیبات مختلف دوغابهای آزمایش شده

W/S	فرم آمید (%)	آلومینات سدیم (%)
۲/۲۳-۰/۳۳	۷-۲	۱/۵-۰/۵۸

۶- تزریق

بعد از ساخت نمونه ها به روش موجود در بند ۴، دوغاب ساخته شده در مخزن دستگاه ریخته می‌شود. با اعمال فشار هوا به کمک یک کمپرسور دوغاب به داخل نمونه‌ها هدایت گردید. از آنجا که نمونه ها با دانسیته های اولیه مختلف ساخته می‌شوند و دامنه غلظت دوغابهای ساخته شده بسیار متغیر می‌باشد لازم است فشار را به طور متناسب تنظیم نمود تا نمونه ها به طور کامل و یکنواخت تزریق گردند. در سیستم تزریق ساخته شده، نمونه ها از سمت پایین تزریق می‌گردند لذا کنترل عمل تزریق راحت تر می‌باشد. تزریق تا لحظه ای ادامه می‌یابد تا از تزریق کامل نمونه اطمینان حاصل گردد در دوغابهای تا نسبت آب به سیلیکات $W/S=1$ تمام نمونه ها به راحتی و تحت یک فشار حداقل $0/1$ تا $0/2$ بار تزریق شدند. ولی با کاهش نسبت فوق تا $0/33$ ، فشار لازم برای تزریق حتی تا ۵ بار نیز افزایش یافت. به نحوی که برای نسبت $W/S < 0/33$ ظرفیت دستگاه به لحاظ تامین فشار لازم اجازه تزریق نداد.

۷- نگهداری نمونه ها

بعد از پایان تزریق، با توجه به ترکیب دوغاب که منجر به سرعتهای مختلف گیرش می‌گردد به مدت ۲۴ الی ۴۸ ساعت نمونه‌ها در داخل قالب نگهداری می‌شود. سپس می‌توان نمونه‌ها را از قالب خارج نمود. نمونه‌های خارج شده در پوشش‌های پلاستیکی دو الی سه لایه پیچیده شده و تا زمان انجام آزمایش نگهداری شدند. لازم به توضیح است که شرایط نگهداری می‌تواند متفاوت از این باشد و به یقین این مسئله بر روی مقاومت حاصل نیز تاثیر گذار می‌باشد. که به نوبه خود موضوعی برای تحقیق می‌باشد. ولی به لحاظ بررسی نمونه‌ها تحت شرایط ساخته شده با رطوبت اولیه، عمل نگهداری به روش ذکر شده انجام گردید.

۸- انجام آزمایش های تک محوری

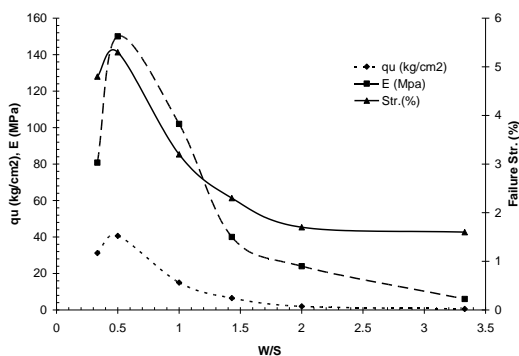
از آنجا که ترکیب شیمیایی، بافت، شکل ذرات و زبری سطح ذرات خاک مورد بررسی از خاکهای سیلیسی متفاوت می‌باشد جهت ملاحظه نتیجه اندرکنش شیمیایی و فیزیکی بین دانه‌های خاک و دوغاب انتخابی، با استفاده از آزمایش تک محوری، مقاومت و رفتار نمونه‌ها و اثر پارامترهای مختلف بر روی مقاومت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۹- نتایج آزمایش

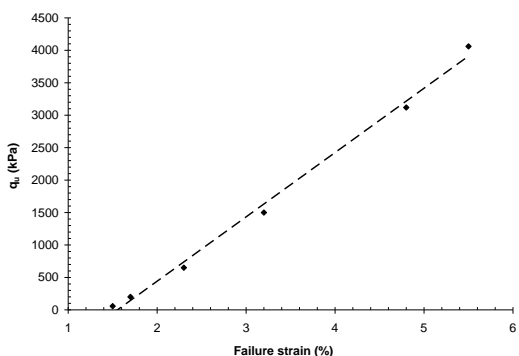
طبق شکل (۴) جهت به دست آوردن مقاومتهای قابل توجه نمونه تزریق شده مانند $W/S < 1.43$ بهتر است فرامید (۵-۷)٪ و آلومینات سدیم در حد ۱٪ انتخاب گردد.

با این وجود ماسه کربناته بررسی شده سازگاری خوبی با دوغاب سیلیکات سدیم و افزودنیهای آن نشان می‌دهد. این دوغاب مقاومت تک محوری نمونه مرطوب را تا ۴ MPa و مدول الاستیسیته مماسی اولیه آن را تا ۱۵۰ MPa و کرنش لحظه گسیختگی آن را تا ۵/۳٪ افزایش داده است.

همان طور که قبلا نیز گفته شد دوغاب استفاده شده ترکیبی از چهار ماده مختلف می‌باشد و نمونه‌ها با دانسیته‌های نسبی اولیه مختلف مورد آزمایش قرار گرفته اند. یعنی صرف ترکیب سیلیکات سدیم و آب پیوندی ایجاد نخواهد نمود مگر این که بین آنها واکنش صورت بگیرد. اینک اثر هر کدام از افزودنیها به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۴): پوش مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی در مقابل نسبت آب به سیلیکات برای ترکیبات مختلف دوغاب



شکل (۵): پوش مقاومت تک محوری در برابر کرنش گسیختگی

جدول (۲): ترکیب دوغاب‌های منجر به مقاومت بیشینه

ترکیب دوغاب	نسبت آب به سیلیکات				
	۰/۳۳	۰/۵	۱	۱/۴۳	۲
Alu.S. (%)	۱	۱	۱	۱	۰/۶
آمید (%)	۷	۷	۷	۵	۴
زمان ژل (min)	۲۵۰	۳۱۰	۶۰	۷۵	۱۸۰

با انجام آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های مختلف تزریق شده اثر پارامترهای مختلف، مانند دانسیته نسبی اولیه، نسبت آب به سیلیکات دوغاب، نسبت‌های مختلف فرامید و آلومینات سدیم، نوع آب دوغاب، اندازه دانه‌های خاک، اثر زمان و شرایط نگهداری بر روی روند تغییرات مقاومت و رفتار نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع بیست و سه مرحله تزریق صورت گرفت و در هر مرحله ۴ نمونه به طور موازی مورد تزریق قرار گرفتند.

بعد از نگهداری نمونه‌های تزریق شده به مدت ۱۴ روز، با استفاده از آزمایش تک محوری، نمونه‌ها بارگذاری گردیدند. شکل (۴) پوش مقاومت تک محوری حداکثر (q_u)، مدول الاستیسیته اولیه (E) و کرنش محوری در لحظه گسیختگی را نشان می‌دهد. در واقع نمودار پایینی پوش افزایش باربری و پارامترهای دوم و سوم پوش تغییر شکل پذیری را نشان می‌دهند. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با کاهش نسبت آب به سیلیکات سدیم هر سه پارامتر یاد شده زیاد می‌شوند. تا این که در نقطه $W/S = 0.5$ به مقدار بیشینه خود می‌رسند. با کاهش بیشتر نسبت W/S این روند عوض می‌شود. شاید بتوان این روند را این گونه بیان کرد که با کاهش W/S ، مقدار آب آزاد بین ذرات جامد نیز کمتر شده و تعداد یا نقاط پیوند افزایش می‌یابد. تا اینکه به نقطه $W/S = 0.5$ برسد. بعد از این نقطه، یعنی با کاهش بیشتر مقدار آب، از افزایش بیشتر تعداد و مقدار پیوندها جلوگیری به عمل می‌آید و پیوندها نمی‌توانند زیاد رشد نمایند. به همین علت روند افزایش مقاومت کاهش می‌یابد. شاید در مورد مدول الاستیسیته نیز بتوان چنین روندی را بیان کرد. یعنی هرچه قدر تعداد پیوندها بیشتر باشد در واقع پیوند نیز قویتر بوده و سختی افزایش می‌یابد و پیوند‌ها دیرتر از هم گسیخته می‌شوند. گفتنی است منحنی‌های فوق در واقع یک پوش برای مقادیر یاد شده می‌باشند. در شکل (۵) پوش مقاومت تک محوری در برابر پوش کرنش لحظه گسیختگی ترسیم شده است. همان طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌گردد تقریباً رابطه بین دو پارامتر مذکور به صورت خطی به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$q_u = 991\varepsilon_u - 1540 \quad (1)$$

که ε_u کرنش لحظه گسیختگی (٪)، و q_u مقاومت تک محوری بیشینه (kPa) می‌باشد.

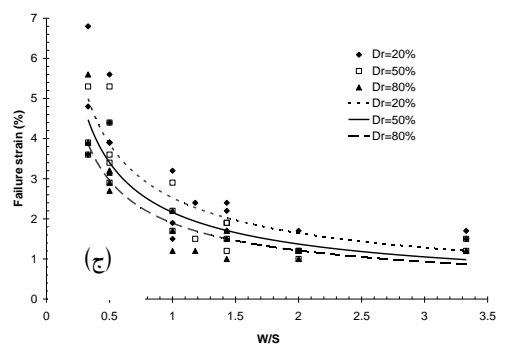
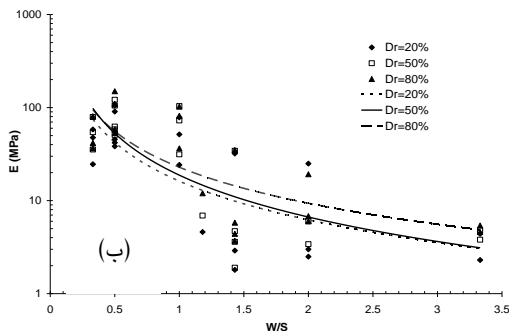
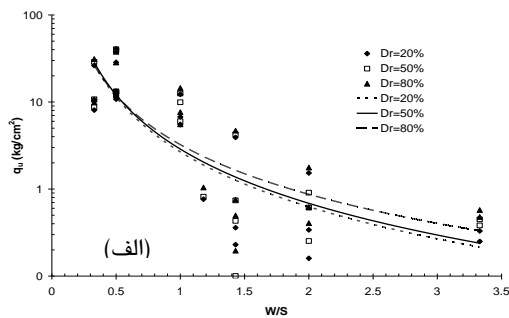
ترکیب دوغاب منجر به پوش‌های مقاومت، مدول الاستیسیته مماسی و کرنش بیشینه در جدول (۳) نشان داده شده است.

۹-۱- بررسی اثر زمان بر روی مقاومت

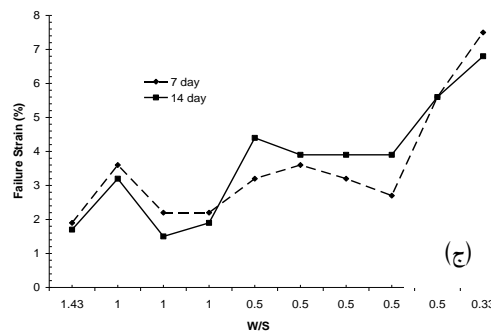
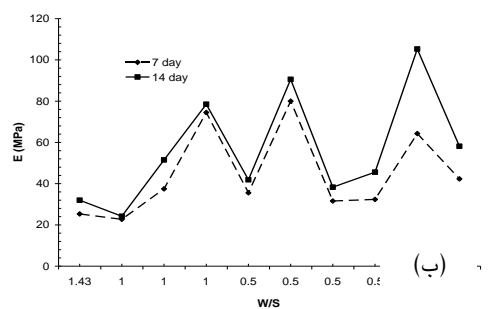
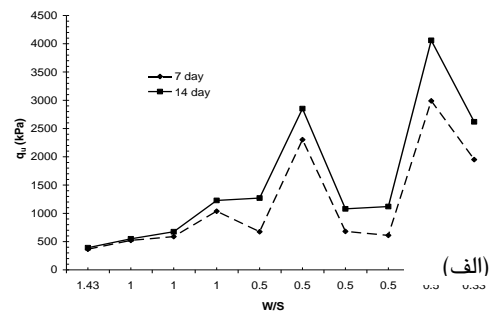
پیوندها برای تشکیل نیاز به یک مدت زمانی دارند. در مورد دوغاب سیلیکات سدیم، زمان بررسی مقدار مقاومت حاصل از پیوندها چهارده روز می‌باشد [۱۲]. جهت بررسی اثر زمان، یک سری از نمونه‌ها به تعداد دو مورد ساخته شدند و در مدت زمانهای هفت و چهارده روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. شکل (۶) مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته و کرنش لحظه گسیختگی را در مقابل زمان برای دوغابهای مختلف نشان می‌دهد. شکل (۶) مربوط به نمونه‌های با دانسیته نسبی اولیه ۲۰٪ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته نیز زیاد شده است. ولی نرخ افزایش مقاومت برای دوغابهای مختلف متفاوت می‌باشد. این مسئله به خاطر تفاوت نسبتهای ترکیب دوغاب و افزودنیها مانند فرامید و آلومینات سدیم در آنها می‌باشد و بنابراین سرعت پیشرفت واکنشها در آنها متفاوت است. روند فوق طبیعی می‌باشد و زمان کسب مقاومت حداکثر نیز متناسب با ترکیب اولیه و مقادیر افزودنیها می‌باشد.

۹-۲- بررسی اثر دانسیته نسبی اولیه

نمونه‌ها با سه دانسیته نسبی اولیه مختلف سست (۲۰٪)، متوسط (۵۰٪) و تراکم (۸۰٪) ساخته شدند. تا اثر نسبی تراکم و تماسهای بیشتر دانه‌ها و مقادیر پیوندهای حاصل از دوغاب مشخص گردد. اشکال (۷ الف، ب و ج) به ترتیب اثر دانسیته نسبی اولیه خاک تزریقی را بر روی مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته و کرنش محوری لحظه گسیختگی نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۷ الف) مشاهده می‌گردد با زیاد شدن دانسیته نسبی مقاومت تک محوری نیز بیشتر شده است. اختلاف مقاومت ناشی از دانسیته نسبی در نسبتهای W/S بالا، بیشتر می‌باشد. ولی با کمتر شدن نسبت W/S اثر دانسیته نسبی نیز بر روی مقاومت تک محوری کمتر شده است. از شکل (۷ ب) مشاهده می‌گردد که با زیاد شدن دانسیته نسبی سختی نمونه‌های تزریق شده نیز زیاد شده است. شکل (۷ ج) نیز نشان می‌دهد با زیاد شدن دانسیته نسبی انعطاف پذیری کمتر شده و کرنش هنگام گسیختگی کاهش می‌یابد.



شکل (۷): (الف) مقاومت تک محوری، (ب) مدول الاستیسیته، (ج) کرنش لحظه گسیختگی در برابر نسبت W/S

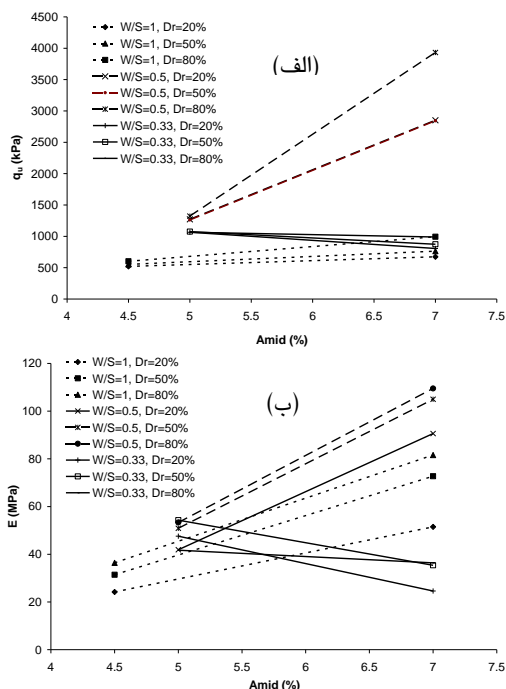


شکل (۶): اثر زمان نگهداری بر روی (الف) مقاومت تک محوری، (ب) مدول الاستیسیته، (ج) کرنش لحظه گسیختگی نمونه‌ها

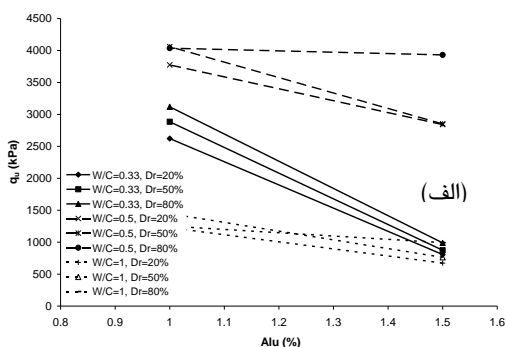
نسبتها میزان تاثیر کمتر می باشد. شکل (۹ب) نیز تغییرات مدول الاستیسیته را در برابر تغییرات آلومینات سدیم با فرم آمید ثابت نشان می دهد. از این شکل ملاحظه می گردد که با زیاد شدن آلومینات سدیم مدول الاستیسیته کمتر می شود.

۹-۴- اثر نوع آب مصرفی در تهیه دوغاب

با توجه به این که اغلب اوقات رسوبات کربناته در محیط های دریایی واقع می شوند و خاک انتخابی نیز از یک محیط دریایی (جزیره کیش) انتخاب شده است لذا در یک بررسی جداگانه، اثر نوع آب مصرفی در تهیه دوغاب مورد بررسی قرار گرفت. با سه نوع آب مختلف، آب نوشیدنی شهر تهران، آب مقطر و آب دریای خلیج فارس و نسبت $W/S=1$ نمونه های مشابه ساخته شده و تزریق گردیدند. آب دریا دارای $0.3/30.9\%$



شکل (۸): (الف) مقاومت تک محوری، (ب) مدول الاستیسیته در برابر تغییرات فرم آمید برای نسبت های مختلف W/S و آلومینات سدیم ثابت



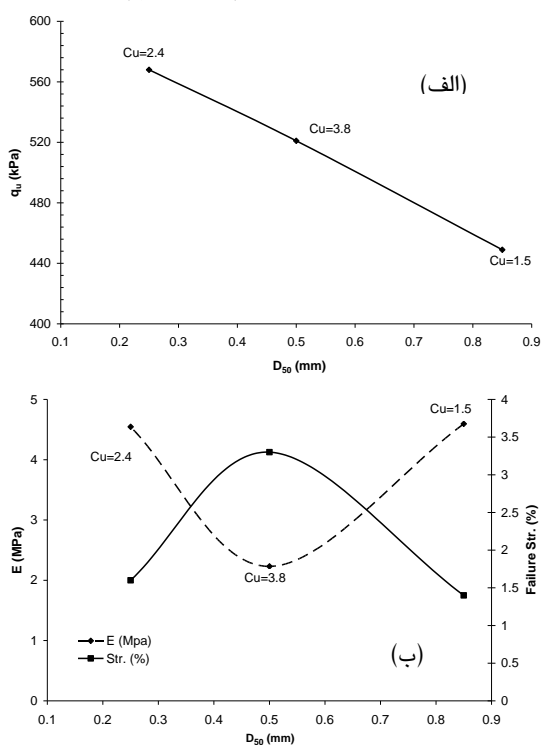
پیشتر گفته شد که ترکیب آب و سیلیکات سدیم به تنهایی منجر به ایجاد پیوند نمی شود. زیرا برای ایجاد پیوند نیاز به ایجاد واکنش های شیمیایی می باشد و برای واکنش نیاز به یک فعال کننده می باشد. در مطالعات انجام شده از ماده فرمامید برای این کار استفاده گردید. سرعت واکنشها و ایجاد پیوند ها می تواند بسیار متغیر باشد. سرعت واکنشها را می توان با استفاده از یک افزودنی دیگر کنترل نمود. در مطالعه حاضر برای این منظور از آلومینات سدیم استفاده گردید. ترکیبات مختلف چهار ماده یاد شده منجر به سرعت های بسیار متغیر واکنشها می گردد. بعد از ترکیب و ساخت دوغاب و پس از گذشت زمان معمول، دوغاب حالت ژله ماندی به خود می گیرد که به زمان ژل معروف است. در واقع زمان ژل شدن تابع مقادیر ترکیبات مختلف اولیه می باشد. هرچه در زمان ژل کمتر باشد نشان دهنده سرعت بالای واکنشها است. این امکان وجود دارد که دوغاب ساخته شده در مدت زمان بسیار طولانی به صورت ژل در آمده و یا هیچگاه ژل تشکیل نشده و هیچ پیوندی تشکیل نگردد. نکته دیگر این که بعد از ایجاد ژل امکان تزریق وجود ندارد و ویسکوزیته خیلی زیاد می گردد. بنابراین نسبت های ترکیبی باید به گونه ای انتخاب گردند که هم زمان ژل اجازه تزریق را بدهد و هم پیوند های قویتری تشکیل گردد.

شکل (۸ الف) مقاومت تک محوری را برای نسبت های W/S و دانسیته نسبی اولیه مختلف در برابر درصد فرمامید با آلومینات سدیم ثابت نشان می دهد. از شکل ۸ ملاحظه می گردد که با زیاد شدن درصد فرم آمید تا نسبت $W/S=0.5$ مقاومت تک محوری زیاد می شود. ولی برای نسبت $W/S=0.33$ روند فوق برعکس می گردد. از طرفی میزان تاثیر فرم آمید بر روی مقاومت در نسبت های مختلف W/S متفاوت بوده و اثر آن در نسبت $W/S=0.5$ بیشتر از سایر نسبت ها است. شکل (۸ ب) تغییرات مدول الاستیسیته را در برابر تغییرات فرم آمید برای همان شرایط مشروح نشان می دهد. از این شکل نیز ملاحظه می گردد که با افزایش فرم آمید مدول الاستیسیته مگر برای دوغاب با $W/S=0.33$ زیاد می گردد.

شکل (۹ الف) مقاومت تک محوری را برای نسبت های W/S دانسته نسبی مختلف در برابر درصدهای مختلف آلومینات سدیم با درصد فرمامید ثابت نشان می دهد. در این شکل ملاحظه می گردد که برعکس فرمامید، با افزایش آلومینات سدیم، مقاومت تک محوری کاهش می یابد. در این حالت نیز میزان تاثیر آن در نسبت های مختلف W/S متفاوت می باشد. در بعضی نسبت های W/S، میزان تاثیر بیشتر و در بعضی

۹-۵- اثر اندازه دانه

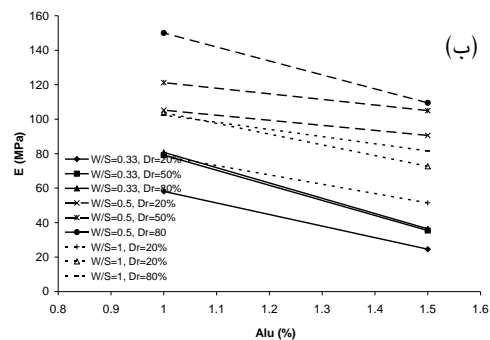
از آنجا که خاک مورد تزریق می‌تواند دانه بندی‌های مختلفی داشته و اندازه دانه‌ها ریز یا درشت باشد. لذا خاک مورد مطالعه با سه دانه بندی مختلف بالای الک ۳۰ (با ضریب یکنواختی $Cu=1/5$)، زیر الک ۳۰ ($Cu=2/4$) و ترکیبی (بالای الک ۳۰ و زیر آن، $Cu=2/8$) با دانسیته نسبی ۲۰ درصد تزریق گردیدند. نتیجه آزمایش تک محوری انجام شده بر روی نمونه‌ها به صورت مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته و کرنش لحظه مقاومت حداکثر در مقابل متوسط اندازه دانه‌ها (D_{50}) خاک در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در شکل (۱۱) ملاحظه می‌گردد که با درشت تر شدن اندازه دانه ها مقاومت تک محوری (در اثر کم شدن تعداد نقاط تماس) کم می‌شود. نمونه‌های با دانه بندی یکنواخت تر تردتر و سخت تر و نمونه‌های با دانه بندی گسترده تر نرم تر و انعطاف پذیرتر (در اثر بیشتر شدن تعداد نقاط تماس و پیوند) می‌باشند. این مسئله از روی دو منحنی دیگر مدول الاستیسیته و کرنش لحظه مقاومت حداکثر قابل استنباط است (شکل ۱۱ ب).



شکل (۱۱): اثر اندازه دانه بر روی (الف) مقاومت و (ب) مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی نمونه‌ها

۹-۶- شرایط نگهداری

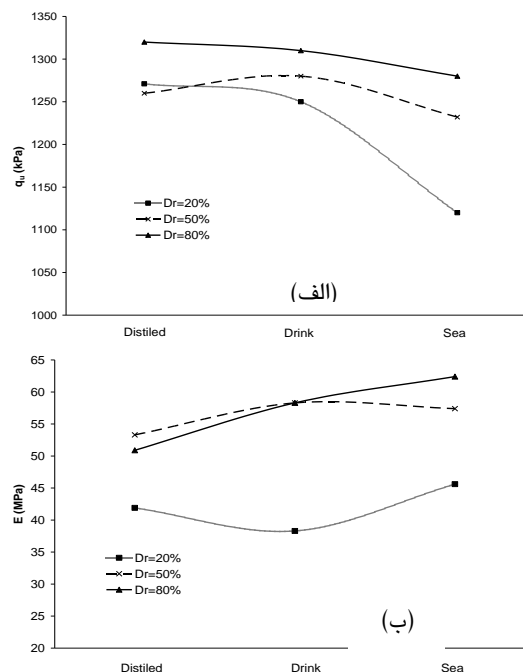
با آگاهی از آن که مقاومت نمونه‌های عمل آوری شده در زیر سطح آب خیلی کمتر از مقاومت نمونه‌های عمل آوری شده موضوع بحث در مقاله حاضر می‌باشد با این وجود برای



شکل (۹): (الف) مقاومت تک محوری، (ب) مدول الاستیسیته در برابر تغییرات درصد آلومینات سدیم برای نسبت‌های مختلف W/S و درصد فرم آمید ثابت

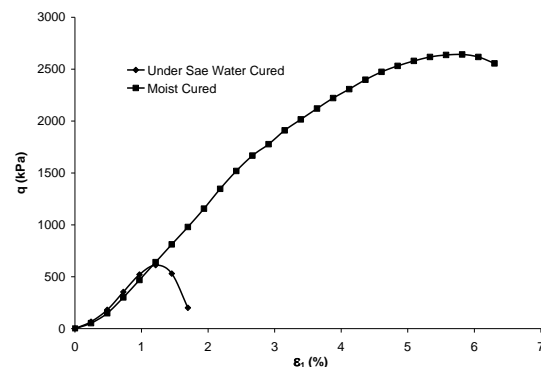
سولفات، $2/257$ درصد کلراید با $PH=7/9$ می‌باشد.

نتایج آزمایش به صورت مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته در برابر نوع آب دوغاب در شکل (۱۰) برای سه نمونه مختلف با دانسیته های نسبی مختلف نشان داده شده است. در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه‌های تزریق شده با آب شرب و آب مقطر نزدیک به هم و یکسان است. ولی نمونه های تزریق شده با آب دریا دچار افت مقاومت شده است. هرچند مقدار افت چندان زیاد نیست ولی به نظر می‌رسد وجود سولفات‌ها و کلرایدها و محیط بازی باعث افت نسبی مقاومت شده است. ملاحظه می‌گردد که مقدار افت در دانسیته های نسبی کم بیشتر محسوس می‌باشد. از طرفی به طور ظاهری به نظر می‌رسد وجود املاحی مانند کلرایدها و سولفات‌ها باعث افزایش سختی نمونه تزریق شده می‌گردد.



شکل (۱۰): اثر نوع آب مصرفی دوغاب بر روی (الف) مقاومت و (ب) مدول الاستیسیته نمونه‌ها ($W/S=1$)

بررسی اثر شرایط نگهداری در زیر آب دریا بر روی مقاومت حاصل، دو نمونه سست ($D_r=70\%$) با دوغاب $W/S=0.5$ مورد تزریق قرار گرفتند. یکی از نمونه‌ها در زیر آب دریا (با غلظت کلر $2/257$ درصد و غلظت سولفات $0/309$ درصد و $Ph=7/9$) و دیگری در شرایط مرطوب با حفظ رطوبت اولیه تزریقی نگهداری گردید. همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است مقاومت تک محوری نمونه نگهداری شده تحت شرایط مرطوب اولیه و نمونه نگهداری شده در زیر آب دریا به ترتیب برابر با 2600 و 600 kPa می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که شرایط نگهداری در زیر آب دریا با مشخصات ذکر شده باعث افت قابل توجه مقاومت نمونه می‌گردد. به نحوی که مقاومت آن نزدیک به 23 درصد نمونه نگهداری شده تحت شرایط مرطوب می‌گردد. از طرفی نمونه یاد شده بسیار سریعتر و در کرنشهای محوری خیلی کمتری نسبت به نمونه نگهداری شده تحت شرایط مرطوب به گسیختگی رسیده است.



شکل (۱۲): تاثیر شرایط نگهداری بر روی مقاومت نمونه‌ها

۱۰- نتیجه گیری

بر اساس نتایج آزمایشهای تک محوری بر روی خاک کربناته جزیره کیش (با قابلیت خرد شونده متوسط دانه‌ها) اصلاح شده با تزریق دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم ملاحظه گردید که:

- ۱- درصد قابل توجهی از ماسه کربناته دارای قابلیت خرد شدگی است. روش الک کردن جهت دانه بندی ماسه مورد بررسی، آزمایش تحکیم یک بعدی و تحکیم همسان این قابلیت را نشان می‌دهند.
- ۲- تزریق دوغاب سیلیکات سدیم باعث افزایش مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته خاک کربناته می‌گردد. به نحوی که در شرایط ایده آل می‌توان انتظار افزایش مقاومت تا حدود 4 MPa و مدول الاستیسیته مماسی تا 150 MPa را داشت.

۲- حصول مقاومت دوغاب تابع ترکیب اولیه دوغاب می‌باشد. به نحوی که لازم است هم جهت به دست آوردن یک مقاومت مناسب و هم زمان ژل مناسب جهت قابلیت تزریق پذیری، ترکیب مناسبی انتخاب گردد.

۴- با کاهش نسبت W/S تا نسبت 0.5 مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته مماسی اولیه و تغییرشکل پذیری خاک زیاد می‌گردد. کمتر از نسبت $W/S=0.5$ روند فوق عوض می‌شود. به نوعی می‌توان گفت این نسبت یک نقطه بهینه می‌باشد.

۵- دانسیته نسبی اولیه خاک مورد تزریق باعث افزایش نسبی مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته مماسی اولیه و کاهش تغییرشکل پذیری خاک تزریق شده می‌گردد. با این وجود، با کاهش نسبت W/S اثر دانسیته نسبی اولیه بر روی مقاومت تک محوری کم شده و مقاومت تک محوری خاک تابع دوغاب می‌گردد نه دانسیته نسبی.

۶- با گذشت زمان مقاومت خاک تزریق شده زیاد می‌گردد. ولی نرخ افزایش مقاومت در تمام دوغابها یکسان نیست و تابع نسبتهای ترکیب دوغاب است.

۷- آبهای دارای املاحی مانند سولفاتها و کلرایدها و محیطهای بازی (محیط خلیج فارس) اثر کاهندگی بر روی مقاومت نمونه تزریقی دارند و باعث افت نسبی مقاومت آن می‌شوند.

۸- مقاومت خاک تزریق شده با افزایش اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد و هرچقدر دانه بندی خاک مورد تزریق گسترده تر باشد انعطاف پذیرتر خواهد بود و برعکس.

۹- افزودنیهای مانند فرمامید و آلومینات سدیم باعث انجام واکنشها و تسریع آن و کاهش زمان ژل می‌شوند. با این وجود افزایش فرمامید به عنوان یک فعال کننده باعث افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته و افزایش آلومینات سدیم به عنوان تسریع کننده باعث کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته خاک تزریق شده می‌گردد.

۱۰- نگهداری نمونه خاکهای کربناته تزریق شده در زیر آب دریا دارای درصد قابل توجهی کلرایدها و

Alaa Ata; Cumaraswamy Vipulanandan; "Factors Affecting Mechanical and creep Properties of Silicate-Grouted Sands", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 10, pp. 868-876, (1999).

US Army Corps of Engineers, "Chemical Grouting", EM 1110-1-3500, 1995.

[۱۱] سولفات‌ها باعث افت مقاومت و تردتر شدن آنها می‌گردد.

[۱۲]

۱۱ - مراجع

[۱] Semple, R.M.; "Mechanical Properties of Calcareous Soils: State of the Art Report", Proceeding of 1st International Conference on Calcareous Sediments, Perth, Australia, Vol.2, 1988.

[۲] Coop, M. R.; "The Influence on In-Situ State on the behavior on carbonate sands", Proceedings of the Second International Conference on Engineering for Calcareous Sediments, Bahrain, 21-24 February, 1999.

[۳] Carter, J.P.; Airey, D.W. and Fahey, M.; "A Review of Laboratory testing of Calcareous soils" Proceedings of the Second International Conference on Engineering for Calcareous Sediments, Bahrain, 21-24 February, 1999.

[۴] Coop, M.R. and Lee, I.K.; "The Behavior of Granular Soils at Elevated Stresses", Predictive Soil Mechanics, Proceeding C.P.Wroth Mem Symposium, Thomas Telford, London, pp. 186-198, 1993.

[۵] Luzzani, L. and Coop, M. R.; "On the Relationship between Particle Breakage and Critical State of Sands", Soils and Foundation Journal, Vol. 42, No. 2, pp. 77-82, 2002.

[۶] Coop, M.R., Sorensen, K. K., Bodas, T. & Georgoutsos G.; "Particle breakage during shearing of a carbonate sand", Geotechnique, Vol. 54, No. 3, pp. 157-163, 2004

[۷] Ismail, M.A., Joer, H.A., Merit, A., and Randolph, M.F.; "Cementation of Porous Material Using Calcite", Geotechnique, Vol. 52, No. 5, pp. 313-324, 2002.

[۸] Ismail, M.A., Joer, H.A., Merit, A. and Randolph, M.F.; "Sample Preparation Technique for Artificially Cemented Soils", ASTM, Geotechnical Testing Journal, Vol. 23. No. 2, pp. 171-177, 2000b.

[۹] Ismail, M.H., Joer, H.A., Sim, W.H., and Randolph, M.F.; "Effect of Cement Type on Shear Behavior Of Cemented Calcareous Soil" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 6, pp. 520-529, 2002.

[۱۰] Salehzadeh, M.; "The Behavior of Non-Cemented and Artificially Cemented Carbonate Sand under Monotonic and Reversed Cyclic Shearing" Ph.D. Thesis, Univ. of Manchester, UK, 2000.