اصلاح خاكهاي ماسه‌اي كربناته با استفاده از تزريق شيميايي

محمود حسنلوراد[i]، حسين صالح زاده[ii]، حبيب شاه نظری[iii]

چكيده

در اين مقاله قابليت اصلاح ماسه كربناته محصول جزيره كيش با استفاده از يك دوغاب شيميايي بررسي مي‌گردد. ويژگي اصلي اين خاك نسبت منافذ بالاي داخل دانه ها و حالت خرد شدگي آنها در حين بارگذاري مي‌باشد. فرآيند اصلاح خاك يادشده با استفاده از تزريق دوغاب سيليكات سديم همراه با افزودنيهايي مانند فرم آميد و آلومينات سديم صورت گرفت. نمونه‌ها با دانسيته‌هاي نسبي اوليه مختلف ساخته و تزريق شدند. مقاومت تك محوري بيشينه، مدول مماسي اوليه و كرنش لحظه گسيختگي در نسبت آب به سيليكات سديم برابر ۰/۵ حاصل گرديد. مقاومت تك محوري و مدول مماسي اوليه با گذشت زمان افزايش يافت ولي تغييرات كرنش لحظه گسيختگي، تابع نسبت آب به سيليكات سديم و مقادير افزودنيها بود. فرماميد باعث افزايش و آلومينات سديم باعث كاهش مقاومت تك محوري و مدول الاستيسيته مماسي اوليه مي‌گردند. علاوه براين افزايش اندازه دانه ها باعث كاهش مقاومت تك محوري خاك تزريق شده مي‌گردد. دانه بندي يكنواخت منجر به رفتار تنش-كرنش ترد و دانه بندي گسترده منجر به رفتار تنش-كرنش نرم مي‌گردد. وجود املاحي مانند سولفاتها و كلرايدهاي محلول در آب باعث كاهش مقاومت تك محوري و افزايش مدول مماسي اوليه خاك تزريق شده مي‌گردد.

كلمات كليدي

خاك كربناته، تزريق، سيليكات سديم، مقاومت تك محوري

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

[i] عضو هيئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان و دانشجوی دكتری دانشگاه علم و صنعت ايران
Email: mhassanlourad@iust.ac.ir
[ii] استاديار دانشكده عمران دانشگاه علم و صنعت ايران Email:salehzadeh@iust.ac.ir
[iii] استاديار دانشكده عمران دانشگاه علم و صنعت ايران Email:hshahnazari@iust.ac.ir

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

۱- مقدمه

خاكهاي كربناته به طور فراوان در مناطق استوايي گسترده شده‌اند. اين نوع از خاكها در بسياري از مناطق داراى مخازن نفت و گاز يافت مي‌شوند (خليج فارس، سواحل استراليا، هند و ...) به خاطر بروز مشكلاتي در ارتباط با مسائل پي سازي در اين خاكها توجه زيادي در جهت شناسايي رفتار آن معطوف شده است.

در سال ۱۹۸۸ Semple [۱] رفتار مكانيكي خاكهاي كربناته را تشريح نمود. در سال ۱۹۹۹Coop [۲] تاثير شرايط محل را بر روي رفتار ماسه هاي كربناته مورد بررسي قرار داد. در سال ۱۹۹۹ Carter و Airey [۳] آزمايشهاي آزمايشگاهي خاكهاي كربناته را مورد تجزيه و تحليل قرار دادند.

مشاهدات مختلفي در ارتباط با رفتار برشي، حالت بحراني، كاهش حجم و اثر خرد شدگي دانه ها تحت آزمايشهاي مختلف گزارش شده است [۴]، [۵] و [۶].

اغلب خاكهاي كربناته در طبيعت به صورت سيمانه هستند. درجه سيماني شدن مي‌تواند كاملا ضعيف تا بسيار قوي باشد. رفتار خاك كربناته با سيمان طبيعي و يافتن سيماني مصنوعي براى شبيه سازي رفتار آن از ديگر كارهاي تحقيقاتي صورت گرفته در اين زمينه مي‌باشد [۷]، [۸]، [۹] و [۱۰].

اصلاح خاكهاي كربناته و كاهش يا حذف اثرات خردشدگي دانه ها يا سيمان بر روى باربرى شمع ها يكي از مسائل پيش روي مهندسان است. شمع هاي تزريقي يكي از گزينه ها جهت غلبه بر اثرات خردشدگي دانه هاي خاك بر روي مقاومت شمع هاي اصطكاكي مي‌باشد.

در شمع‌هاي تزريقي، دوغاب در بين دانه هاي خاك نفوذ نموده و با ايجاد پيوند بين دانه ها، آنها را با همديگر يكپارچه مي‌سازد. در ماسه هاي ريز دانه، تزريق سيمان پرتلند معمولي مشكل بوده و حتي گاهي غير ممكن مي‌باشد. به نظر مي‌رسد سيمان بسيار ريزدانه يا دوغاب‌هاي شيميايي گزينه هاي مناسبي در اين زمينه باشند.

در اين مقاله قابليت تزريق ماسه كربناته با استفاده از دوغاب سيليكات سديم مورد بررسي قرار مي‌گيرد. اين دوغاب يك دوغاب با اساس شيميايي بوده كه جهت اصلاح خصوصيات مكانيكي خاكها مورد استفاده قرار مي‌گيرد. در سال ۱۹۹۹، Alaa Ata [۱۱] عوامل موثر بر روي خصوصيات مكانيكي و خزشي ماسه‌هاي سيليكاته تزريق شده با اين دوغاب را مورد بررسي قرار داد. آزمايشها و مشاهدات نشان داده اند كه دوغاب سيليكات سديم در شرايط انجماد و يخ زدنهاي متوالي، از نظر ابعادي در دماهاي مختلف، مقاومت در برابر اسيدها، بازها، نمكها، باكتريها و قارچها داراي پايداري خوبي است [۱۲].

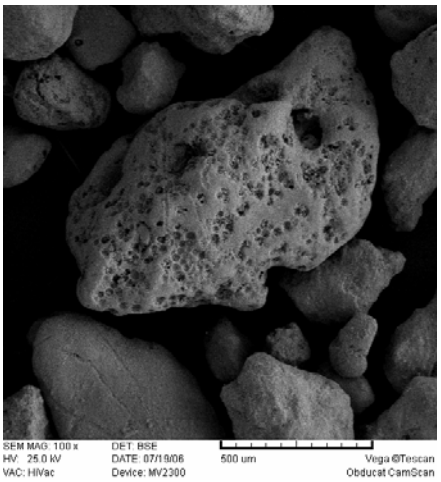
در اين مقاله پارامترهاي موثر بر روي مقاومت برشي خاك كربناته تزريق شده مانند نسبت آب به سيمان، دانسته نسبي اوليه خاک مورد تزريق، افزودنيها، زمان عمل آوري، سولفاتها و كلرايدهاي محلول در آب و دانه بندي ماسه تزريقي بررسي مي‌شوند. نتايج آزمايشها نشان مي‌دهند كه سازگاري خوبي بين دوغاب سيليكات سديم، افزودنيهاي آن و خاك كربناته مورد تحقيق وجود دارد.

۲- ويژگيهاي ماسه مورد استفاده

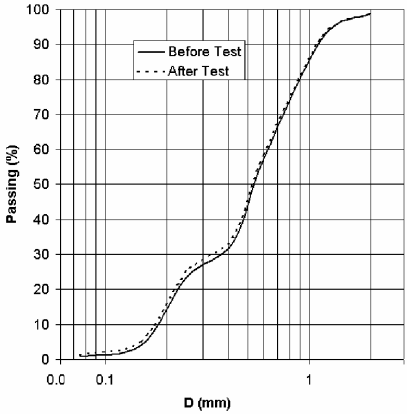
ماسه مورد بررسي از جزيره كيش واقع در شمال خليج فارس به دست آمد. درصد كربنات كلسيم ماسه از طريق آزمايشهايي مانند XRD، XRF و استاندارد BS-۱۳۷۷ به دست آمد. جهت مشاهده بافت و ساختار دانه هاي ماسه تصاوير ميكروسكوپ الكترونيكي (SEM) تهيه گرديد. طبق جدول (۱) درصد كلسيم خاک برابر ۶۲/۱ مي‌باشد. آزمايش XRD نشان مي دهد كه تركيب اصلي خاك $CaCO_3$ با مقدار كمي $MgCaCO_3$ (كربنات كلسيم دولوميتي) است. درصد كربنات كلسيم طبق استاندارد BS-۱۳۷۷ برابر ۹۳ مي باشد. آزمايشهاي ياد شده نشان مي‌دهند كه تركيب اصلي خاك، كربنات كلسيم مي باشد. تصاوير ميكروسكوپ الكترونيكي خاك در شكل (۱) نشان داه شده است. طبق اين شكل مقدار قابل توجهي از دانه‌هاي خاك متخلخل بوده و داراي ساختار بيولوژيكي هستند. دانسيته بيشينه، كمينه و چگالي ويژه دانه هاي جامد نيز در جدول (۱) نشان داده شده است. همان طور كه در مقدمه بيان شد مشكل اصلي اين خاك ها خرد شدگي دانه هاي آن تحت بارگذاري مي‌باشد. بر همين اساس منحني دانه بندي ماسه فوق قبل و بعد از يك آزمايش سه محوري تحكيم يافته-زهكشي شده (CD) تحت تنش هاي همه جانبه اوليه ۶۰۰ kPa با دانسيته نسبي ۵۰ درصد در شكل (۲) نشان داده شده است. شكل (۲) نشان مي‌دهد كه در مقايسه با مقادير گزارش شده توسط محققان ديگر [۵] و [۶] ماسه كربناته جزيره كيش قابليت خردشدگي كمي دارد.

جدول (۱): مشخصات فيزيكي خاك كربناته جزيره كيش

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		



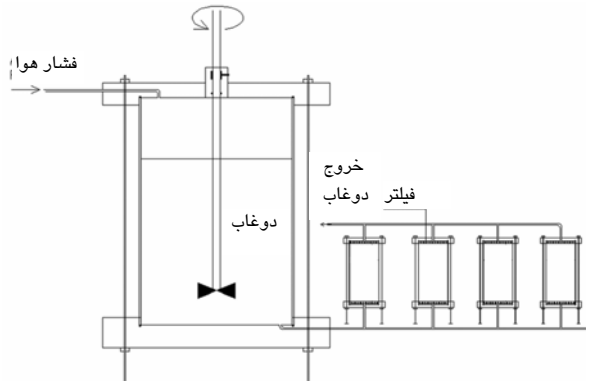
شكل (۱): تصاوير ميكروسكوپ الكترونيكي از خاك كربناته جزيره كيش



شكل (۲): منحني دانه بندي خاك كربناته جزيره كيش قبل و بعد از انجام آزمايش سه محوري تحكيم يافته-زهكشي شده (CD)

۳- دستگاه تزريق

جهت تزريق در آزمايشگاه دستگاهي مطابق شكل ۳ ساخته شد. دستگاه تزريق متشكل از يك مخزن دوغاب، يك همزن متصل به يك موتور جهت هم زدن دوغاب، چند سري قالب جهت ساخت نمونه ها و سيستم لوله كشي جهت ورود و خروج دوغاب از نمونه ها مي‌باشد. مخزن دستگاه متصل به يك كمپرسورمي‌باشد كه با استفاده از فشار هوا كه به روي دوغاب داخل مخزن اعمال مي‌شود آن را به داخل نمونه ها هدايت مي‌كند. فشار هواي اعمالي به دوغاب كه نزديک به اندازه فشار دوغاب نيز مي‌باشد توسط يك گيج فشار سنج هوا اندازه گيري مي‌گردد. ظرفيت دستگاه از نظر مقدار فشار قابل تحمل به اندازه ۶ بار مي‌باشد. دستگاه طوري طراحي شده است كه همزمان مي‌توان چند نمونه را تزريق نمود. اندازه و تعداد نمونه ها نيز قابل تغيير مي‌باشد. همه دستگاه بر روي يك ميز چهار پايه سوار و قابل جابه جا كردن است. لازم است بعد از هر تزريق، دستگاه باز و تميز شده و براي آزمايش بعدي آماده گردد. علاوه بر تزريق، مي‌توان از آن جهت انجام آزمايش نفوذپذيري نيز استفاده كرد. جنس قالبها و مخزن از نوعي پلاستيك شفاف (Plaxi glass) و لوله ها از جنس پلاستيك شفاف انعطاف پذير مي‌باشد. به نحوي كه در حين انجام تزريق، روند كار قابل رويت مي‌باشد.



شكل (۳): دستگاه استفاده شده جهت تزريق نمونه ها

۴- ساخت نمونه ها

نمونه‌ها به روش ريزش خشک (Dry deposition) ساخته شدند. در اين روش ابتدا خاك در كوره خشك مي‌گردد. سپس با استفاده از يك قيف استوانه اي شكل به صورت خيلی آرام و با حركت مار پيچ و سرعت ثابت، خاك از ارتفاع نزديک صفر به داخل قالب ريخته مي‌شود (قطر خروجي قيف ۱۲mm مي‌باشد). سپس با زدن ضربات آرام به بدنه قالب مي‌توان مقدار خاك مشخصي را در قالب جا داد تا دانسيته نسبي مورد نظر ايجاد گردد. بهتر است خاك به ۳ الي ۵ قسمت مساوي تقسيم شده و با تقسيم ارتفاع قالب به همان تعداد لايه، نمونه در چند مرحله ساخته شود تا نمونه همگني ايجاد گردد.

نمونه‌ها به شكل استوانه‌اي به قطر ۴ cm و ارتفاع ۸ cm ساخته شدند كه نسبت حداكثر اندازه دانه به قطر نمونه برابر ۰/۱۱ و كمتر از حد بالای آن (۰/۱۶) مي‌باشد. به روش گفته شده سه نمونه با دانسيته هاي نسبي اوليه ۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد ساخته شد و با تركيبات مختلف دوغاب تزريق گرديدند.

۵- ترکیب دوغاب تزریقی

دوغاب انتخابي براي تزريق در خاك با اساس شيميايي به نام سيليكات سديم با تركيب شيميايي ($Na_2O_2SiO_2$) مي‌باشد. اين دوغاب توانايي نفوذ در خاكهايي با دانه هاي بزرگتر از ۷۵ ميكرون را دارا مي‌باشد. هزينه آن نيز تا حد پايين بوده و پايداري متوسطي در عمل دارد و اجرای آن نیز آسان می‌باشد. از مزاياي ديگر اثرات زيست محيطي پايين آن است[۱۲].

به خاطر نوع خاك و تركيبات شيميايي آن، يونهاي موجود در خاك، بافت، دانه بندي، اندازه دانه‌ها، تراكم اوليه، قابليت عبور دوغاب از توده خاك و شرايط نگهداري بر روي مقاومت خاك تزريق شده تاثير گذار است و تركيب دوغاب مي‌تواند متفاوت انتخاب گردد. با ساخت دوغابها و نمونه‌هاي مختلف، روند افزایش مقاومت نمونه های تزریق شده مورد بررسي قرار می‌گیرد.

تركيب اصلي اين دوغاب، سيليكات سديم به عنوان ماده اصلي ايجاد كننده پيوندها و آب به عنوان عنصر تركيبي و عامل كاهش ويسكوزيته مي‌باشد. براي اين كه تركيب آب و سيليكات سديم قابليت واكنش داشته باشند ماده اي به عنوان فعال كننده نياز است تا واكنشهاي شيميايي شروع گردد. براي اين كار مي‌توان از فرماميد و بيكربنات سديم استفاده كرد. پايداري كم بيكربنات سديم در طبيعت، با وجود گراني، از فرماميد با فرمول شميايي ($HCONH_2$) جهت اين كار استفاده گرديد. از طرفي لازم است ماده‌اي جهت تسريع واكنشها اضافه گردد. براي اين كار نيزمي‌توان از كلريد كلسيم يا آلومينات سديم استفاده كرد. به خاطر اين كه احتمال مي‌رود كلر موجود در كلريد كلسيم تشكيل اسيد كلريدريك بدهد لذا آلومينات سديم با فرمول شيميايي ($NaAlO_2$) به عنوان تسريع كننده استفاده گرديد.

گفتنی است که دوغاب سیلیکات سدیم در کارهای مهندسی برای افزایش ظرفیت باربري و آب بندي كردن و كنترل تراوش زير زميني (در خاک های سیلیسی) استفاده می‌شود. آزمایشها و تجربيات نشان مي‌دهند كه دوغاب سيليكات سديم در محيطهاي اسيدي، قليايي، نمكي، قارچي مقاوم مي‌باشد [۱۲]. جدول (۲) تركيبهاي مختلف دوغابهاي آزمايش شده را نشان مي‌دهد.

جدول (۲): تركيبات مختلف دوغابهاي آزمايش شده

آلومينات سديم (%)	فرم آميد (%)	W/S
۱/۵-۰/۵۸	۷-۲	۳/۳۳-۰/۳۳

۶- تزریق

بعد از ساخت نمونه ها به روش موجود در بند ۴، دوغاب ساخته شده در مخزن دستگاه ريخته مي‌شود. با اعمال فشار هوا به كمك يك كمپرسور دوغاب به داخل نمونه‌ها هدايت گرديد. از آنجا كه نمونه ها با دانسيته هاي اوليه مختلف ساخته مي‌شوند و دامنه غلظت دوغابهاي ساخته شده بسيار متغير مي‌باشد لازم است فشار را به طور متناسب تنظيم نمود تا نمونه ها به طور كامل و يكنواخت تزريق گردند. در سيستم تزريق ساخته شده، نمونه ها از سمت پايين تزريق مي‌گردند لذا كنترل عمل تزريق راحت تر مي‌باشد. تزريق تا لحظه اي ادامه مي‌يابد تا از تزريق كامل نمونه اطمينان حاصل گردد در دوغابهاي تا نسبت آب به سيليكات W/S=۱ تمام نمونه ها به راحتي و تحت يك فشار حداقل ۰/۱ تا ۰/۲ بار تزريق شدند. ولي با كاهش نسبت فوق تا ۰/۳۳، فشار لازم براي تزريق حتي تا ۵ بار نيز افزايش يافت. به نحوي كه براي نسبت W/S<۰/۳۳ ظرفيت دستگاه به لحاظ تامين فشار لازم اجازه تزريق نداد.

۷- نگهداري نمونه ها

بعد از پايان تزريق، با توجه به تركيب دوغاب كه منجر به سرعتهاي مختلف گيرش مي‌گردد به مدت ۲۴ الي ۴۸ ساعت نمونه‌ها در داخل قالب نگهداري مي‌شود. سپس مي‌توان نمونه‌ها را از قالب خارج نمود. نمونه‌هاي خارج شده در پوشش‌هاي پلاستيكي دو الي سه لايه پيچيده شده و تا زمان انجام آزمايش نگهداري شدند. لازم به توضيح است كه شرايط نگهداري مي‌تواند متفاوت از اين باشد و به يقين اين مسئله بر روي مقاومت حاصل نيز تاثير گذار مي‌باشد. كه به نوبه خود موضوعي براي تحقيق مي‌باشد. ولي به لحاظ بررسی نمونه‌ها تحت شرايط ساخته شده با رطوبت اوليه، عمل نگهداري به روش ذكر شده انجام گرديد.

۸- انجام آزمايش هاي تك محوري

از آنجا كه تركيب شيميايي، بافت، شكل ذرات و زبری سطح ذرات خاك مورد بررسي از خاكهاي سيليسی متفاوت مي‌باشد جهت ملاحظه نتيجه اندركنش شيميايي و فيزيكي بين دانه‌هاي خاك و دوغاب انتخابی، با استفاده از آزمايش تك محوري، مقاومت و رفتار نمونه‌ها و اثر پارامترهاي مختلف بر روي مقاومت مورد بررسي قرار می‌گيرد.

۹- نتايج آزمايش

با انجام آزمايش تك محوري بر روي نمونه‌هاي مختلف تزريق شده اثر پارامترهای مختلف، مانند دانسیته نسبي اوليه، نسبت آب به سيليكات دوغاب، نسبتهاي مختلف فرمامید و آلومينات سديم، نوع آب دوغاب، اندازه دانه هاي خاك، اثر زمان و شرايط نگهداري بر روي روند تغييرات مقاومت و رفتار نمونه ها مورد بررسي قرار گرفت. در مجموع بيست و سه مرحله تزريق صورت گرفت و در هر مرحله ۴ نمونه به طور موازي مورد تزريق قرار گرفتند.

بعد از نگهداري نمونه‌هاي تزريق شده به مدت ١٤ روز، با استفاده از آزمايش تك محوري، نمونه‌ها بارگذاري گرديدند. شكل (٤) پوش مقاومت تك محوري حداكثر (qu)، مدول الاستيسيته اوليه (E) و كرنش محوري در لحظه گسيختگی را نشان مي‌دهد. در واقع نمودار پايیني پوش افزايش باربري و پارامترهاي دوم و سوم پوش تغيير شكل پذيري را نشان مي‌دهند. همان طور كه در شكل ٤ مشاهده مي‌شود با كاهش نسبت آب به سيليكات سديم هر سه پارامتر ياد شده زياد مي‌شوند. تا اين كه در نقطه W/S=۰/۵ به مقدار بيشينه خود مي‌رسند. با كاهش بيشتر نسبت W/S اين روند عوض مي‌شود. شايد بتوان اين روند را اين گونه بيان كرد كه با كاهش W/S، مقدار آب آزاد بين ذرات جامد نيز كمتر شده و تعداد يا نقاط پيوند افزايش مي‌يابد. تا اينكه به نقطه W/S=۰/۵ برسد. بعد از اين نقطه، يعني با كاهش بيشتر مقدار آب، از افزايش بيشتر تعداد و مقدار پيوندها جلوگيري به عمل مي‌آيد و پيوند ها نمي‌توانند زياد رشد نمايند. به همين علت روند افزايش مقاومت كاهش مي‌يابد. شايد در مورد مدول الاستيسيته نيز بتوان چنين روندي را بيان كرد. يعنی هرچقدر تعداد پيوندها بيشتر باشد در واقع پيوند نيز قويتر بوده و سختي افزايش مي‌يابد و پيوند ها ديرتر از هم گسيخته مي‌شوند. گفتنی است منحني هاي فوق در واقع يك پوش براي مقادير ياد شده مي‌باشند. در شكل (۵) پوش مقاومت تك محوري در برابر پوش كرنش لحظه گسيختگي ترسيم شده است. همان طور كه در شكل ۵ ملاحظه مي‌گردد تقريبا رابطه بين دو پارامتر مذكور به صورت خطي به صورت راي‌طه (۱) مي‌باشد.

$$q_u = 991\varepsilon_u - 1540 \qquad (۱)$$

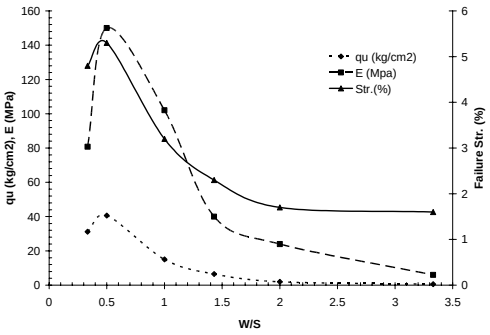
كه ε_u كرنش لحظه گسيختگی (%)، و q_u مقاومت تک محوری بيشينه (kPa) مي‌باشد.

تركيب دوغاب منجر به پوش‌هاي مقاومت، مدول الاستيسيته مماسي و كرنش بيشينه در جدول (۳) نشان داده شده است.

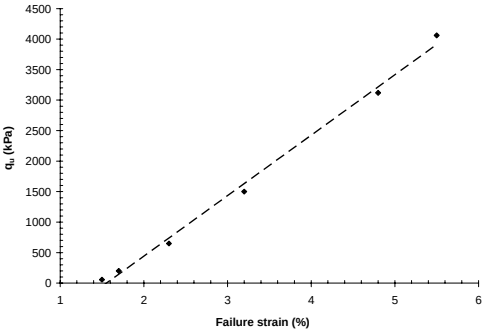
طبق شكل (۴) جهت به دست آوردن مقاومتهاي قابل توجه نمونه تزريق شده مانند W/S<1.43 بهتر است فرمامید (۷-۵)% وآلومينات سديم در حد ۱% انتخاب گردد.

با اين وجود ماسه كربناته بررسي شده سازگاري خوبي با دوغاب سيليكات سديم و افزودنيهاي آن نشان مي‌دهد. اين دوغاب مقاومت تك محوري نمونه مرطوب را تا MPa ۴ و مدول الاستيسيته مماسي اوليه آن را تا MPa ۱۵۰ و كرنش لحظه گسيختگي آن را تا ۵/۳% افزايش داده است.

همان طور كه قبلا نيز گفته شد دوغاب استفاده شده تركيبي از چهار ماده مختلف مي‌باشد و نمونه ها با دانسيته هاي نسبي اوليه مختلف مورد آزمايش قرار گرفته اند. يعنی صرف تركيب سيليكات سديم و آب پيوندي ايجاد نخواهد نمود مگر اين كه بين آنها واكنش صورت بگيرد. اينک اثر هر كدام از افزودنيها به طور جداگانه مورد بررسي قرار مي‌گيرد.



شكل (۴): پوش مقاومت تك محوري، مدول الاستيسيته و كرنش گسيختگي در مقابل نسبت آب به سيليكات براي تركيبات مختلف دوغاب



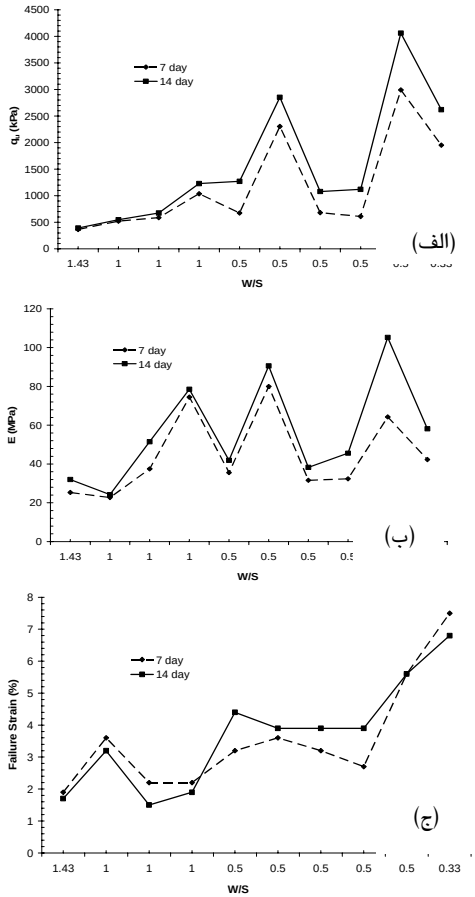
شكل (۵): پوش مقاومت تك محوري در برابر كرنش گسيختگي

جدول (۳): تركيب دوغاب های منجر به مقاومت بيشينه

تركيب دوغاب	نسبت آب به سيليكات					
	۰/۳۳	۰/۵	۱	۱/۴۳	۲	۳/۳۳
Alu.S. (%)	۱	۱	۱	۱	۰/۶	۰/۷
آمید (%)	۷	۷	۷	۵	۴	۲
زمان ژل (min)	۲۵۰	۳۱۰	۶۰	۷۵	۱۸۰	۵۰

۹-۱- بررسي اثر زمان بر روي مقاومت

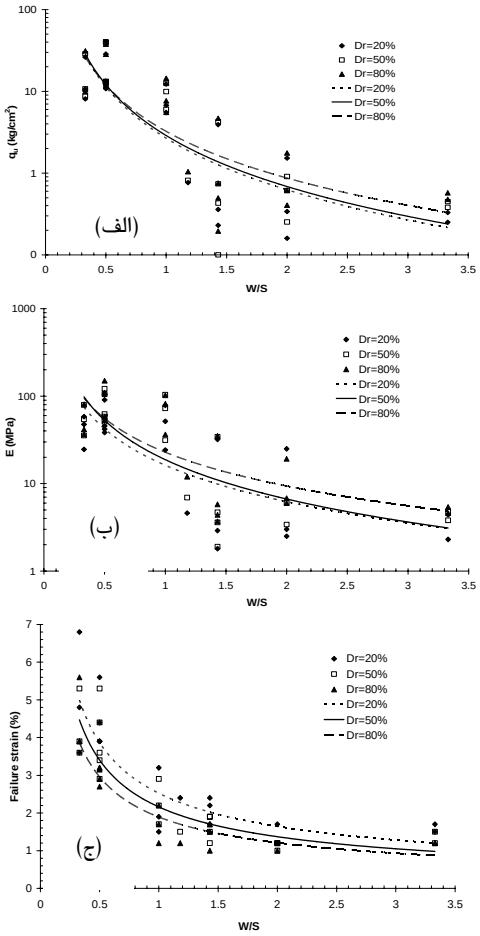
پيوندها براي تشكيل نياز به يك مدت زماني دارند. در مورد دوغاب سيليكات سديم، زمان بررسي مقدار مقاومت حاصل از پيوندها چهارده روز مي‌باشد[۱۲]. جهت بررسي اثر زمان، يك سري از نمونه ها به تعداد دو مورد ساخته شدند و در مدت زمانهاي هفت و چهارده روزه مورد آزمايش قرار گرفتند. شكل (۶) مقاومت تك محوري، مدول الاستيسيته و كرنش لحظه گسيختگي را در مقابل زمان براي دوغابهاي مختلف نشان مي‌دهد. شكل (۶) مربوط به نمونه‌هاي با دانسيته نسبي اوليه ۲۰% مي‌باشد. ملاحظه مي‌شود كه با افزايش زمان مقاومت تك محوري و مدول الاستيسيته نيز زياد شده است. ولي نرخ افزايش مقاومت براي دوغابهاي مختلف متفاوت مي‌باشد. اين مسئله به خاطر تفاوت نسبتهاي تركيب دوغاب و افزودنيها مانند فرماميد و آلومينات سديم در آنها مي‌باشد و بنابراين سرعت پيشرفت واكنشها در آنها متفاوت است. روند فوق طبيعي مي‌باشد و زمان كسب مقاومت حداكثر نيز متناسب با تركيب اوليه و مقادير افزودنيها مي‌باشد.



شكل (۶): اثر زمان نگهداري بر روي (الف) مقاومت تك محوري، (ب)مدول الاستيسيته، (ج) كرنش لحظه گسيختگي نمونه ها

۹-۲- بررسي اثر دانسيته نسبي اوليه

نمونه ها با سه دانسيته نسبي اوليه مختلف سست (۲۰%)، متوسط (۵۰%) و متراكم (۸۰%) ساخته شدند. تا اثر نسبي تراكم و تماسهاي بيشتر دانه ها و مقادير پيونهاي حاصل از دوغاب مشخص گردد. اشكال (۷ الف، ب و ج) به ترتيب اثر دانسيته نسبي اوليه خاک تزريقی را بر روي مقاومت تك محوري، مدول الاستيسيته و كرنش محوري لحظه گسيختگي نشان مي‌دهد. همان طور كه از شكل(۷ الف) مشاهده مي‌گردد با زياد شدن دانسيته نسبي مقاومت تك محوري نيز بيشتر شده است. اختلاف مقاومت ناشي از دانسيته نسبي در نسبتهاي W/S بالا، بيشتر مي‌باشد. ولي با كمتر شدن نسبت W/S اثر دانسيته نسبي نيز بر روي مقاومت تك محوري كمتر شده است. از شكل (۷ب) مشاهده مي‌گردد كه با زياد شدن دانسيته نسبي سختي نمونه هاي تزريق شده نيز زياد شده است. شكل (۷ ج) نيز نشان مي‌دهد با زياد شدن دانسيته نسبي انعطاف پذيري كمتر شده و كرنش هنگام گسيختگی كاهش مي‌يابد.



شكل (۷): (الف) مقاومت تك محوري، (ب) مدول الاستيسيته، (ج) كرنش لحظه گسيختگي در برابر نسبت **W/S**

۹-۳- اثر افزودنيها

پيشتر گفته شد كه تركيب آب و سيليكات سديم به تنهايي منجر به ايجاد پيوند نمي‌شود. زيرا براي ايجاد پيوند نياز به ايجاد واكنش هاي شيميايي مي‌باشد و براي واكنش نياز به يك فعال كننده مي‌باشد. در مطالعات انجام شده از ماده فرمامید براي اين كار استفاده گرديد. سرعت واكنشها و ايجاد پيوند ها مي‌تواند بسيار متغير باشد. سرعت واكنشها را مي‌توان با استفاده از يك افزودني ديگر كنترل نمود. در مطالعه حاضر براي اين منظور از آلومينات سديم استفاده گرديد. تركيبات مختلف چهار ماده ياد شده منجر به سرعتهاي بسيار متغير واكنشها مي‌گردد. بعد از تركيب و ساخت دوغاب و پس از گذشت زمان معمول، دوغاب حالت ژله مانندي به خود مي‌گيرد كه به زمان ژل معروف است. در واقع زمان ژل شدن تابع مقادير تركيبات مختلف اوليه مي‌باشد. هرچقدر زمان ژل كمتر باشد نشان دهنده سرعت بالاي واكنشها است. اين امكان وجود دارد كه دوغاب ساخته شده در مدت زمان بسيار طولاني به صورت ژل در آمده و يا هيچگاه ژل تشكيل نشده و هيچ پيوندي تشكيل نگردد. نكته ديگر اين كه بعد از ايجاد ژل امكان تزريق وجود ندارد و ويسكوزيته خيلي زياد مي‌گردد. بنابراين نسبتهاي تركيبي بايد به گونه‌اي انتخاب گردند كه هم زمان ژل اجازه تزريق را بدهد و هم پيوند هاي قويتري تشكيل گردد.

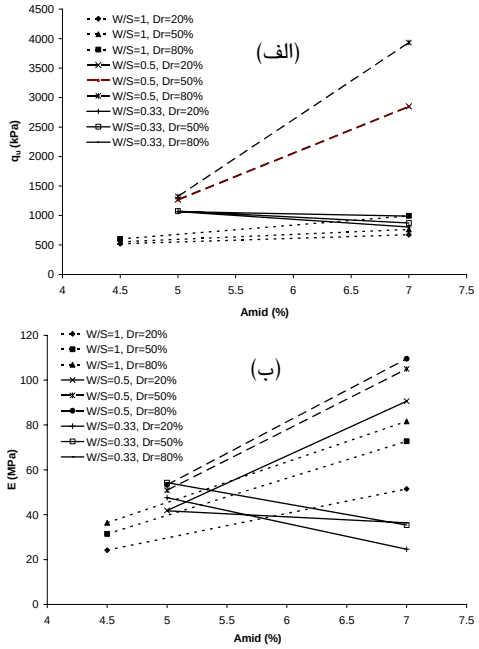
شكل (۸ الف) مقاومت تك محوري را براي نسبتهاي W/S و دانسيته نسبي اوليه مختلف در برابر درصد فرمامید با آلومينات سديم ثابت نشان مي‌دهد. از شكل ۸ ملاحظه مي گردد كه با زياد شدن درصد فرم آميد تا نسبت W/S=۰/۵ مقاومت تك محوري زياد مي‌شود. ولي براي نسبت W/S=۰/۳۳ روند فوق برعكس مي‌گردد. از طرفي ميزان تاثير فرم آميد بر روي مقاومت در نسبتهاي مختلف W/S متفاوت بوده و اثر آن در نسبت W/S=۰/۵ بيشتر از ساير نسبت ها است. شكل (۸ ب) تغييرات مدول الاستيسيته را در برابر تغييرات فرم آميد براي همان شرايط مشروح نشان مي‌دهد. از اين شكل نيز ملاحظه مي‌گردد كه با افزايش فرم آميد مدول الاستيسيته مگر براي دوغاب با W/S=۰/۳۳ زياد مي‌گردد.

شكل (۹الف) مقاومت تك محوري را براي نسبتهاي W/S و دانسته نسبي مختلف در برابر درصدهاي مختلف آلومينات سديم با درصد فرمامید ثابت نشان مي‌دهد. در اين شكل ملاحظه مي‌گردد كه برعكس فرمامید، با افزايش آلومينات سديم، مقاومت تك محوري كاهش مي‌يابد. در اين حالت نيز ميزان تاثير آن در نسبتهاي مختلف W/S متفاوت مي‌باشد.

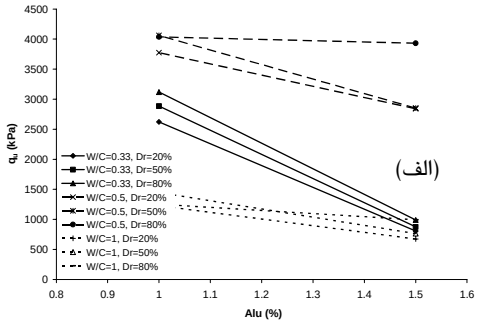
در بعضي نسبتهاي W/S، ميزان تاثير بيشتر و در بعضي نسبتها ميزان تاثير كمتر مي‌باشد. شكل (۹ب) نيز تغييرات مدول الاستيسيته را در برابر تغييرات آلومينات سديم با فرم آميد ثابت نشان مي‌دهد. از اين شكل ملاحظه مي‌گردد كه با زياد شدن آلومينات سديم مدول الاستيسيته كمتر مي‌شود.

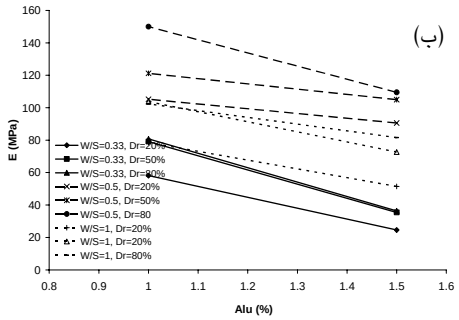
۹-۴- اثر نوع آب مصرفی در تهيه دوغاب

با توجه به اين كه اغلب اوقات رسوبات كربناته در محيط‌هاي دريايي واقع مي‌شوند و خاك انتخابي نيز از يك محيط دريايي (جزيره كيش) انتخاب شده است لذا در يك بررسي جداگانه، اثر نوع آب مصرفی در تهيه دوغاب مورد بررسي قرار گرفت. با سه نوع آب مختلف، آب نوشيدنی شهر تهران، آب مقطر و آب دريای خليج فارس و نسبت W/S=۱ نمونه‌هاي مشابه ساخته شده و تزريق گرديدند. آب دريا داراي ۰/۳۰۹% نمك بود.



شكل (۸): (الف) مقاومت تك محوري، (ب) مدول الاستيسيته در برابر تغييرات فرم آميد براي نسبتهاي مختلف **W/S** و آلومينات سديم ثابت

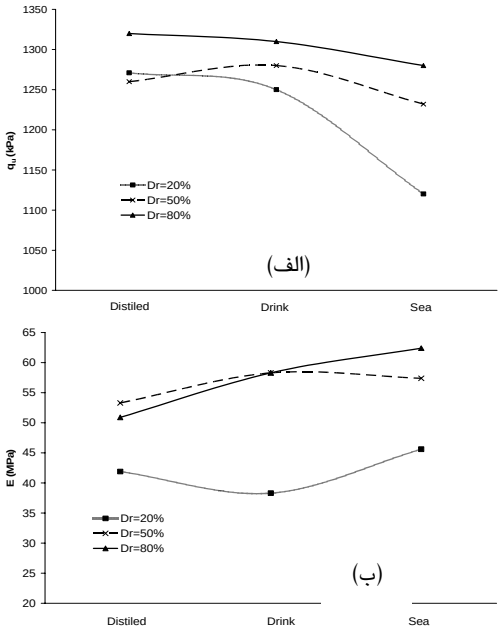




شكل (۹): (الف)مقاومت تك محوري، (ب) مدول الاستيسيته در برابر تغييرات درصد آلومينات سديم براي نسبتهاي مختلف **W/S** و درصد فرم آميد ثابت

سولفات، ۲/۲۵۷ درصد كلرايد با PH=۷/۹ مي‌باشد.

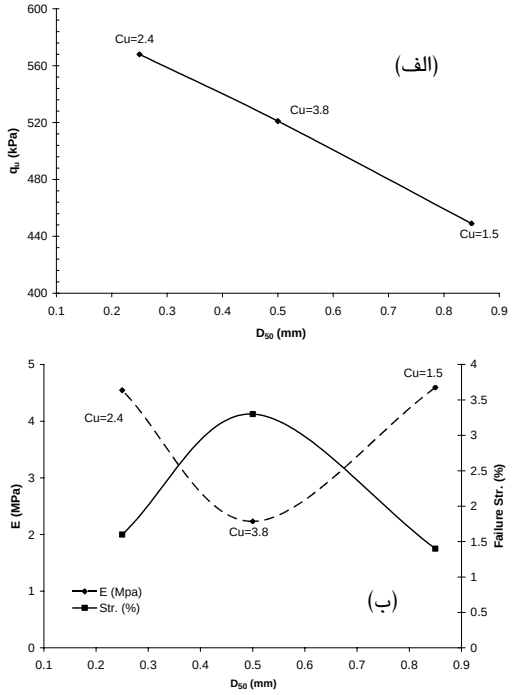
نتايج آزمايش به صورت مقاومت تك محوري و مدول الاستيسيته در برابر نوع آب دوغاب در شكل (۱۰) براي سه نمونه مختلف با دانسيته هاي نسبي مختلف نشان داده شده است. در شكل (۱۰) مشاهده مي‌شود كه مقاومت نمونه‌هاي تزريق شده با آب شرب و آب مقطر نزديک به هم و يكسان است. ولي نمونه هاي تزريق شده با آب دريا دچار افت مقاومت شده است. هرچند مقدار افت چندان زياد نيست ولي به نظر مي‌رسد وجود سولفاتها و كرايدها و محيط بازی باعث افت نسبي مقاومت شده است. ملاحظه مي‌گردد كه مقدار افت در دانسيته هاي نسبي كم بيشتر محسوس مي‌باشد. از طرفي به طور ظاهری به نظر مي‌رسد وجود املاحي مانند كلرايدها و سولفاتها باعث افزايش سختي نمونه تزريق شده مي‌گردد.



شكل (۱۰): اثر نوع آب مصرفی دوغاب بر روي (الف) مقاومت و (ب) مدول الاستيسيته نمونه ها (**W/S=1**)

۹-۵- اثر اندازه دانه

از آنجا كه خاك مورد تزريق مي‌تواند دانه بندي‌هاي مختلفي داشته و اندازه دانه‌ها ريز يا درشت باشد. لذا خاك مورد مطالعه با سه دانه بندي مختلف بالاي الك ۳۰ (با ضريب يكنواختی Cu=۱/۵)، زير الك ۳۰ (Cu=۲/۴) و تركيبي (بالای الک ۳۰ و زير آن، Cu=۳/۸) با دانسيته نسبي ۲۰ درصد تزريق گرديدند. نتيجه آزمايش تك محوري انجام شده بر روي نمونه‌ها به صورت مقاومت تك محوري، مدول الاستيسيته و كرنش لحظه مقاومت حداكثر در مقابل متوسط اندازه دانه‌ها (D_{50}) خاك در شكل (۱۱) نشان داده شده است. در شكل (۱۱) ملاحظه مي‌گردد كه با درشت تر شدن اندازه دانه ها مقاومت تك محوري (در اثر كم شدن تعداد نقاط تماس) كم مي‌شود. نمونه‌هاي با دانه بندي يكنواخت تر تردتر و سخت تر و نمونه‌هاي با دانه بندي گسترده تر نرم تر و انعطاف پذيرتر(در اثر بيشتر شدن تعداد نقاط تماس و پيوند) مي‌باشند. اين مسئله از روي دو منحني ديگر مدول الاستيسيته و كرنش لحظه مقاومت حداكثر قابل استنباط است (شكل ۱۱ب).

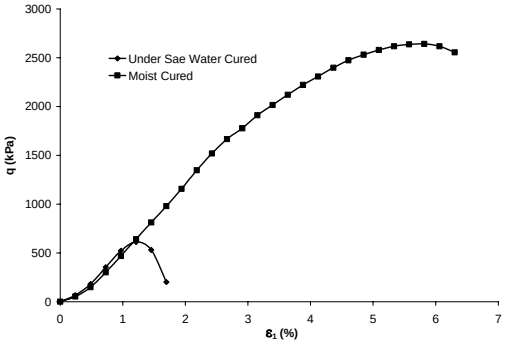


شكل (۱۱): اثر اندازه دانه بر روي (الف) مقاومت و (ب) مدول الاستيسيته و كرنش گسيختگي نمونه ها

۹-۶- شرايط نگهداري

با آگاهی از آن كه مقاومت نمونه‌های عمل آوری شده در زير سطح آب خيلی كمتر از مقاومت نمونه‌های عمل آوری شده موضوع بحث در مقاله حاضر می‌باشد با اين وجود براي

بررسي اثر شرايط نگهداري در زير آب دريا بر روي مقاومت حاصل، دو نمونه سست (Dr=%۲۰) با دوغاب W/S=۰/۵ مورد تزريق قرار گرفتند. يكي از نمونه‌ها در زير آب دريا (با غلظت كلر ۲/۲۵۷ درصد و غلظت سولفات ۰/۳۰۹ درصد و Ph=۷/۹) و ديگري در شرايط مرطوب با حفظ رطوبت اوليه تزريقي نگهداري گرديد. همان طور كه در شكل ۱۲ نشان داده شده است مقاومت تك محوري نمونه نگهداري شده تحت شرايط مرطوب اوليه و نمونه نگهداري شده در زير آب دريا به ترتيب برابر با ۲۶۰۰ و ۶۰۰ kPa مي‌باشد. ملاحظه مي‌گردد كه شرايط نگهداري در زير آب دريا با مشخصات ذكر شده باعث افت قابل توجه مقاومت نمونه مي‌گردد. به نحوي كه مقاومت آن نزديک به ۲۳ درصد نمونه نگهداري شده تحت شرايط مرطوب مي‌گردد. از طرفي نمونه ياد شده بسيار سريعتر و در كرنشهاي محوري خيلي كمتري نسبت به نمونه نگهداري شده تحت شرايط مرطوب به گسيختگي رسيده است.



شكل (۱۲): تاثير شرايط نگهداري بر روي مقاومت نمونه ها

۱۰- نتيجه گيري

بر اساس نتايج آزمايشهاي تك محوري بر روي خاك كربناته جزيره كيش (با قابليت خرد شوندگي متوسط دانه ها) اصلاح شده با تزريق دوغاب شيميايي سيليكات سديم ملاحظه گرديد كه:

۱- درصد قابل توجهي از ماسه كربناته داراي قابليت خرد شدگي است. روش الك كردن جهت دانه بندي ماسه مورد بررسي، آزمايش تحكيم يك بعدي و تحكيم همسان اين قابليت را نشان مي‌دهند.

۲- تزريق دوغاب سيليكات سديم باعث افزايش مقاومت تك محوري و مدول الاستيسيته خاك كربناته مي‌گردد. به نحوي كه در شرايط ايده آل مي‌توان انتظار افزايش مقاومت تا حدود ۴ MPa و مدول الاستيسيته مماسي تا ۱۵۰ MPa را داشت.

۳- حصول مقاومت دوغاب تابع تركيب اوليه دوغاب مي‌باشد. به نحوي كه لازم است هم جهت به دست آوردن يك مقاومت مناسب و هم زمان ژل مناسب جهت قابليت تزريق پذيري، تركيب مناسبي انتخاب گردد.

۴- با كاهش نسبت W/S تا نسبت ۰/۵ مقاومت تك محوري، مدول الاستيسيته مماسي اوليه و تغييرشكل پذيري خاك زياد مي‌گردد. كمتر از نسبت W/S=0.5 روند فوق عوض مي‌شود. به نوعي مي‌توان گفت اين نسبت يك نقطه بهينه مي‌باشد.

۵- دانسيته نسبي اوليه خاك مورد تزريق باعث افزايش نسبي مقاومت تك محوري، مدول الاستيسيته مماسي اوليه و كاهش تغييرشكل پذيري خاك تزريق شده مي‌گردد. با اين وجود، با كاهش نسبت W/S اثر دانسيته نسبي اوليه بر روي مقاومت تك محوري كم شده و مقاومت تك محوري خاك تابع دوغاب مي‌گردد نه دانسيته نسبي.

۶- با گذشت زمان مقاومت خاك تزريق شده زياد مي‌گردد. ولي نرخ افزايش مقاومت در تمام دوغابها يكسان نيست و تابع نسبتهاي تركيب دوغاب است.

۷- آبهاي داراي املاحي مانند سولفاتها و كلريدها و محيطهاي بازی (محيط خليج فارس) اثر كاهندگي بر روي مقاومت نمونه تزريقی دارند و باعث افت نسبي مقاومت آن مي‌شوند.

۸- مقاومت خاك تزريق شده با افزايش اندازه دانه ها كاهش مي‌يابد و هرچقدر دانه بندي خاك مورد تزريق گسترده تر باشد انعطاف پذيرتر خواهد بود و برعكس.

۹- افزودنيهايي مانند فرماميد و آلومينات سديم باعث انجام واكنشها و تسريع آن و كاهش زمان ژل مي‌شوند. با اين وجود افزايش فرماميد به عنوان يك فعال كننده باعث افزايش مقاومت و مدول الاستيسيته و افزايش آلومينات سديم به عنوان تسريع كننده باعث كاهش مقاومت و مدول الاستيسيته خاك تزريق شده مي‌گردد.

۱۰- نگهداري نمونه خاكهاي كربناته تزريق شده در زير آب دريا داراي درصد قابل توجهي كلريدها و

سـولفاتها باعـث افـت مقاومـت و تردتـر شـدن آنهـا مي‌گردد.

۱۱- مراجع

[۱] Semple, R.M.; "Mechanical Properties of Calcareous Soils: State of the Art Report", Proceeding of lst 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 Geoenviromental 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.

[۱۱] 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).

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