ارزیابی تغییرات ریزساختاری و پارامترهای مقاومتی ماسههای سیلتی تثبیت شده با نانو کلوئید سیلیکا

غلام مرادی ^{*۱} و شیوا سیّدی ^۲ ^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز ^۲ فارغالتحیل دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت ۹۴/۳/۲۶ پذیرش ۹۴/۱۱/۱۱

* نویسنده مسئول

چکیدہ

به منظور بررسی رفتار ماسههای سیلتی تثبیت شده با نانو کلوئید سیلیکا، ۳۲ نمونه، تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفته و ریزساختار تعدادی نمونه، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شده است. نمونههای آزمایش مقاومت تکمحوری، شامل مخلوط ماسه و مقادیر صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی سیلت بوده و به روش رسوبگذاری در محلولهای کلوئید سیلیکا با غلظت ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی، تهیه شدهاند. دوره عمل آوری نمونهها نیز، ۳ تا ۳۰ روز در نظر گرفته شده است. با وجود این که در شرایط طبیعی، ماسهها و سیلت ها فاقد چسبندگی و مقاومت فشاری محدود نشده می اشند، ولی مقاومت فشاری نمونههای مختلف تثبیت شده آنها، در محدوده قابل توجه ۲۵ تا ۲۴۰ کیلوپاسکال قرار میگیرد. ملاحظه می شود در تمامی شرایط متفاوت تثبیت، بین افزایش مقاومت فشاری نمونهها با افزایش غلظت کلوئید سیلیکا و افزایش طول مدت عمل آوری، مرابطهای خطی می شود در تمامی شرایط متفاوت تثبیت، بین افزایش مقاومت فشاری نمونهها با افزایش غلظت کلوئید سیلیکا و افزایش طول مدت عمل آوری، مادحظه می شود در تمامی شرایط متفاوت تثبیت، بین افزایش مقاومت فشاری نمونهها با افزایش غلظت کلوئید سیلیکا و افزایش طول مدت عمل آوری، مادحظه می می و تریز جه با کاهش زمان گیرش کلوئید، از شدت تأثیر زمان عمل آوری، کاسته می شود. همچنین در شرایط یکسان تثبیت، نمونههای ماسه سیلتی با ۱۰ درصد سیلت، بیشترین مقاومت فشاری را در بین دیگر نمونهها دارند. از طرفی دیگر، تفاوت شکل و سطوح ذرات ماسه – سیلت طبیعی و تثبیت شده، توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به وضوح آشکار میگردد، به طوری که مشخص می شود سطح ذرات تثبیت شده، دارای تودههای لایه ای از کلوئید سیلیکا می بیه.

واژگان کلیدی:ماسههای سیلتدار، کلوئید سیلیکا، آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری، غلظت، زمان عمل آوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).

۱– مقدمه

تثبیت لایههای خاکهای مستعد روانگرایی با استفاده از نانوذرات، روشی نوین و در حال توسعه است. در این روش، که تثبیت تدریجی نام گرفته، فرض بر این است که سیلیکای کلوئیدی در اثر جریان آب زیر زمینی و یا تنظیم مناسب الگوی آن، به صورت آرام و تدریجی، در تمامی سایت مورد نظر، که در معرض روانگرایی است، پخش میگردد و پس از گیرش، منجر به اصلاح آن میشود (شکل (۱)). این روش به ویژه برای سایتهای بسته و توسعه یافته که دارای سازههای حساس به تغییر شکل و ارتعاش میباشند، مناسب میباشد [۱]. کلوئید سیلیکا که به عنوان ماده تثبیت کننده در این روش مورد توجه قرار میگیرد، سوسپانسیون مایعی از نانو ذرات سیلیس (SiO₂) به ابعاد تهیه میشود [۲]. محلولهای اشباع اسید سیلسیک دوره تهیه میشود [۲]. محلولهای تهیه شده از کلوئید سیلیکا دوره استقرار طولانی دارند به عبارتی دیگر، ویسکوزیته اولیه آنها

مؤثر بر گیرش، از چند ساعت تا چندین ماه، قابل تغییر است. همچنین این محلولها، از لحاظ شیمیایی، خنثی بوده و مشخصات دوام و پایداری آنها در طولانی مدت، بسیار مناسب میباشد [۳، ۴]. تثبیت تدریجی ماسههای روانگرا در مقیاس آزمایشگاهی، توسط تعدادی مدلهای فیزیکی و جعبعهای مورد بررسی قرار گرفته است [۵،۱–۸]. مدلسازی توسط سانتریفیوژ ۱۰ یز نتایج قابل قبولی را برای این نوع تثبیت نشان داده است [۹ ستفاده از کلوئید سیلیکا در بهسازی زیست محیطی انجام شده استفاده از کلوئید سیلیکا در بهسازی زیست محیطی انجام شده کلوئید سیلیکا در محدودهای به قطر ۹ متر، تزریق شده و لایهای از ماسه اشباع توسط آن با موفقیت مورد اصلاح قرار گرفته است است ایرای مدلسازی عددی جریان کلوئید در ماسهها نیز نرم-افزارهای WDDFLOW، MODFLOY و MICHEM توسط افزارهای MODFLOS، است [۶، ۱۰۹].



شکل ۱- طرح شماتیکی از روش تثبیت تدریجی

برای سنجش مشخصات مکانیکی ماسههای تثبیت شده با کلوئید سیلیکا، پژوهشهای محدودی با انجام آزمایشهای مقاومت فشاری تک محوری و آزمایش های سه محوری سیکلی، صورت پذیرفته است. مقاومت فشاری تک محوری نمونههای تثبیت شده ماسه با %۳۰ ۲۰ کلوئید سیلیکا، ۴۳۰ kPa گزارش شده است [18]. همچنین مقاومت فشاری تک محوری نمونه های تثبیت شده با %wt ۲۰ ۵-۲۰ کلوئید سیلیکا، در دوره عمل-آوری ۳۰–۷ روزه، در محدوده ۲۲۲ kPa قرار گرفته و ملاحظه شده است که هیچ کدام از نمونهها در حین بارگذاری سیکلی توسط دستگاه سه محوری دینامیکی، دچار روانگرایی نشدهاند [۱۷]. رفتار نمونههای تثبیت شده ماسه سست با %wt ۴/۵ کلوئید سیلیکا نیز مشابه رفتار ماسههای متراکم گزارش گردیده است [۱۸]. به طور کلی می توان گفت حتی درصد اندکی از کلوئید سیلیکا، منجر به بهبود خصوصیات مکانیکی ماسههای سست شده است [۲۱-۱۹]. اکثریت پژوهشها در زمینه تثبیت خاک با کلوئید سیلیکا، بر روی خاکهای ماسهای روانگرا انجام شده و در مورد بهسازی دیگر خاکهای مستعد روانگرایی، مطالعه جامعی صورت نپذیرفته است، لذا در تحقیق حاضر، نمونههایی از ماسه و مقادیر مختلف سیلت غیر خمیری، توسط محلول هایی با غلظت متفاوت از کلوئید سیلیکا، مورد تثبیت قرار گرفته، سپس با در نظر گرفتن دورههای متفاوت عمل آوری، مقاومت فشاری تک محوری آنها، تعیین گردیده و به این ترتیب، تأثیر مقدار سیلت، غلظت کلوئید و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری نمونهها مشخص شده است. همچنین ریز ساختار نمونههایی از ماسه و سیلت در حالت عادی و پس از تثبيت با كلوئيد سيليكا، توسط ميكروسكوپ الكترونى روبشى (SEM) تصویربرداری شده و تغییر شکل و تغییر سطوح ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. برای تفسیر تصاویر، از نتایج پژوهشهای محققین در مورد ریز ساختار دانههای کوارتز [۲۲] استفاده گردیده است.

۲- کلوئید سیلیکا و فرآیند گیرش آن

نانو كلوئيد سيليكا سوسپانسيوني مايع از نانو ذرات سيليس (SiO₂) به ابعاد ۲-۱۰۰ نانومتر است که از اندرکنش مولکولهای محلول اشباع اسید سیلسیلیک H_4Sio_4 و تشکیل باندهای سیلوکسن (Si-o-Si) حاصل می شود. سطح ذرات، از سیلانول های (SiOH) گروهی ترکیب نشده، تشکیل یافته و هنگام اندرکنش اجزاء با یکدیگر، باندهای سیلوکسن (Si-o-Si) در بین ذرات تشکیل می شود. ادامه این فرایند موجب بزرگ شدن و رشد اندازه ذرات می شود. برای کنترل اندازه ذرات، می توان pH آنها را افزایش داد. افزایش pH محلول، منجر به یونیزه شدن ذرات و دفع آنها نسبت به یکدیگر می گردد، بدین ترتيب ميتوان زمان گيرش (ژل شدن) را به تأخير انداخته و فرآیند ژل شدن را تحت کنترل درآورد. با توجه به توضیح فوق، به منظور تثبیت محلولهای کلوئیدی سیلیکا وجلوگیری از ژل شدن، در هنگام ساخت آنها، از محلولهای قلیایی نظیر هیدروکسید سدیم استفاده می گردد. ماده قلیایی با سطح ذرات واکنش داده و بارالکتریکی منفی در سطح آنها ایجاد میکند که منجر به دافعه ذرات نسبت بهم می گردد (شکل (۲-الف)). در حقيقت يونهاى هيدروكسيل اضافه شده توسط محلول قليايي، عمل ژل شدن را تسریع میکنند اما شارژ الکتریکی ایجاد شده در ذرات به حدی است که کلوئید سیلیکا، پایدار مانده و در نهایت گیرش آن با تأخیر صورت می پذیرد.

با کاهش pH از ۸، شارژ الکتریکی ذرات نسبت به غلظت یونی هیدروکسیلها کمتر شده و ذرات میتوانند باهم واکنش داده، باندهای سیلوکسن را تشکیل دهند و محلول کلوئیدی را به سمت ژل شدن پیش برند (شکل (۲-ب)). به طور کلی، در تمامی محلولهای کلوئید سیلیکا، سریعترین گیرش در pH ما بین ۶-۵ رخ میدهد. در pH کمتر از ۵، با وجود این که اجزاء بدون شارژ میباشند ولی به دلیل از بین رفتن یونهای هیدروکسیل، نرخ تشکیل باندهای سیلوکسن کاهش یافته و مجدداً زمان ژل شدن افزایش مییابد (شکل (۲–ج)).

علاوه بر مقدار pH، غلظت (درصد وزنی نانو ذرات سیلیس در محلول)، مقاومت یونی (میزان کاتیونها و نمکهای موجود)، اندازه نانو ذرات سیلیس و میزان سطح مخصوص آنها، بر زمان گیرش محلولهای کلوئید سیلیکا تأثیر گذارند.

با کنترل این عوامل، زمان گیرش محلولها، از چند ساعت تا چندین ماه قابل کنترل می باشد [۱۷].



شکل ۲- رفتار ذرات کلوئید سیلیکا در pH های مختلف: الف) h+<۵ (مج ۵<pH ، ب) pH<۵ ، ج) pH

بر اساس این ویژگی، کلوئید سیلیکا، به عنوان گزینهای مناسب برای جریان در رسوبات اشباع مستعد روانگرایی و تثبیت تدریجی آنها، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

۳- مواد و روشها

۳-۱- مواد

در تحقیق حاضر، مجموعهای از مصالح خاکی و مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه مشخصات آنها، به ترتیب ارائه می گردد. مصالح خاکی شامل ماسه سیلیسی ۱۶۱ فیروزکوه و سیلت غیر خمیری فیروزکوه (با دامنه خمیری کمتر از ۴) می باشد. نمودار دانه بندی ماسه و سیلت و مشخصات فیزیکی ماسه، به ترتیب در شکل (۳) و جدول (۱) ارائه شده است. همچنین آنالیز شیمیایی ماسه و سیلت در جدول (۲) قابل مشاهده می باشد.

کلوئید سیلیکای مورد استفاده، محصول -SIGMA است که در ALDRICH بوده و از نوع %Ludox®SM-30wt است که در حین انجام آزمایشات، غلظت ۳۰ درصدی آن با استفاده آب مقطر به مقدار مورد نیاز کاهش یافته است. مشخصات ارائه شده توسط شرکت مزبور برای %Ludox®SM-30wt در جدول (۳) ملاحظه میشود. برای کنترل زمان گیرش محلولهای کلوئیدی نیز از اسید کلریدریک ۶ نرمال (HCl 6N) و کلرید سدیم خالص (NaCl) استفاده شده است.

کوہ	فيروز	181	ماسه	فيزيكى	شخصات	n - 1	جدول
-----	-------	-----	------	--------	-------	-------	------

ماسه بد دانهبندی	نوع ماسه بر اساس طبقهبندی		
شده (SP)	متحد		
•/YV	D60 (ميلىمتر)		
•/۲۴	D50 (ميلىمتر)		
• /٢	D30 (ميلىمتر)		
•/\۵	D10 (ميلىمتر)		
١/٨	(ضریب یکنواختی) C_{u}		
٠/٩	(ضريب انحنا) C_{c}		
۲/۶۵	(توده ویژه) G _s		
• /AY	(نسبت تخلخل بیشینه) e _{max}		
۰/۵۴	(نسبت تخلخل کمینه) e _{min}		

جدول ۲ - مشخصات شیمیایی ماسه ۱۶۱ و سیلت فیروزکوه

درصد وزنی در ذرات (٪)	فرمول شیمیایی اکسیدهای
	موجود
٩۶–٩٨/٨	SiO ₂
• /Y-•/Y	Fe ₂ O ₃
 √۵۱−۱/۶۵ 	Al ₂ O ₃
•/Y-•/۵	CaO
•/•٣-•/•X	Na ₂ O
•/•٣-•/١•	K ₂ O

Ludox® SM-30wt%	سیلیکای	كلوئيد	- مشخصات	ل ۳	جدوا
-----------------	---------	--------	----------	-----	------

۳۰ wt%	درصد وزنی سیلیکا (SiO ₂)
٩/٨ – ١ • /٣	pH
۸ نانومتر	میانگین اندازه ذرات
۴۰۰- ۳۲۰ مترمربع بر گرم	سطح مخصوص
۱/۲۲ گرم بر میلییتر	دانسیته در دمای ۲۵ درجه
۵/۵ سانتی پواز	ويسكوزيته



شکل ۳- نمودار دانهبندی ماسه ۱۶۱ و سیلت فیروزکوه

۳-۲- روشها ۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

ابتدا محلول اصلى كلوئيد سيليكا كه طبق مشخصات شركت سازنده (جدول (۳)) دارای غلظت ۳۰ درصد وزنی (%wt) است با استفاده از آب مقطر به سه محلول با غلظت سیلیکای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی (wt%)، رقیقسازی شده است. لازم به ذکر است که منظور از غلظت (درصد وزنی) در این محلولها، نسبت وزن سیلیکای موجود در محلول، به وزن کل محلول می-باشد. پس از آمادهسازی محلولها، با رسوب گذاری ماسه خالص و ماسه سیلتدار (شامل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سیلت) در سه محلول رقیقسازی شده مذکور، نمونههای مورد آزمایش در دستگاه مقاومت تک محوری، تهیه شدهاند. ارتفاع و قطر نمونهها به ترتیب برابر ۱۰ و ۵ سانتیمتر بوده و نسبت تخلخل نمونهها ۰/۷ الی ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است. برای تنظیم زمان گیرش، مقدار ۰/۱ نرمالیته از کلرید سدیم در محلولها در نظر گرفته شده و با استفاده از اسید کلریدریک، pH آنها در محدوده ۶-۵ تنظیم گردیده است. زمان شروع به گیرش در محلولهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی کلوئید سیلیکا، به ترتیب ۲۴، ۳ و ۱/۵ ساعت بوده و دوره عمل آوری نمونهها نیز (فاصله زمانی گیرش نمونهها و انجام آزمایش) از ۳ تا ۳۰ روز متغیر میباشد. خلاصهای از مشخصات ۳۲ نمونه آماده شده در جدول (۴) ارائه شده است.

همان گونه که اشاره شد، در این تحقیق، از روش رسوب-گذاری و تهنشینی برای ساخت نمونهها استفاده گردیده است. دلیل انتخاب این روش، اطمینان از پر شدن تمام حفرات مابین ذرات خاک از محلول کلوئیدی و پوشش کامل ذرات خاک توسط آن میباشد. برای این منظور، از قالبهای فلزی به ارتفاع ۱۳ سانتیمتر و قطر ۵ سانتیمتر استفاده شده است. قالبها به صورت طولی، دو تکه بوده و توسط پیچ، به یکدیگر و به یک صفحه فلزى زيرين وصل مىشوند. براى أببندى كامل نمونهها، قبل از اتصال قطعات هر قالب، مابین صفحه فلزی و قالب، یک ورق نرم پلاستیکی قرار داده شده و شیارهای طولی قالب و تمامی سطوح داخلی آن گریسکاری شده است. سپس برای تهیه هر نمونه، مقدار ماسه، سیلت و کلوئید سیلیکای لازم، با توجه به نسبت تخلخل مورد نظر، محاسبه گردیده، یک سوم از محلول كلوئيد داخل قالب ريخته شده و يک سوم از خاک مورد نیاز، توسط قیف، به آرامی در داخل کلوئید، رسوبگذاری شده است. فاصله ریزش (انتهای قیف تا سطح محلول کلوئید) ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده و در صورت لزوم، برای رسوب

مناسبتر خاک، بر اطراف قالب ضرباتی آرام وارد گردیده است. پس از دو مرتبه تکرار مرحله فوق، خاک و کلوئید مورد نظر تا ارتفاع ۱۰ سانتیمتری جای گیری شدهاند.

جدول ۴- مشخصات نمونههای آزمایش مقاومت تک محوری

	درصد وزنی	كلوئيدسيليكا	زمان گیرش	دوره عمل-
نام نمونه	سيلت(./)	(wt%)	(ساعت)	آوری (روز)
SC5T7	-	۵	74	۷
SM10C5T7	۱.	۵	74	٧
SM20C5T7	۲.	۵	74	٧
SM30C5T7	٣٠	۵	74	٧
SC5T30	-	۵	74	٣٠
SM10C5T30	١.	۵	74	٣٠
SM20C5T30	۲۰	۵	74	٣٠
SM30C5T30	٣٠	۵	74	٣٠
SC10T3	-	۱.	٣	٣
SM10C10T3	١٠	۱.	٣	٣
SM20C10T3	۲.	١.	٣	٣
SM30C10T3	۳.	١.	٣	٣
SC10T7	-	١٠	٣	٧
SM10C10T7	١.	۱.	٣	٧
SM20C10T7	۲۰	۱.	٣	٧
SM30C10T7	۳.	١.	٣	٧
SC10T30	-	۱.	٣	٣٠
SM10C10T30	۱.	۱.	٣	٣٠
SM20C10T30	۲۰	۱.	٣	٣٠
SM30C10T30	٣٠	۱.	٣	٣٠
SC15T3	-	۱۵	۱/۵	٣
SM10C15T3	۱.	۱۵	۱/۵	٣
SM20C15T3	۲.	۱۵	۱/۵	٣
SM30C15T3	۳.	۱۵	۱/۵	٣
SC15T7	-	۱۵	۱/۵	٧
SM10C15T7	۱.	۱۵	١/۵	۷
SM20C15T7	۲.	۱۵	١/۵	٧
SM30C15T7	۳.	۱۵	١/۵	Y
SC15T30	_	۱۵	١/۵	۳.
SM10C15T30	۱.	۱۵	١/۵	٣.
SM20C15T30	۲.	۱۵	١/۵	٣٠
SM30C15T30	۳.	۱۵	١/۵	۳.

در نهایت برای دستیابی به نمونهای یکدست و یکنواخت، سرباری ۱۰۰ گرمی در بالای نمونه قرار داده شده است.

پس از گیرش کامل، نمونهها به آرامی از داخل قالبها خارج شده و داخل پوشش نایلونی قرار گرفته و تا پایان دوره عمل آوری مورد نظر، در دمای اتاق (۲۲ درجه سانتی گراد) نگهداری شده-اند. سپس بالا و پایین نمونهها توسط کاردک صاف شده، ابعاد دقیق نمونه اندازه گیری شده و نمونهها تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتهاند. آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری بر اساس استاندارد ASTM D2166 انجام شده است.

SEM) میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی ^۱ (SEM) نامیده میشود نوعی از میکروسکوپهای الکترونی است که قابلیت تصویربرداری از نمونههای کوچک تر از ۱۰ نانومتر را دارا میباشد.

در تحقیق حاضر، از میکروسکوپ الکترونی آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز که از نوع SEM-TESCAN MIRA3-FEG و ساخت شرکت TESCAN کشور چک میباشد، استفاده گردیده است و نمونههایی از ماسه خالص، اجزا کریستالی ژل خشک شده کلوئید سیلیکای %۱۵ در دمای اتاق و ماسه سیلتی تثبیت شده با کلوئید سیلیکای %۱۵ Wt در دمای اتاق و ماسه سیلتی شده-اند. از آنجایی که نمونهها بایستی به صورت کاملاً خشک، در میکروسکوپ الکترونی قرار می گرفتند، تمامی آنها به جز ژل خشک شده، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸ درجه سانتیگراد آون قرار گرفتهاند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

حداکثر مقاومت فشاری نمونهها و تأثیر پارامترهای مورد نظر بر آنها، در نمودارهای شکلهای (۴) تا (۱۱) ارائه شده است. این پارامترها شامل M: درصد سیلت (در مخلوط ماسه- سیلت)، C: غلظت محلول کلوئید سیلیکا (ماده تثبیت کننده) و T: طول دوره عمل آوری نمونهها میباشد. علامت S نیز نشانه ماسه است.

در نمودارهای مذکور ملاحظه می گردد که تمامی نمونهها مقاومت فشاری قابل توجهی را کسب کردهاند. کمترین مقاومت (۲۵ kPa)، مربوط به نمونه تثبیتی ماسه خالص با محلول کلوئید سیلیکای %wt ۵ در دوره عمل آوری ۲ روزه و بیشترین مقاومت

1- Scanning Electron Microscope

(۲۴۰ kPa)، مربوط به نمونه تثبیتی ماسه ۱۰٪ سیلتدار با محلول کلوئید سیلیکای %۱۲ ۱۵ در دوره عمل آوری ۳۰ روزه میباشد. ماسه و سیلت مورد استفاده در این تحقیق، در حالت طبیعی (قبل از عمل تثبیت) فاقد هرگونه چسبندگی بوده و ساختار ریزشی دارند. لذا امکان تهیه نمونه و اعمال نیروی فشاری بر آنها در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (محدود نشده) مقدور نمیباشد. به عبارت دیگر، میتوان ماسه و سیلت طبیعی را به سبب ریزشی بودن، فاقد مقاومت فشاری (محدود نشده) در آزمایش تک محوری محسوب کرد. با توجه به این نکته و ملاحظه مقاومت فشاری تک محوری (محدود نشده) نمونههای تثبیت شده، قابلیت کلوئید سیلیکا جهت ایجاد چسبندگی و اصلاح دامنه وسیعی از ماسهها و مخلوطهای ماسه-سیلتی مشخص میگردد.



شکل ۴- تغییرات مقاومت فشاری نسبت به درصد سیلت؛ غلظت کلوئید: %wt ۵- دوره عمل آوری: ۷ و ۳۰ روز



شکل ۵- تغییرات مقاومت فشاری نسبت به درصد سیلت؛ غلظت کلوئید: %tw ۱۰ - دوره عمل آوری: ۳، ۷ و ۳۰ روز



شکل ۶- تغییرات مقاومت فشاری نسبت به درصد سیلت؛ غلظت کلوئید: %th 10- دوره عمل آوری: ۳، ۷ و ۳۰ روز







شکل ۸- تغییرات مقاومت فشاری نسبت به غلظت کلوئید در دوره عمل آوری ۳۰ روز (S: ماسه- M: درصد سیلت)

در شکلهای (۴) تا (۶) تأثیر افزایش سیلت بر تغییرات مقاومت فشاری نمونهها، قابل مشاهده است. همانگونه که

ملاحظه می گردد، در تمامی شرایط، که شامل غلظتهای مختلف کلوئید و دورههای متفاوت عمل آوری می باشد، افزایش سیلت از صفر تا ۱۰ درصد منجر به افزایش بیش از دو برابری مقاومت نمونهها شده است. با افزایش بیشتر سیلت، تغییر مقاومت نمونهها سير نزولي يافته ولى با اين حال نيز، مقاومت نمونههای دارای ۲۰ و ۳۰ درصد سیلت، از مقاومت نمونههای ماسه خالص (بدون سیلت) بیشتر است. در حقیقت، حفرات نمونههای ماسهای خالص، فقط با کلوئید سیلیکا پر شده ولی با افزودن سیلت به ماتریس ماسه، حفرات ماسه با مخلوطی از سیلت و کلوئید جایگزین شده و این امر سختی درون حفرهای ذرات ماسه و به تبع آن، مقاومت نمونههای ماسه-سیلتی را افزایش داده است. با افزایش بیشتر از ۱۰ درصد سیلت، ذرات سیلت، علاوه بر پر کردن حفرات ماسه، بین ذرات آن فاصله ايجاد كردهاند و اين موضوع سبب سستي ماتريس نمونهها و سير نزولی مقاومت فشاری در حد فاصل نمونههای ۱۰ درصد و ۳۰ درصد سیلتی شده است.

تأثیر غلظت محلول کلوئید سیلیکا بر مقاومت نمونهها، در شکلهای (۷) و (۸) ارائه شده است. ملاحظه میشود که در هر دو دوره عمل آوری ۷ و ۳۰ روزه، افزایش غلظت محلول کلوئید سیلیکا از ۵ تا ۱۵ درصد وزنی، منجر به افزایش مقاومت هر چهار نوع خاک مورد آزمایش، یعنی ماسه خالص و ماسه مخلوط با کرد، ۰۲ و ۳۰٪ سیلت، شده است. همان گونه که ملاحظه می-گردد، در تمامی سریها، رابطه افزایش مقاومت با افزایش کلوئید سیلیکا، یک رابطه خطی است.

در شکلهای (۹) تا (۱۱)، تأثیر طول دوره عمل آوری بر مقاومت نمونهها بررسی شده است. در نمودار شکل (۹)، غلظت کلوئید در نمونهها، ۵٪ بوده و دوره عمل آوری ۷ و ۳۰ روزه می-باشد، در نمودارهای شکل (۱۰) و (۱۱) نیز، غلظت کلوئید به ترتیب ۱۰٪ و ۱۵٪ بوده و دوره عمل آوری در هر دو نمودار، ۳، ۷ و ۳۰ روزه است. ملاحظه می گردد که با در نظر گرفتن غلظت نابت، افزایش طول دوره عمل آوری، سبب افزایش مقاومت تمامی نمونههای مورد آزمایش (ماسه خالص و ماسه مخلوط با ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ سیلت) شده است. در تمامی سریها، رابطه بین افزایش مقاومت با افزایش طول مدت عمل آوری، رابطه ای خطی است ولی با مقایسه روند نمودارهای شکلهای (۹) تا (۱۱)، مشاهده می شود که شدت تأثیر دوره عمل آوری برمقاومت نمونه متفاوت می باشد. در واقع، با توجه به این که زمان شروع گیرش محلول کلوئید سیلیکا برای غلظتهای ۵۵ رو ۱۵٪ به ترتیب ۲۴، ۳۰

۱/۵ ساعت در نظر گرفته شده است، دوره کسب مقاومت آنها نیز متفاوت بوده است. به عبارتی دیگر با کاهش زمان گیرش کلوئید، نمونهها، درصد بالایی از مقاومت نهایی خود را، سریعتر کسب کردهاند و از اینرو، افزایش طول مدت عمل آوری، تأثیر کمتری در افزایش مقاومت آنها داشته است.

علاوه بر نتایج و بررسیهای فوق در مورد آزمایشهای تک محوری نمونهها، بایستی به این نکته اشاره کرد که گسیختگی نمونهها در این آزمایش، با ایجاد ترکهای ریز عمودی از قسمت فوقانی (سستتر) نمونهها شروع و با گسترش مورب آنها در کل نمونه ادامه مییابد. افزایش غلظت کلوئید نیز منجر به گسیختگی تردتر نمونهها میشود.

در شکل (۱۲) تصویر یک نمونه ماسهای (تثبیت شده با ۱۰ wt% کلوئید) قبل از انجام آزمایش تکمحوری و یک نمونه ماسه سیلتی با ۲۰٪ سیلت (تثبیت شده با ۱۰ wt% کلوئید) بعد از انجام آزمایش و رسیدن به گسیختگی، نشان داده شده است.



شکل ۹- تغییرات مقاومت فشاری نسبت مدت زمان عمل آوری؛ غلظت کلوئید: ۵/۵wt (S: ماسه – M: درصد سیلت)



شکل ۱۰– تغییرات مقاومت فشاری نسبت مدت زمان عمل آوری؛ غلظت کلوئید: %۱۰ wt (S: ماسه – M: درصد سیلت)



شکل ۱۱– تغییرات مقاومت فشاری نسبت مدت زمان عمل آوری؛ غلظت کلوئید: %۱۵ wt (S: ماسه – M: درصد سیلت)



شکل ۱۲- تصویر سمت راست: یک نمونه ماسهای تثبیت شده با %wt ۱۰ wt کلوئید سیلیکا قبل از انجام آزمایش تک محوری؛ تصویر سمت چپ: یک نمونه ماسه سیلتی با ۲۰٪ سیلت و تثبیت شده با %۱۰ wt کلوئید بعد از انجام آزمایش ورسیدن به گسیختگی

لازم به ذکر است صحت نتایج آزمایش مقاومت فشاری، با تکرار ساخت نمونهها و انجام مجدد آزمایشها و همچنین تطابق مناسب بین نتایج حاصله این تحقیق با دیگر پژوهشهای انجام شده [۱۲، ۱۶] در مورد ماسههای تثبیت شده با کلوئید سیلیکا، محرز شده است.

۲-۴- نتایج آنالیز SEM

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکلهای (۱۳) تا (۲۴) ارائه شده است. در این تصاویر، تفاوت شکل و مورفولوژی ذرات تثبیت نشده و تثبیت شده خاک قابل مشاهده میباشد.

شکل (۱۳) اجزا کریستالی ژل خشک شده کلوئید سیلیکا (۱۵ wtw) و شکل (۱۶) سطح یکی از این اجزا را با بزرگنمایی

بسیار بالا نشان میدهد. برای تهیه این اجزا، ابتدا محلول کلوئید سیلیکا با غلظت %۲ ۱۵ در داخل یک ظرف مسطح به ضخامت چند میلیمتر ریخته شده و پس از گیرش محلول، ژل حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفته است. اجزا فلسی شکل و تیز گوشه کریستالی SiO₂ با ساختار آمورف حین خشک شدن و انقباض ژل، در اندازههای متفاوت حاصل شدهاند. همان-گونه که در شکل (۱۶) ملاحظه می گردد، سطح این اجزا نسبتاً صاف و یکنواخت می باشد. در شکل (۱۴) ذرات ماسه و در شکل (۱۵) مخلوطی از ذرات ماسه و سیلت در حالت طبیعی (تثبیت نشده) نشان داده شده است. در مقابل، شکل (۱۷) ذرات ماسه ماسه سیلت دار تثبیت شده با همان غلظت کلوئید را نشان می-دهد. با مقایسه دو شکل (۱۴) و (۱۷) تغییر سطح ذرات ماسه پس از تثبیت کاملاً مشخص می گردد.



شکل ۱۳- اجزا ژل خشک شده کلوئید سیلیکای %۱۵ wt



شکل ۱۴ – ذرات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در حالت طبیعی



شکل ۱۵- مخلوط ماسه و سیلت فیروزکوه در حالت طبیعی



شکل ۱۶- سطح اجزا ژل خشک شده کلوئید سیلیکای %۱۵ wt



شکل ۱۷- ذرات تثبیت شده ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با کلوئید سیلیکای %۱۵ wt



شکل ۱۸– ذرات تثبیت شده ماسه سیلت دار با کلوئید سیلیکای %۱۵ wt



شکل ۱۹- ماسه فیروزکوه با بزرگنمایی ۶۰۰ برابر



شکل ۲۰- ماسه فیروزکوه با بزرگنمایی ۲/۶۲ هزار برابر



شکل ۲۱- ماسه فیروزکوه با بزرگنمایی ۷۰ هزار برابر



شکل ۲۲- ماسه تثبیت شده با کلوئید سیلیکای %۱۵ wt بزرگنمایی ۶۰۰ برابر



شکل ۲۳- ماسه تثبیت شده با کلوئید سیلیکای %۱۵ wt بزرگنمایی ۲/۵ هزار برابر



شکل ۲۴ – ماسه تثبیت شده با کلوئید سیلیکای %۱۵ wt بزرگنمایی ۷۰ هزار برابر

در شکل (۱۷) دورگیری و چسبیدن کلوئید سیلیکا به ذرات ماسه، قابل ملاحظه است. مقایسه دو شکل (۱۵) و (۱۸) نیز تغییر شکل سطوح ذرات را پس از تثبیت نمایان میکند، علاوه بر این، در شکل (۱۸) ملاحظه می گردد ذرات ریز سیلت در اثر تثبیت توسط کلوئید سیلیکا به یکدیگر پیوسته و اجزا درشت تری تشکیل دادهاند به طوری که حتی پس از خشک شدن نمونه نیز، از ذرات طبیعی سیلت بزرگ تر می باشند. در واقع کلوئید سیلیکا در حین گیرش و تثبیت نمونه ها، کلیه اجزا خاک را بهم چسبانده و بافت یکدستی از خاک ایجاد میکند ولی برای تصویر رداری، جز کوچکی از نمونه، خشک شده و سپس از ذرات آن، در MES استفاده گردیده است.

برای بررسی بیشتر سطوح، در شکلهای (۱۹) تا (۲۱) یک جز از ماسه تثبیت نشده و در شکلهای (۲۲) تا (۲۴) جزئی از ماسه تثبیت شده با بزرگنماییهای متفاوت نشان داده شده است. کانی اصلی ماسه فیروزکوه، کانی بلوری کوارتز است. از شکل (۱۴) و (۱۹) تیز گوشگی اجزا این ماسه به علت تولید آن به روش مکانیکی (خرد و آسیاب شدن) مشهود می باشد. با این که فرورفتگی و برجستگی در سطوح ماسه بسیار اندک می باشد ولی در رئوس و لبههای آن، شکستهای کوچک صدفی شکل و ساییدگی دیده می شود که بافت مکانیکی آن را آشکارتر می-نماید.

از شکلهای (۲۰) و (۲۱) ملاحظه می گردد که در سطح ماسه فیروزکوه در حالت عادی، صفحات بسیار ریزی وجود دارد که به آن چسبیدهاند. در مقابل، شکلهای (۲۳) و (۲۲) نیز نشان میدهند که سطح ماسه تثبیت شده را تودههای ماده تثبیت کننده فرا گرفتهاند، ملاحظه می گردد این تودهها از تعداد

زیادی لایه تشکیل یافته است. تودههای لایه ای موجب ایجاد فرو رفتگی و برجستگیهای بسیار زیادی در سطح ذره ماسهای شدهاند. این ناهمواریها موجب سختی بیشتر ذرات و افزایش اصطکاک بین آنها و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری و برشی آنها می گردد.

در شکل (۲۴) تصویر سطح ذره تثبیت شده ماسه، با بزرگ-نمایی بسیار زیاد، ملاحظه می گردد. مقایسه این تصویر با شکل-های (۱۶) و (۲۱) نشان میدهد که سطح ذره تثبیت شده، کاملاً متفاوت از سطح ماسه عادی بوده و از لایههایی تشکیل یافته که ساختارشان مشابه اجزای ژل خشک شده کلوئید میباشد.

۵- نتیجهگیری

نتايج تحقيق حاضر نشان ميدهند كه:

کلوئید سیلیکا ماده مناسبی برای تثبیت ماسهها و ماسههای سیلتدار با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد سیلت میباشد.

ماسهها و سیلتهای طبیعی (بدون تثبیت)، به علت وجود ساختار ریزشی، در روند آزمایش تعیین مقاومت تکمحوری، فاقد مقاومت محسوب میشوند. ولی مقاومت فشاری تک محوری نمونههای متفاوت تثبیت شده آنها با محلولهای کلوئید سیلیکای ۵، ۱۰و %۲۲ ۱۵، در یک دوره زمانی ۳۰– ۳ روزه ۲۵ تا ۲۴۰ کیلوپاسکال است.

در تمامی شرایط متفاوت تثبیت، بین افزایش مقاومت فشاری نمونهها با افزایش غلظت کلوئید سیلیکا و افزایش طول مدت عمل آوری، رابطهای خطی برقرار است. هرچند، با کاهش زمان گیرش کلوئید، از شدت تأثیر زمان عمل آوری، کاسته می-شود. از طرفی دیگر ملاحظه میشود که در شرایط یکسان تثبیت، بیشترین مقاومت، متعلق به نمونههای ماسه سیلتی با ۱۰ درصد سیلت میباشد.

روش رسوب گذاری، روشی مناسب برای تهیه نمونههای تثبیت شده ماسه و سیلت توسط کلوئید سیلیکا میباشد. البته در طول دوره گیرش نمونه، استفاده از سرباری معادل یک چهارم وزن نهایی آن، منجر به یکنواختی بیشتر و یکدست شدن نمونه می شود.

اگرچه با افزایش غلظت کلوئید، مقاومت فشاری نمونهها به طور قابل توجهی افزایش مییابد، ولی غلظت ۵ درصد وزنی محلول کلوئید سیلیکا برای تثبیت نمونهها، مناسب به نظر می-رسد.

- [10] Pamuk, A., Gallagher, P. M., Zimmie, T. F., "Remediation of Piled Foundations against Lateral Spreading by Passive Site Stabilization Technique", Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2007, 27 (9), 864-874.
- [11] Moridis, G. J., Apps, J., Persoff, P., Myer, L., Muller, S., Yen, P., Pruess, K., "A Field Test of a Waste Containment Technology using a New Generation of Injectable Barrier Liquids", Spectrum 96, Seattle, WA, 1996.
- [12] Noll, M. R., Bartlett, C., Dochat, T. M., "In Situ Permeability Reduction and Chemical Fixation using Colloidal Silica", 6th National Outdoor Action Conference, Las Vegas, NV, US, 1992, pp 443-457.
- [13] Gallagher, P. M., Conlee, C. T., Kyle, M., "Full Scale Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation of Liquefaction Risk", Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (2), 186-196.
- [14] Hamderi, M., Gallagher, P. M., Lin, Y., "Numerical Model for Colloidal Silica Injected column Tests", Vadose Zone Journal, 2014, 13 (2), 138-143.
- [15] Hamderi, M., Gallagher, P. M., "An Optimization Study on the Delivery Distance of Colloidal Silica", Scientific Reserch and Essays, 2013, 8 (27), 1314-1323.
- [16] Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., Whang, J. M., "Effect of Dilution and Contaminants on Sand Grouted with Colloidal Silica", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125 (6), 461-469.
- [17] Gallagher, P. M., Mitchell, J. K., "Influence of Colloidal Silica Grout on Liquefaction Potential and Cyclic Undrained Behavior of Loose Sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22, 1017-1026.
- [18] Towhata, I., Kabashima, Y., "Mitigation of Seismically-Induced Deformation of Loose Sandy Foundation by Uniform Permeation Grouting", 15th International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Turkey, 25 August, 2001, pp 313-318.
- [19] Diaz-Rodriguez, J. A., Antonio-Izarras, V. M., Bandini, P., Lopez-Molina, J. A., "Cyclic Strength of Natural Liquefiable Sand Stabilized with Colloidal Silica Grout", Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45 (10), 1345-1355.
- [20] Liao, H. J., Huang, C. C., Chao, B. S., "Liquefaction Resistance of a Colloidal Silica Grouted Sand", Grouting and Grout and Deep Mixing Third International Conference, New Orleans, US, 2003, pp 1305-1313.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تغییر شکل و تغییر سطوح ذرات تثبیت شده را به وضوح آشکار میسازد. به طوری که مشخص می گردد سطح ذرات تثبیت شده دارای تودههای لایهای از کلوئید سیلیکا می باشد.

با توجه به نتایج فوق و با نظر به ویسکوزیته بسیار کم و زمان گیرش قابل کنترل محلولهای نانو کلوئید سیلیکا، به نظر میرسد استفاده از آنها برای ایجاد جریان در رسوبات سست ماسه-سیلتی و تثبیت آنها، مناسب باشد.

۶- مراجع

- [1] Gallagher, P. M., "Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk", PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, US, 2000.
- [2] Iler, R. K., "The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization Colloid and Surface Properties, and Biochemist Try", Wiley, New York, 1979.
- [3] Whang, J. M., "Chemical Based Barrier Materials", In Assessment of Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications, Rumer R. R., Mitchel J. K., Editors, Section 9, Springfield, VA: National Technical Information Service, US, 1995.
- [4] Yonekura, R., Miwa, M., "Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout", 11th Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore, 4-8 May, 1993, pp 439-444.
- [5] Gallagher, P. M., Koch, A. J., "Model Testing of Passive Site Stabilization: A New Technique", 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment, US, 10-12 February, 2003, pp 1478-1489.
- [6] Gallagher, P. M., Finstere, S., "Physical and Numerical Model of Colloidal Silica Injection for Passive Site Stabilization", Vadose Zone Journal, 2004, 3 (3), 917-925.
- [7] Gallagher, P. M., Lin, Y., "Colloidal Silica Transport through Liquefiable Porous Media", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135 (11), 1702-1712.
- [8] Hamderi, M., "Pilot Scale Modeling of Colloidal Silica Delivery to Liquefiable Sand", PhD Thesis, Drexel University, US, 2010.
- [9] Gallagher, P. M., Pamuk, A., Abdun, T., "Stabilization of Liquefiable Soils using Colloidal Silica", Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 33 (1), 33-40.

- [21] Rodriguez, J. A., Izarras V. M., "Mitigation of Liquefaction Risk Using Colloidal Silica Stabilizer", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, 1-6 August, 2004, pp 509-519.
- [22] Helland, P. E., Huang, P. H., Diffendal, R. F., "SEM Analysis of Quartz Sand Grain Surface Textures Indicates Alluvial/Colluvial Origin of the Quaternary Glacial Boulder Clays at Huangshan (Yellow Mountain), East-Central China", Quaternary Research, 1997, 48 (2), 177-186.

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Effective Strength Parameters and Micro Structural Variations of Silty Sands Stabilized with Nano Colloidal Silica

Gholam Moradi*, Shiva Seyedi

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

Received: 16 June 2015; Accepted: 31 January 2016

Keywords:

Unconfined compressive test, Silty sand, Colloidal silica, Concentration, Curing, SEM analysis

1. Introduction

Saturated deposits of sands and silty sands are liquefiable during earthquakes. One of the new methods proposed for non-disruptive mitigation of liquefaction risk at developed sites is passive site stabilization. It involves slow injection of colloidal silica at the edge of a site and delivery of the stabilizer to the target location using natural groundwater flow [1]. Colloidal silica is an aqueous suspension of microscopic silica (SiO₂) particles produced from saturated solutions of silicic acid [2]. The particles size can range in size from 2 to 100 nm, although the particle size is fairly constant in a given suspension. During manufacturing, colloidal silica solutions are stabilized against gelation so they can have long induction periods during which the viscosity remains fairly low up to a few months. A few studies have investigated the behavior of sands stabilized with colloidal silica. Persoff et al. measured short term strength of about 430 kPa at concentration of 20 wt% colloidal silica [3]. Gallagher and Mitchell found the baseline unconfined compressive strength ranged from 32 to 222 kPa in period of 7-30 days at sands samples treated with 5-20 wt% colloidal silica. They also did a series of cyclic triaxial tests and found that for passive site remediation, a 5 wt% concentration of colloidal silica is expected to be able to adequately mitigate the liquefaction risk of loose sands [4]. The stabilization of loose silty sand with colloidal silica has not been studied comprehensively so the present study was undertaken to investigate the unconfined compressive strength and microstructure analysis of silty sands stabilized with colloidal silica.

2. Methodology

Unconfined compressive tests were performed to investigate the strength and behavior of 32 silty sand samples stabilized with colloidal silica. The samples consisted of Firoozkooh No.161 sand with variation in NP silts content from 0 to 30% and prepared in their loose condition by sedimentation method in colloidal silica at concentration of 5, 10 and 15wt%. The colloidal silica used in testing program was Ludox® SM-30 wt% (suspension in water). According to product information, Ludox® SM-30% has 30 wt% silica and an average particle size of 8 nm. For gel time control, scientific Sodium Chloride (NaCl) and 6N hydrochloric acid (HCl) were used to adjust the ionic strength and pH of the colloidal silica solutions, respectively. Curing time of samples was 3, 7 and 30 days. The unconfined compressive strength tests were run in general accordance with ASTM D2166 standard test method. In addition to unconfined compressive test, the micro structure of a few specimens was investigated by means of a scanning electron microscope (SEM).

3. Results and discussion

3.1. Unconfined compressive test results

Essentially loose silty sands have no unconfined compression strength but when treated, the average UC baseline strength ranged from 25 kPa at a sand sample with colloidal silica concentration of 5wt% (7 days curing time) to 240 kPa at a silty-sand sample with 10% silt and colloidal concentration of 15 wt% (30 days curing time). In the same conditions of stabilization, the increase of silt up to 10% content, increased strength but more silt caused decreasing of strength. It may be in silty-sand samples with 10% silt, the silt filled the voids between sand aggregates and led to increase in strength but at more silt content, the silt placed in structure of sand matrix and made loose bridges between sand aggregates.

3.2. SEM analysis

The obtained images from scanning electron microscope showed the different fabric in treated and untreated specimens. As shownin Fig. 1 (a). the particle surface of a pure dry sand sample, is smooth. In Fig. 1 (b), a grain of the same pure sand stabilized with 15 wt% colloidal silica is shown. In this image the stuck silica on surface of sand grain is remarkable.



Fig. 1. SEM images: (a) Pure sand particle, (b) Stabilized sand particle

4. Conclusions

The compression strength of stabilized silty sands had a linear relationship with both colloidal silica concentration and curing time, although the effect of curing time decreased as colloidal silica concentration increased. On the other hand, in the same conditions of stabilization, the increase of silt up to 10% content, increased strength but more silt caused strength decreasing. SEM analysis showed the different fabric in treated and untreated specimens. On the basis of obtained results colloidal silica is an appropriate stabilizer for loose silty sands. It seems a 5 wt% solution of colloidal silica is adequate to silty sands stabilization.

5. References

- [1] Hamderi, M., Gallagher, P. M., Lin, Y., "Numerical Model for Colloidal Silica Injected Column Tests", Vadose Zone Journal, 2014, 13 (2), 138-143.
- [2] Gallagher, P. M., Pamuk, A., Abdun, T., "Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica", Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 33 (1), 33-40.
- [3] Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., Whang, J. M., "Effect of Dilution and Contaminants on Sand Grouted with Colloidal Silica", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125 (6), 461-469.
- [4] Gallagher, P. M., Mitchell, J. K., "Influence of Colloidal Silica Grout on Liquefaction Potential and Cyclic Undrained Behavior of Loose Sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22, 1017-1026.