

## تأثیر استفاده از انرژی فراصوتی و نانولوله‌ی کربنی بر روی مقاومت برشی خاک‌های مسئله‌دار

علیرضا نگهدار\*، بیژن زارعی

دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

## تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۲ بهمن ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲۳ فروردین ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۲۳ خرداد ۱۳۹۶

## کلمات کلیدی:

خاک سیلتی  
ماسه‌بادی  
نانولوله‌ی کربنی  
تثبیت خاک  
پارامترهای برشی خاک

**چکیده:** خاک‌های مسئله‌دار خصوصیات ژئوتکنیکی نامطلوبی دارند و باید اصلاح یا جایگزین گردند؛ مانند خاک‌های توری، واگرا و خاک‌هایی که در زمان اشباع‌شدگی مقاومتشان کاهش می‌یابد. خاک‌های سیلتی و ماسه‌بادی علاوه بر خصوصیات فیزیکی نامناسب، در زمان اشباع‌شدگی مقاومت پایینی دارند و از این رو در رسته خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرند. تحقیقات نشان داده است که تثبیت این نوع خاک‌های مسئله‌دار با سیمان، نتیجه خوبی را ارائه داده است. در این مطالعه تغییرات مقاومت برشی دو نوع خاک ماسه‌بادی و خاک سیلتی اشباع به وسیله سیمان و مسلح‌کننده‌ی بی‌نظیر با نام نانولوله کربنی با مقاومت مدول الاستیسیته و سختی بسیار بالا (حتی بالاتر از فولاد) و سایر ویژگی‌های منحصر به فرد، بررسی شده است. تحقیقات در مورد استفاده از این ماده در تثبیت شیمیایی خاک کمتر به چشم می‌خورد. نانولوله‌های کربنی همدیگر را به شدت جذب می‌کنند، برای استفاده حداکثر از خصوصیات بی‌نظیر آن‌ها، این مواد باید به وسیله انرژی فراصوتی (عامل مکانیکی) و سورفکتانت (عامل شیمیایی) از هم جدا شوند. از اهداف این تحقیق، بررسی تغییرات انرژی فراصوتی لازم برای جداسازی و همکن‌سازی محلول نانولوله بر مقاومت برشی خاک‌های مورد مطالعه است. از میان انرژی‌های انتخاب شده برای پراکندگی نانو ذرات انرژی ۵۰۰ ژول بر میلی‌لیتر، بهترین نتیجه را ارائه داده است. همچنین مقدار بهینه سورفکتانت مورد استفاده ۱/۵ درصد برای خاک سیلتی و ۱ درصد برای خاک ماسه‌ای به دست می‌آید. با افزودن ۰/۱۲۵ درصد نانولوله کربنی چند جداره (نسبت به وزن سیمان)، مقاومت برشی خاک سیلتی و ماسه‌ای به ترتیب ۱۹/۷ درصد و ۲۱ درصد افزایش داشته است.

## ۱- مقدمه

بسیاری از خاک‌ها به دلیل تورم، رمبندگی، واگرایی، نشست بیش از حد، و کاهش شدید مقاومتشان و انحلال پذیر بودن آن‌ها در آب در مهندسی ژئوتکنیک به‌عنوان خاک مسئله‌دار به حساب می‌آیند. چنین ویژگی ممکن است مربوط به ترکیب خاک، طبیعت منافذ، نوع کانی و یا بافتشان باشد [۱]. خاک‌های با مقادیر زیاد سیلت، اغلب مقاومت کمی را دارا هستند و ظرفیت باربری آن‌ها بسیار پایین است. سیلت، ریزدانه‌های غیر پلاستیک تلقی می‌شوند. این خاک‌ها به طور ذاتی در مواجهه با آب غیر پایدار هستند و تمایل دارند تا در زمان اشباع شدن روان شوند. همچنین این خاک‌ها تقریباً غیرقابل نفوذ هستند و تراکم این خاک‌ها مشکل است و در برابر یخ‌زدگی و بالا زدگی زمین خلی حساس هستند [۲]. از طرف دیگر یکی از مشکلات عمده خاک‌های ماسه‌بادی علاوه بر مورد ذکر شده، مقاومت کم آن‌ها تحت شرایط رطوبت طبیعی اشباع است [۳]. روش‌هایی که به طور وسیع جهت بهبود خاک‌های مسئله‌دار در کشورهای گرمسیر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد، تثبیت خاک با استفاده از مواد افزودنی سیمانی مرسوم مانند سیمان و آهک و خاکستر بادی است [۴].

## ۲- تاریخچه

سیمان می‌تواند در محدوده وسیعی از خاک‌ها مورد استفاده قرار گیرد. بهترین نتیجه در مورد خاک‌های سیلتی مشاهده شده است [۵]. با مطالعه‌ی تحقیقات اخیر می‌توان مشاهده کرد که استفاده از انواع مواد افزودنی ثانویه در تثبیت سیمانی خاک‌ها در دستور کار محققان قرار گرفته است در این میان استفاده از انواع مختلف نانو مواد به عنوان مسلح‌کننده<sup>۲</sup> در تثبیت سیمانی، به دلیل نوآوری و قابلیت‌های ویژه طرفداران خاص خود را دارد. از جمله‌ی این تحقیقات می‌توان به استفاده از نانوسیلیس<sup>۳</sup> [۵، ۶] و نانولوله‌های کربنی<sup>۴</sup> [۷، ۸] اشاره کرد.

در طول دهه‌های اخیر، نانو فناوری و استفاده از علم نانو به سرعت پیشرفت داشته است که منجر به اکتشاف نانو مواد مختلفی شده است. از جمله این مواد، نانولوله‌های کربنی را می‌توان نام برد [۹]. در سال ۱۹۹۱ ایجیما<sup>۵</sup> ویژگی‌های خاص و منحصر به فردی همانند مقاومت بالا (تا میزان ۳۷ گیگا پاسکال) و مدول بالای کششی (تا ۱ ترا پاسکال)، چگالی پایین (در حد ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و سطح ویژه‌ی بالا (تقریباً ۳۰۰ مترمربع بر کیلوگرم) را ارائه کرده است [۱۰].

- 2 Reinforcement
- 3 Nano-silica
- 4 Carbon nanotube (CNT)
- 5 Ijima

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: negahdar@uma.ac.ir

ذرات نانولوله‌ها را شاهد بوده‌اند [۱۰]. از این رو استفاده از انرژی فراصوتی باید به حداقل برسد و در این راستا استفاده از مواد سورفکتانتی تا حد زیادی به کاهش این انرژی کمک خواهد کرد [۷، ۱۹].

از طرف دیگر تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که با استفاده‌ی بیش از حد سورفکتانت‌ها مشکلاتی به وجود می‌آید. در صورت استفاده خیلی بیشتر از این ماده، سورفکتانت‌هایی که به همراه پروسه‌ی فراصوتی استفاده می‌شوند به عنوان عامل هوازا (Air Entraining Agent) عمل می‌کنند و از این رو باعث کاهش در مقاومت کامپوزیت‌های سیمانی می‌شوند [۱۲]. بعلاوه تحقیقات دیگر نشان می‌دهد که بدون استفاده از سورفکتانت، حتی با استفاده از انرژی فراصوتی نانولوله‌ها به‌صورت آگلومره شده باقی می‌مانند که از خاصیت فوق‌العاده‌ی نانولوله‌ها می‌کاهد [۷].

خاک با سیمان به روش‌های مختلف (اختلاط سطحی یا اختلاط عمیق که به دو دسته‌ی اختلاط تر و اختلاط خشک تقسیم می‌شود) و با هدف تثبیت اختلاط داده می‌شوند. سیمان می‌تواند به‌منظور افزایش خواص مقاومتی خاک از جمله مقاومت برشی، مدول الاستیسیته یا کنترل نشست خاک اختلاط یابد. از طرف دیگر، به دلایل قابل استفاده نبودن نانولوله‌ها به صورت خشک، آگلومراسیون شدید بین ذرات این مواد باهم باید داخل محلول همگن گردند، به همین جهت از روش اختلاط تر برای اختلاط خاک با سیمان استفاده شده است.

#### ۴- مواد و روش‌ها

##### ۴-۱- خاک‌ها:

در این مطالعه از دو نوع خاک متفاوت استفاده شده است. ماسه‌بادی از منطقه صوفیان آذربایجان شرقی تهیه شده و خاک سیلتی از شهرک کوثر اطراف دریاچه شورابیل، واقع در جنوب شهر اردبیل به‌دست‌آمده است. برای این منظور پس از گذر از خاک‌های نباتی، خاک مورد استفاده برای کلیه‌ی آزمایشات از اعماق مختلف برداشته شده است. برای دانه‌بندی دو نوع خاک از روش شستشو بر روی الک ۲۰۰ به کمک استاندارد ASTM D422 انجام شده و برای خاک سیلتی علاوه بر دانه‌بندی به‌وسیله الک (بر روی درشت‌دانه‌ها)، بر روی ریزدانه‌های رد شده از الک نمره ۲۰۰ (۰/۷۵ mm) آزمایش هیدرومتری نیز انجام شده است. در قسمت تعیین دانه‌بندی خاک استفاده از روش شستشو بر روی الک باعث می‌شود ریزدانه‌ها به‌صورت کامل از درشت‌دانه‌ها جدا می‌شوند و محدوده دانه‌بندی دقیق‌تری را شاهد خواهیم بود. نتایج این آزمایش و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ آمده است. حد روانی و حد خمیری خاک سیلتی با استفاده از استاندارد ASTM D4318، وزن مخصوص خاک سیلتی و ماسه‌بادی با استفاده از استاندارد ASTM D854 و طبقه‌بندی هر دو خاک با استفاده از استاندارد ASTM D2487 تعیین شده است. خاک سیلتی مورد استفاده بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید با طبقه‌بندی ML یا "سیلت با پلاستیسیته‌ی پایین" و ماسه‌بادی

تحقیقات زیادی در مورد به‌کارگیری نانولوله‌های کربنی در مواد مختلفی از جمله سرامیک [۱۱]، کامپوزیت‌های سیمانی [۱۲]، خمیر سیمان [۱۳] و بتن صورت گرفته است. استفاده از این نوع ماده برای تثبیت سیمانی خاک‌ها به ندرت و در حد دو کار مورد توجه بوده است که در این مطالعات تنها به مقاومت تک محوره نمونه‌ها بسنده شده است [۷، ۸].

#### ۳- الگوسازی تجربی

نانولوله‌های کربنی دارای سطح ویژه‌ی بسیار بالا می‌باشند، علاوه بر آن به دلیل وجود نیروی واندروالسی<sup>۱</sup> شدید بین آن‌ها، باعث جذب شدید همدیگر شده و در عمل نانولوله‌ها تمایل به تبدیل به جمع شدن به‌صورت گروهی<sup>۲</sup> را دارند. برای بهبود پراکندگی نانولوله‌ها و جدا کردن آن‌ها از همدیگر، بیشتر محققان از اعمال انرژی فراصوتی<sup>۳</sup> به همراه یک سورفکتانت<sup>۴</sup> قابل حل در آب برای به کار بردن نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های سیمانی استفاده کرده‌اند [۶، ۷، ۱۱، ۱۲، ۱۴-۱۸]. سورفکتانت‌ها پلیمرهایی هستند که بر روی سطح (یا فضای میانی) نانولوله‌های کربنی انباشته می‌شوند و به صورت شیمیایی به پراکنده‌سازی آن‌ها در محلول تر و اشباع کمک می‌کنند. برای بسیاری از مقاصد جهت استفاده‌ی ذرات در کاربردهای صنعتی، تهیه‌ی محلولی با پایداری بالا و تهیه‌ی یک محلول با پراکندگی یکنواخت بسیار مهم است. این نیاز مخصوصاً زمانی که ذرات در حد میکرون یا نانومتر باشد بیشتر احساس می‌شود. مهم‌تر از همه، کشف نانولوله‌های کربنی فرصت بسیار مناسبی را برای ارتقای مواد به مواد نوینی که دارای مقاومت بسیار بالایی است، ایجاد کرده است. جلوگیری از تجمع ذرات یا آگلومره شدن<sup>۵</sup> نانولوله‌ها و پراکنده کردن یکنواخت آن از مهم‌ترین تلاش‌هایی است که به تولید مواد با مقاومت بالا کمک می‌کند [۱۷].

خصوصیات بی‌نظیر نانولوله‌های کربنی توجه زیادی را برای استفاده از آن برای منظورهای متفاوت (افزایش مقاومت میکرو ترک‌های بتن، افزایش مقاومت تک‌محوره خاک، بهبود خصوصیات الکترومغناطیسی و...) در کامپوزیت‌های سیمانی به خود معطوف کرده است. تمایل نانولوله‌های کربنی به آگلومره شدن به علت نیروی واندروالسی شدید است که در نتیجه‌ی آن سودمندی خواص نانولوله‌ها از بین می‌رود و بنابراین چالش بزرگ در این زمینه غلبه بر آگلومراسیون ذرات است. برای این منظور، استفاده از انرژی فراصوتی به منظور پراکنده‌سازی آن‌ها در محلول و استفاده از مواد سورفکتانتی مرسوم است [۷، ۱۷]. همچنین مشاهده شده است که انرژی فراصوتی بالا، تورق<sup>۶</sup> نانولوله‌هایی که در آن‌ها آگلومره شدن ذرات شدید بوده را باعث گردیده و همچنین در این حالت، محققان پدیده کوتاه‌شدگی

- 1 Van der Waals
- 2 Bundle
- 3 Ultrasonic Energy
- 4 Surfactant
- 5 Agglomeration
- 6 Exfoliation

7 Shortening

مصالح تثبیت شده با توجه به آزمایشات تر و خشک متوالی نمونه، ذوب و انجماد نمونه خاک تثبیت شده و سپس انجام آزمایش تک محوری بر روی این نمونه‌ها تعیین شده است که از این پارامتر به صورت نسبت وزنی سیمان به وزن خشک خاک بیان می‌گردد.

میزان سیمان متعارف مورد نیاز برای تثبیت انواع خاک‌ها در مرجع [۲۰] آمده است.

#### جدول ۲: خصوصیات شیمیایی سیمان مصرفی

Table 1. Chemical properties of used cement

مقدار (درصد)	عنصر شیمیایی
۲۱/۵	SiO <sub>2</sub>
۵	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۶۴	CaO
۱/۵	MgO
۰/۷۵	K <sub>2</sub> O
۰/۳	Na <sub>2</sub> O
۱/۸	SO <sub>3</sub>
۲/۱۵	LOSS

#### ۳-۴- نانولوله

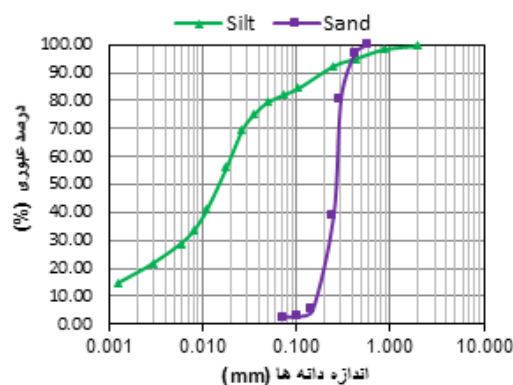
در کلیه آزمایشات از نانولوله‌ی کربنی چند جداره با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ و جدول ۴ (مطابق کاتالوگ ضمیمه‌ی محصول) استفاده شده است. بسته‌ی ۵ گرمی نانولوله از شرکت پیشگامان نانو ثانی خریداری شده است که طبق اطلاعات شرکت نانولوله‌ی مورد استفاده با نام تجاری US4303 محصول شرکت US-Researches آمریکا می‌باشد. برای بررسی تأثیر انرژی فراصوتی بر روی پراکندگی نانولوله‌های کربنی، نانولوله‌ی مصرفی مطابق جدول ۵ برای آزمایشات به مقدار ۰/۳ گرم به ازای ۲۴۰ گرم سیمان (برای تثبیت سیلت + ماسه) استفاده شده است. برای بررسی تأثیر مقدار سورفکتانت بر روی مقاومت برشی خاک‌ها نیز از درصد مختلف فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی استفاده شده است. بعد از تعیین مناسب‌ترین انرژی فراصوتی و درصد مناسب فوق روان کننده، برای بررسی مقاومت برشی خاک تثبیت شده با سیمان و مسلح شده با نانولوله، نانولوله کربنی به مقدار ۰/۱۵ گرم به ازای ۲۴۰ گرم سیمان استفاده شد و نیز نمونه‌هایی فاقد نانو لوله ساخته شده و مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفت تا به این صورت تأثیر مقدار نانولوله کربنی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. بعد از تعیین انرژی فراصوتی مناسب و مناسب‌ترین مقدار فوق روان کننده سری جدیدی

با ضرایب خمیدگی و دانه‌بندی  $C_u = 1/661$  و  $C_c = 1/078$  با عنوان SP یا "ماسه با دانه‌بندی بد" دسته بندی شده است. اندازه گیری اولیه‌ی مشخصات خاک و دیگر پارامترهای مطالعه شده را می‌توان در جدول ۱ مشاهده کرد.

#### جدول ۱: برخی خصوصیات خاک‌های مورد استفاده در آزمایشات

Table 1. Some properties of used soils

مشخصات	خاک ۱	خاک ۲
حد روانی (LL)	۳۲	—
حد خمیری (PL)	۲۶	—
شاخص خمیری (PI)	۶	—
وزن مخصوص (GS)	۲/۶۶	۲/۶۷
میزان رطوبت خاک در حالت اشباع (%)	۳۵/۷	۲۰/۳
طبقه‌بندی بر اساس سیستم یونیفاید	ML	SP



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای

Fig. 1. Particle size distribution curve of silty and sandy soils

#### ۴-۲- سیمان

سیمان مورد استفاده در آزمایشات از نوع سیمان پرتلند پوزولانی است. این سیمان طبق استاندارد ASTM C150 ساخته شده است. این تیپ از سیمان به وفور در استان یافت می‌شود و تهیه شده توسط کارخانه آرتا سیمان اردبیل است. علاوه بر آن مشخصات شیمیایی این نوع سیمان با سیمان‌های مورد استفاده در تحقیقات دیگر همانند مراجع [۶-۸] همخوانی دارد.

خصوصیات شیمیایی سیمان طبق اظهار کارخانه در جدول ۲ آمده است. برای تثبیت خاک‌ها از میزان سیمان ارائه شده توسط فانگ و همکاران (۱۹۹۲) استفاده شده است [۲۰]. میزان سیمان متعارف توسط نویسندگان فوق با توجه به آزمایش (ASTM D558) و بررسی رابطه بین دانسیته و رطوبت به دست آمده است. همچنین این آزمایشات بر مبنای پایایی و دوام

جدول ۵ خصوصیات نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایشات

Table 5. Characteristics of samples used for experiments

نامگذاری نمونه	نوع خاک	درصد سورفکتانت (%)	انرژی (ژول بر میلی لیتر)
M1	سیلت	۱	۲۰۰
M2	سیلت	۱	۵۰۰
M3	سیلت	۱	۱۷۵۰
M4	سیلت	۱	۳۵۰۰
M5	سیلت	۱/۵	۲۰۰
M6	سیلت	۱/۵	۵۰۰
M7	سیلت	۱/۵	۱۷۵۰
M8	سیلت	۱/۵	۳۵۰۰
M9	سیلت	۲/۵	۲۰۰
M10	سیلت	۲/۵	۵۰۰
M11	سیلت	۲/۵	۱۷۵۰
M12	سیلت	۲/۵	۳۵۰۰
S1	ماسه بادی	۱	۲۰۰
S2	ماسه بادی	۱	۵۰۰
S3	ماسه بادی	۱	۱۷۵۰
S4	ماسه بادی	۱	۳۵۰۰
S5	ماسه بادی	۱/۵	۲۰۰
S6	ماسه بادی	۱/۵	۵۰۰
S7	ماسه بادی	۱/۵	۱۷۵۰
S8	ماسه بادی	۱/۵	۳۵۰۰
S9	ماسه بادی	۲/۵	۲۰۰
S10	ماسه بادی	۲/۵	۵۰۰
S11	ماسه بادی	۲/۵	۱۷۵۰
S12	ماسه بادی	۲/۵	۳۵۰۰

۴-۴- سورفکتانت (فوق روان کننده) مورد استفاده:

فوق روان کننده مورد استفاده از شرکت سراپوش تأمین شده است. این فوق روان کننده با نام تجاری SPC-N1 است. فوق روان کننده مورد استفاده که بر مبنای پلی کربوکسیلات اتر و نسل سوم فوق روان کننده‌ها و با حالت گیرش نرمال است و عموماً برای استفاده جهت کاهش شدید آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، مطابق با استانداردهای ASTM C1017 و

از آزمایشات طراحی شده و در جدول ۶ خلاصه شده است. همان‌گونه که از این تحقیق مشخص است از مقادیر بسیار پایین نانولوله استفاده شده است (۰٫۳ گرم به ازای ۲۴۰۰ گرم خاک) و انتظار مشاهده نتیجه افزایش در مقاومت خاک به ویژگی‌های مکانیکی فوق‌العاده این ماده، بر می‌گردد. در تحقیقات قبلی، محققین از ۰٫۱ گرم و ۰٫۰۱ گرم و حتی از ۰٫۰۰۱ گرم نانولوله هم استفاده کرده‌اند [۶، ۷]. برای پراکنده کردن نانولوله‌های کربنی چند جداره با طول ۳۰ میکرون Mendoza و همکاران [۲۱]، ۴۰۰۰۰ ژول انرژی را انرژی مناسب دانسته‌اند. با توجه به اینکه در بررسی حاضر علاوه بر میزان انرژی فراصوتی حجم مایع نیز (مشابه کار Yu و همکاران [۱۰]) در نظر گرفته شده است، از مقادیر متفاوت سطوح انرژی فراصوتی به گونه‌ای استفاده شده که شامل مقدار ارائه شده توسط مرجع [۲۱] باشد. با توجه به اینکه حجم مایع ۱۲۰ میلی لیتر در نظر گرفته شده است، کمترین انرژی به کار رفته در این دسته از آزمایشات از ۲۰۰ ژول بر میلی لیتر که معادل با ۲۴۰۰۰ ژول و بیشترین سطح ۳۵۰۰ ژول بر میلی لیتر معادل با ۴۲۰۰۰۰ ژول است که برای بررسی تأثیر Shortening ذرات استفاده شده است.

جدول ۳: ترکیب شیمیایی نانولوله‌ی خریداری شده

Table 3. The chemical composition of the purchased nanotube

اجزاء	مقدار
C	۹۷/۴۶
Al	۰/۱۹
Cl	۱/۰۲
Co	۱/۰۹
S	۰/۲۴

جدول ۴: برخی از خصوصیات نانولوله‌ی کربنی چند جداره‌ی مصرف شده در آزمایشات

Table 4. Some properties of multi-wall carbon nanotubes used in experiments

پارامتر	مقدار (روش)
قطر بیرونی	۵ تا ۱۵ نانومتر (from HRTEM, Raman)
قطر داخلی	۳ تا ۵ نانومتر
طول	~ ۵۰ میکرومتر (TEM)
(SSA) سطح ویژه	> 233 m <sup>2</sup> /g (BET)
رنگ	مشکی
خاکستر	کمتر از ۱/۵ درصد وزنی (TGA)

این دستگاه ابتدا محلول درون بشر ریخته شده و سپس داخل بشر مگنت انداخته می‌شود. این دستگاه دارای پیچ تنظیمی است که به وسیله‌ی آن می‌توان سرعت چرخش محلول و حرارت اعمالی به محلول درون آن را کنترل کرد. بشر حاوی محلول، روی صفحه‌ی آن قرار داده می‌شود و تعداد دور همزن انتخاب می‌گردد (باید توجه داشت که نباید از حرارت برای هم زدن کمک گرفت و حرارت روی صفر قرار داده شود). هدف از این مرحله پراکنده کردن سورفکتانت در درون محلول و خیس کردن نانو مواد با محلول است. برخلاف سایر همزن‌ها (مانند همزن هیدرومتری) که از بالای محلول و نزدیک به سطح آن مواد را هم می‌زنند، همزن مغناطیسی، به‌خصوص در نانولوله‌ها که تمایل به ته‌نشین شدن را دارند، از پایین محلول عمل پراکنده‌گی را انجام می‌دهند و مواد ته‌نشین شده را به پراکنده شدن منجر می‌سازد.

مرحله‌ی ۴: در این قسمت محلول آماده شده تحت انرژی فراصوتی قرار می‌گیرد. دستگاه مورد استفاده از نوع فراصوتی پروب‌دار با نام تجاری TopsonicUP400 است که حداکثر توان قابل تنظیم آن از ۱۰۰ تا ۴۰۰ وات و زمان قابل تنظیم آن تا ۳۰ دقیقه است. با توجه به اینکه یکی از اهداف این مطالعه بررسی تأثیر مقدار انرژی فراصوتی بر مقاومت خاک‌ها می‌باشد، لذا برای این منظور از مقادیر مختلف انرژی فراصوتی استفاده گردید.

به‌طور کلی تنظیم انرژی اعمالی به وسیله‌ی دستگاه‌های فراصوتی به دو صورت انجام می‌پذیرد؛ به وسیله‌ی کنترل توان خروجی دستگاه یا کنترل مدت زمان اعمال انرژی فراصوتی.

بدین منظور برای تغییر میزان انرژی فراصوتی میزان توان خروجی دستگاه را در ۳۵۰ وات با فرکانس ۲۰ KHz قرار داده و با تغییر زمان فراصوتی به مدت ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ و با به‌صورت تغییر در میزان توان دستگاه به ۲۰۰ و ۳۵۰ وات، مقادیر انرژی ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۷۵۰ و ۳۵۰۰ ژول بر میلی‌لیتر به محلول حاوی آب مقطر، نانولوله و فوق روان کننده، به بررسی تغییرات انرژی فراصوتی بر همگن‌سازی نانولوله‌ها و تأثیر آن بر مقاومت خاک تثبیت شده با سیمان و محلول نانولوله پرداخته شده است.

مرحله‌ی ۵: در این مرحله به منظور ثابت نگه‌داشتن نسبت آب به سیمان در مقدار ۰/۵ (W/C = ۰/۵) و جهت تهیه‌ی دوغاب، به میزان نصف وزن سیمان محلول حاوی نانولوله‌ی کربنی چند جداره به آن اضافه شده و مخلوط می‌گردد.

مرحله‌ی ۶: در این قسمت، دوغاب سیمان تهیه شده با نسبت آب به سیمان ۰/۵ در مدت زمان ۳ دقیقه هم زده می‌شود.

مرحله‌ی ۷: دوغاب سیمانی که شامل ۱۲۰ گرم سیمان (۱۰ درصد وزن خشک خاک) و ۶۰ گرم محلول است (شامل آب مقطر که می‌تواند دارای نانولوله و فوق روان کننده باشد) به ۱۲۰۰ گرم خاک سیلتی اضافه می‌گردد. این کار برای خاک ماسه‌ای نیز تکرار می‌گردد.

مرحله‌ی ۸: جام حاوی ۱۲۰۰ گرم خاک (سیلتی یا ماسه‌ای) به همراه دوغاب سیمان در همزن با نام تجاری SCL گذاشته شده و به مدت ۱۰

ASTM C494 Type F ساخته شده است. فوق روان کننده مورد استفاده با حالت فیزیکی مایع با رنگ قهوه‌ای مایل به زرد است. این مایع بدون نیترات است. مقدار کلر آن حدود ۷۰۰ ppm و pH آن حدود ۶/۵ می‌باشد. چگالی این فوق روان کننده در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برابر  $1/1 \text{ g/cm}^3$  است.

#### جدول ۶: نام‌گذاری نمونه‌های استفاده شده برای درصد‌های متفاوت نانولوله

Table 6. Naming the samples for different nanotube percentages

نام نمونه	نوع خاک	وزن نانولوله کربنی	درصد فوق روان کننده
M13	سیلت	۰/۱۵	۱/۵
M14	سیلت	۰	۱/۵
S13	ماسه‌بادی	۰/۱۵	۱
S14	ماسه‌بادی	۰	۱

#### ۵- روش ساخت نمونه‌ها

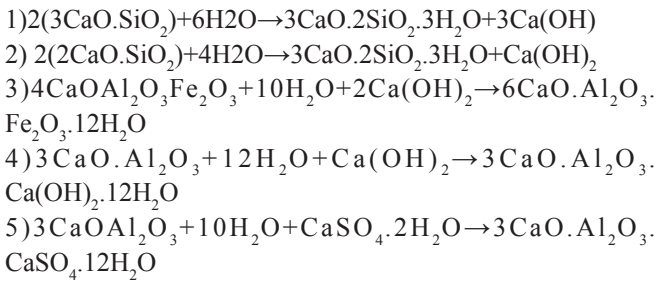
مراحل اجرای عملی این پژوهش به‌صورت تصویری در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین سعی شده است گام به گام این مراحل از تهیه‌ی محلول نانولوله‌ی کربنی گرفته تا انجام آزمایش برش مستقیم توضیح داده شده شود. این روند تقریباً توسط تمامی محققان حوزه مورد بحث برای به‌کارگیری نانولوله‌ی کربنی جهت تقویت مصالح مورد استفاده قرار گرفته است. [۶، ۷، ۱۱، ۱۲، ۱۴-۱۸]

مرحله‌ی ۱: فوق روان کننده‌ی پلی‌کربوکسیلاتی در مقادیر متفاوت ۱، ۱،۵ و ۲،۵ درصد به ۱۲۰ گرم آب مقطر اضافه می‌شود. لازم به ذکر است که مجموعه‌ی آزمایشات در این مرحله مشتمل بر نمونه‌های فاقد فوق روان کننده است لذا فوق روان کننده برای این دسته از آزمایشات استفاده نشده و برابر صفر است.

مرحله‌ی ۲: بر روی نمونه‌های تهیه شده از مرحله‌ی یک، آب مقطر به‌عنوان حلال و فوق روان کننده‌ی پلی‌کربوکسیلاتی در مقادیر متفاوت و نانولوله‌ی کربنی چند جداره که مقدار آن برای هر اختلاط متفاوت است، اضافه می‌شود. لازم به ذکر است که در مجموعه‌ی آزمایشات بعضی از نمونه‌های انتخاب شده فاقد افزودنی نانولوله است که این نمونه‌ها به‌عنوان نمونه شاهد و برای بررسی تأثیر و مقایسه بر روی مقاومت خاک‌ها تهیه شده است و در موارد لازم وزن نانولوله‌ی کربنی چند جداره برای این دسته از آزمایشات به‌عنوان عدد صفر در نظر گرفته شده است.

مرحله‌ی ۳: محلول‌های تهیه شده طبق مراحل قبلی، به مدت ۳۰ دقیقه توسط همزن مغناطیسی با سرعت ۲۴۰ rpm قرار گرفتند. دستگاه استفاده شده در این آزمایش با نام Midpip و ساخت ایران است. برای استفاده از

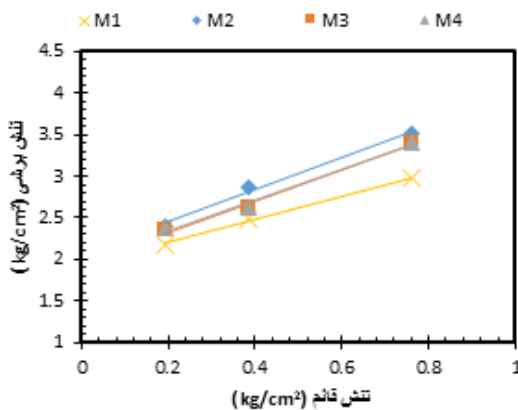
عمل آوری شوند. مهم‌ترین واکنش‌هایی که افزودنی‌ها در خاک سبب می‌شوند، واکنش تبادل یونی، واکنش پوزولانی و واکنش هیدراسیون است که مهم‌ترین آن‌ها واکنش پوزولانی است [۲۳]. محصولات سیمان پرتلند با اضافه شدن آب واکنش‌های زیر را انجام می‌دهند [۲۴-۳۲]:



برای بررسی، تأثیر مواد افزودنی مورد مطالعه و مقدار انرژی فراصوتی بر روی مقاومت برشی خاک‌ها تعداد ۱۶ نمونه با روند اشاره شده فوق با مقدار ۰٫۳ گرم نانولوله ساخته شد.

در نهایت برای بررسی تغییرات پارامترهای برشی خاک‌ها نمونه‌هایی مشابه نمونه‌های فوق با ۰٫۱۵ گرم نانولوله و نمونه‌های بدون نانولوله (۰ گرم نانولوله) تهیه شد و تغییرات مقاومت برشی و تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی هر دو نوع خاک مورد ارزیابی قرار گرفت.

در ضمن برای بالا بردن دقت آزمایشات برای هر بار سطح تنش قائم، آزمایشات سه بار تکرار شده است و با توجه به اینکه درصد خطاهای آزمایش تکرار حداکثر به ۸ تا ۹ درصد محدود است، پس از بررسی آماری از اعداد باقی مانده میانگین کسب شده و مورد استفاده قرار گرفت. به این صورت که برای رسم نمودار موهر کلمب از ۹ نمونه استفاده گردیده است.

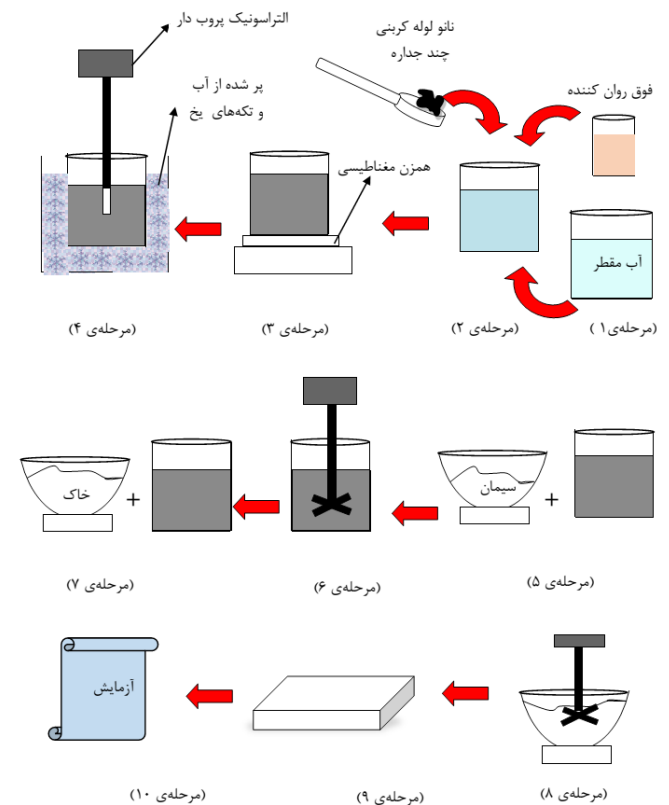


شکل ۳: پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به خاک سیلتی تثبیت شده با ۱ درصد فوق روان کننده و ۰/۱۲۵ درصد نانولوله

Fig. 3. Mohr-Coulomb's envelope of the stabilized silty soil with 1% super-plasticizer and 0.125% of nanotubes

دقیقه با سرعت بالا ( ۱۲۰ rpm ) هم زده شد. در حین هم زدن خاک به وسیله کاردک از دیواره‌ها (در صورت چسبیدن به دیواره‌ها) جدا شده و به درون خاک در حال هم زدن ریخته می‌شد.

مرحله ی ۹: خاک (در شرایط رطوبت اشباع که مناسب‌ترین رطوبت برای اختلاط تر است [۲۲]) و دوغاب سیمان مخلوط شده به وسیله‌ی کاردک داخل قالب‌های از پیش ساخته شده‌ای با فشار خیلی کم قرار داده می‌شد و سطح آن به منظور وارد شدن بار قائم به صورت یکنواخت، صاف شده و جهت تشخیص نمونه‌ها برچسب‌گذاری می‌شد. طبق بند ۷-۵ استاندارد ASTM D3080 برای متراکم کردن نمونه‌ها در داخل جعبه برش مستقیم می‌توان وزن مشخصی از خاک را در داخل قالب یا جعبه برش به حجم یکسان رساند. برای کلیه آزمایشات وزن مشخصی از خاک در حجم قالب پیش ساخته ۶×۶×۲ سانتی‌متری ریخته و قالب‌گیری شده است در این صورت چگالی نمونه‌ها به ۱۹/۸۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسانده شد. این مقدار برای کلیه نمونه‌های تثبیت شده (خواه نانولوله وجود داشته باشد و یا نه) یکسان در نظر گرفته شده است.



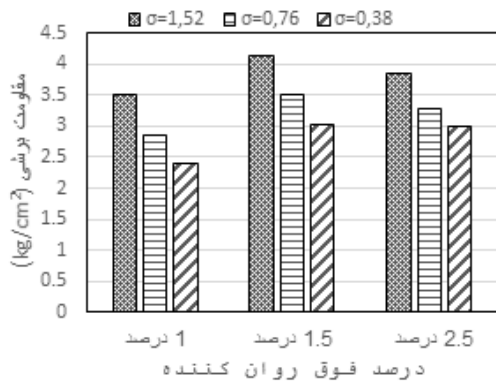
شکل ۲: تصویر مراحل اختلاط نانولوله و خاک

Fig. 2. Schematic image of the steps of nanotube and soil mixing

نمونه‌های ساخته شده به روش فوق در داخل آب به مدت ۷ روز گذاشته شدند و به نمونه‌ها اجازه داده شد تا در دمای اتاق (تقریباً ۲۵ درجه سلسیوس)

مربوط به نمونه‌ی ساخته شده با انرژی فراصوتی ۵۰۰ ژول بر میلی لیتر به همراه فوق روان کننده‌ی پلی کربوکسیلاتی به مقدار ۱٫۵ درصد بیشترین مقاومت برشی را از خود نشان داده است. در هر سه شکل فوق‌الذکر مشخص است که نمودار مربوط به موهر کلمب نمونه‌هایی که محلول نانولوله کربنی آن قبل از اضافه شدن به سیمان با انرژی ۵۰۰ ژول بر میلی لیتر (j/ml)  $UE = 500$  همگن شده‌اند بالاتر از نمودار موهر کلمب مربوط به نمونه‌های تثبیت شده‌ای که محلول‌هایشان با سایر انرژی‌ها همگن شده است را دارد. نتایج مربوط به تأثیر درصد‌های متفاوت فوق روان کننده به صورت مجزا در شکل ۶ آورده شده است.

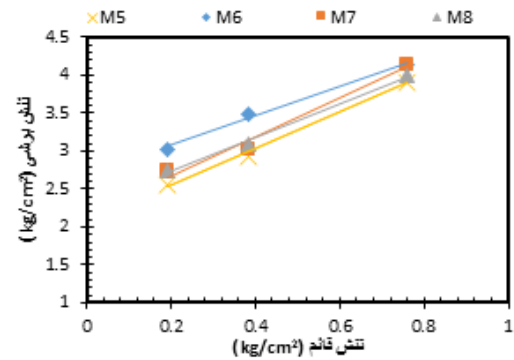
شکل ۶ تأثیر مقدار سورفکتانت پلی کربوکسیلاتی را بر روی مقاومت خاک سیلتی را نشان می‌دهند. در این شکل که نمودار میله‌ای مقاومت برشی خاک در سه تنش قائم متفاوت برحسب درصد فوق روان کننده ترسیم شده است، مشاهده می‌شود که از بین درصد‌های انتخاب شده، نمونه خاک تثبیت شده‌ای که محلول نانولوله با ۱٫۵ درصد فوق روان کننده همگن شده است بیشترین مقاومت برشی را دارد. در تنش‌های  $0.76 \text{ kg/cm}^2$ ،  $0.38 \text{ kg/cm}^2$  و  $1.52 \text{ kg/cm}^2$  به مقدار ۱۷٫۶۶ درصد و ۲۱ درصد و ۵۳ درصد بهبود در مقاومت برشی را شاهد هستیم. در این مطالعه بیشترین مقاومت برشی خاک سیلتی زمانی به دست می‌آید که از انرژی فراصوتی ۵۰۰ ژول بر میلی لیتر و سورفکتانت به مقدار ۱٫۵ درصد استفاده شود که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۶: تأثیر درصد‌های متفاوت فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی بر روی مقاومت برشی خاک سیلتی تحت انرژی فراصوتی ۵۰۰ ژول بر میلی لیتر

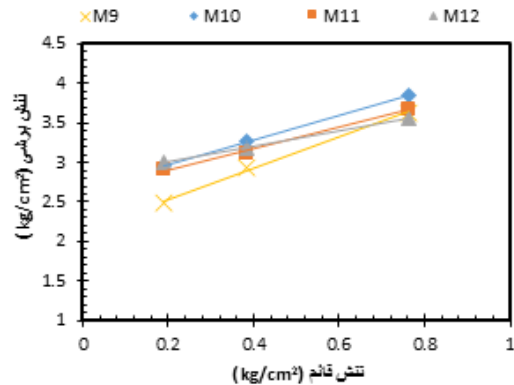
Fig. 6. Effect of different percentages of polycarboxylate super-plasticizer on the shear strength of silty soil under ultrasonic energy of 500 j/ml

شکل ۷، شکل ۸ و شکل ۹ پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به خاک ماسه‌ای تثبیت شده با درصد بهینه‌ی سیمان و نانولوله به میزان ۰٫۱۲۵ درصد وزنی سیمان همگن شده به ترتیب در محلول حاوی ۱ درصد و ۱٫۵ درصد و ۲٫۵ درصد فوق روان کننده‌ی پلی کربوکسیلاتی را نشان



شکل ۴: پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به خاک سیلتی تثبیت شده با ۱٫۵ درصد فوق روان کننده و ۰٫۱۲۵ درصد نانولوله

Fig. 4. Mohr-Coulomb's envelope of the stabilized silty soil with 1.5 % super-plasticizer and 0.125% of nanotubes



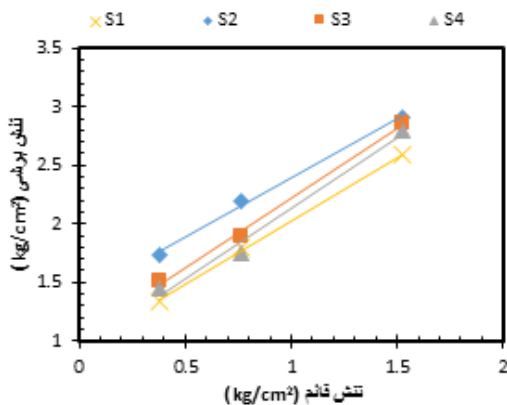
شکل ۵: پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به خاک سیلتی تثبیت شده با ۲٫۵ درصد فوق روان کننده و ۰٫۱۲۵ درصد نانولوله

Fig. 5. Mohr-Coulomb's envelope of the stabilized silty soil with 2.5 % super-plasticizer and 0.125% of nanotubes

## ۶- تحلیل یافته‌ها

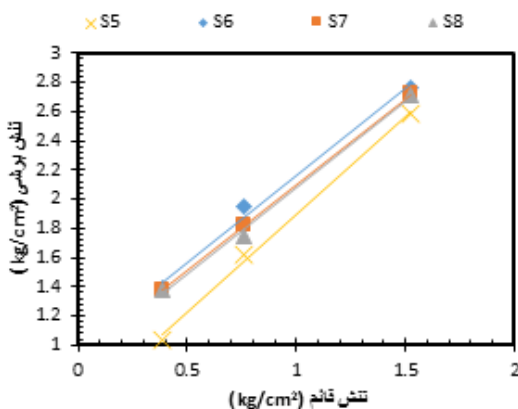
۶-۱- تأثیر انرژی فراصوتی بر مقاومت برشی خاک‌های مورد بحث شکل ۳، شکل ۴ و شکل ۵ پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به خاک تثبیت شده با درصد‌های متعارف سیمان (مطابق مرجع [۲۰]) که از انرژی‌های مختلف فراصوتی (UE) به مقدار ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۷۵۰ و ۳۵۰۰ ژول بر میلی لیتر در همگن‌سازی این محلول‌ها استفاده شده است را نشان می‌دهند. در شکل ۳ برای همگن‌سازی محلول نانولوله از ۱ درصد سورفکتانت پلی کربوکسیلاتی و در شکل ۴ از ۱٫۵ درصد سورفکتانت پلی کربوکسیلاتی و در شکل ۵ از ۲٫۵ درصد فوق روان کننده استفاده شده است. با مقایسه‌ی این نمودارها به‌خوبی دیده می‌شود که پوش گسیختگی

بر سانتی‌متر مربع ۲۶ درصد و در تنش قائم  $0/38$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ۲۲ درصد مقاومت خاک ماسه‌ای را بهبود بخشیده است. برای درصد‌های بالای فوق‌روان کننده مقدار مقاومت برشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و دلیل آن این است که با اضافه کردن فوق‌روان کننده بیشتر این ماده در داخل خاک سیمانی شده به صورت عامل حباب‌زا عمل کرده و مقاومت خاک را کاهش می‌دهد. با توجه به نتایج بخش قبل مقدار فوق‌روان کننده ۱ درصد برای خاک ماسه‌ای و مقدار  $1/5$  درصد برای خاک سیلتی بالاترین مقاومت برشی نمونه‌ها را نتیجه می‌دهد.



شکل ۷: پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به ماسه‌بادی تثبیت شده با ۱ درصد فوق‌روان کننده و  $0/125$  درصد نانولوله

Fig. 7. Mohr-Coulomb's envelope of the stabilized sandy soil with 1% super-plasticizer and 0.125% of nanotubes



شکل ۸: پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به ماسه‌بادی تثبیت شده با  $1/5$  درصد فوق‌روان کننده و  $0/125$  درصد نانولوله

Fig. 8. Mohr-Coulomb's envelope of the stabilized sandy soil with 1.5% super-plasticizer and 0.125% of nanotubes

می‌دهد. طبق روال قبلی برای همگن‌سازی نانولوله‌ها در محلول آب فوق‌روان کننده پلی‌کربوکسیلاتی از انرژی‌های متفاوت استفاده شده است که در نمودارها مشخص شده‌اند. با توجه به نمودارهای فوق با افزایش انرژی فراصوتی از ۲۰۰ به ۵۰۰ ژول بر میلی‌لیتر پارامتر چسبندگی تمامی نمونه‌ها (خواه در خاک سیلتی و خواه در خاک ماسه‌ای) میزان چسبندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در این مطالعه چسبندگی خاک تثبیت شده با سیمان و نانولوله با خاک تثبیت شده با سیمان و فوق‌روان کننده (بدون استفاده از نانولوله کربنی) مقایسه شده است. چسبندگی هر کدام از انواع خاک‌ها بعد از اضافه کردن نانو مواد علاوه بر سیمان نسبت به خاک تثبیت شده با سیمان افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به غلبه انرژی فراصوتی بر آگلومراسیون ذرات و جدا شدن آن‌ها از هم نسبت داد.

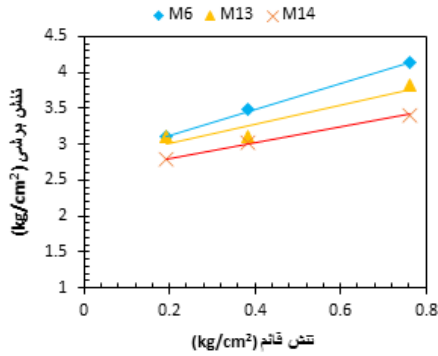
با مقایسه نمودارهای شکل ۷ تا شکل ۹ به مطالعه تأثیر توأمان انرژی فراصوتی و سورفکتانت پرداخته شده است. به ترتیب در تنش‌های  $1/52$  و  $0/76$  و  $0/38$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بیشترین مقاومت برشی خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این مطالعه  $13/23$  درصد و  $26$  درصد و  $26/33$  درصد افزایش می‌یابد.

برای مقایسه نتایج حاصله از تأثیر مقادیر متفاوت انرژی فراصوتی از تحقیقات قبلی محققین امر استفاده شده است [۲۱]. با توجه به اینکه مقدار انرژی فراصوتی  $500$  ژول بر میلی‌لیتر نزدیک‌ترین مقدار به مقدار انرژی بهینه‌ای است که توسط Mendoza و همکاران به دست آمده است لذا با اعمال انرژی کمتر از این مقدار نانولوله‌ها به صورت مجتمع قرار دارند و در این صورت سطوحی از نانولوله‌ها که باید با سیمان و خاک در ارتباط باشند کمتر می‌شود. می‌توان انتظار داشت با اعمال انرژی بالاتر و رسیدن به مقدار انرژی فراصوتی بهینه این سطوح افزایش می‌یابند و تأثیر آن‌ها بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش مقدار انرژی فراصوتی بیش از مقدار بهینه‌ای آن به طور قطع نمی‌توان به طور دقیق تعیین کرد که کدام یک از پارامترهای برشی خاک افزایش می‌یابد ولی شاهد افزایش مقاومت هستیم. یا با ادبیاتی دیگر می‌توان اذعان کرد که هیچ‌کدام از پارامترهای برشی خاک در این حالت تعیین کننده نیستند. دلیل این امر را می‌توان به صورت زیر توضیح داد: در این سطوح از انرژی یعنی بالاتر از انرژی فراصوتی بهینه، علاوه بر غلبه بر تجمع بین ذرات شاهد تورق و بریده شدن نانولوله‌ها نیز هستیم که خود این موضوع از خصوصیات مکانیکی نانولوله‌ها می‌کاهد و در واقع میزان انرژی تعیین کننده است.

این سه نمودار همچنین نشان می‌دهند زمانی که از فوق‌روان کننده به مقدار ۱ درصد وزنی سیمان استفاده شده است بالاترین مقدار مقاومت برشی برای خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان به همراه فوق‌روان کننده و نانولوله‌ی کربنی به دست آمده است.

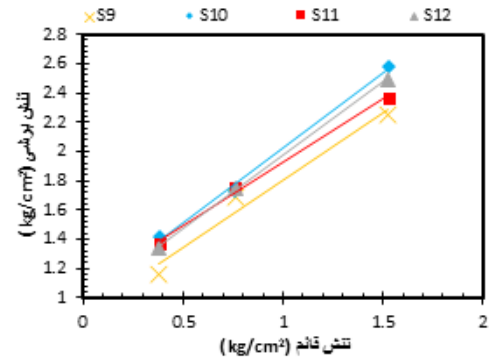
تأثیر افزودن ۱ درصد فوق‌روان کننده نسبت به سایر درصد‌های این افزودنی در تنش‌های قائم مختلف یکسان نیست و در تنش قائم  $0/5(\sigma)$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع  $13$  درصد و در تنش قائم  $0/72$  کیلوگرم





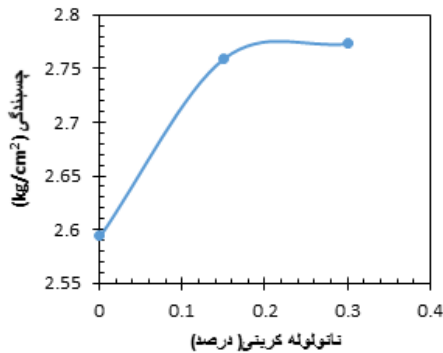
شکل ۱۱: نمودار موهر کلمب مربوط خاک سیلتی تثبیت شده با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی

Fig. 11. Mohr–Coulomb's envelope of the silty soil, stabilized by different percentages of carbon nanotubes



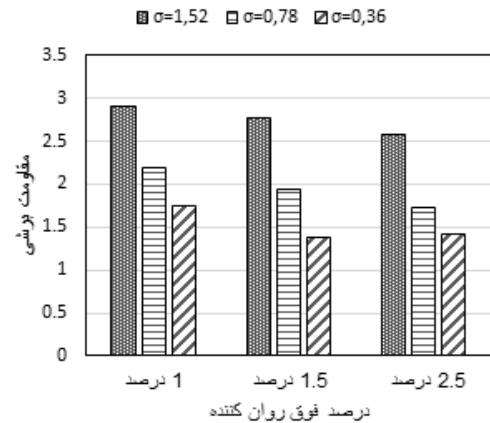
شکل ۹: پوش گسیختگی موهر کلمب مربوط به ماسه‌بادی تثبیت شده با ۲/۵ درصد فوق روان کننده و ۰/۱۲۵ درصد نانولوله

Fig. 9. Mohr–Coulomb's envelope of the stabilized sandy soil with 2.5% super-plasticizer and 0.125% of nanotubes



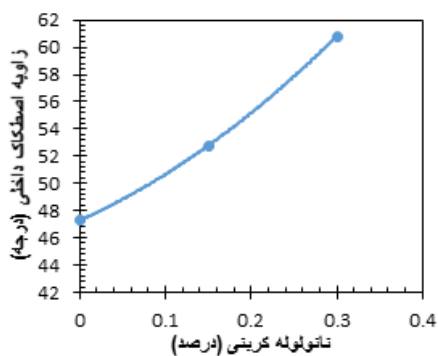
شکل ۱۲: نمودار تغییرات چسبندگی خاک سیلتی با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی

Fig. 12. cohesion changes of silty soil, stabilized by different percentages of carbon nanotubes



شکل ۱۰: تأثیر درصدهای متفاوت فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی بر روی مقاومت برشی خاک ماسه‌ای تحت انرژی فراصوتی ۵۰۰ ژول بر میلی لیتر

Fig. 10. Effect of different percentages of polycarboxylate super-plasticizer on the shear strength of sandy soil under ultrasonic energy of 500 j/ml



شکل ۱۳: نمودار تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک سیلتی با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی

Fig. 13. internal friction angle changes of silty soil, stabilized by different percentages of carbon nanotubes

۶-۲- تأثیر درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی بر روی مقاومت برشی خاک‌های مورد مطالعه

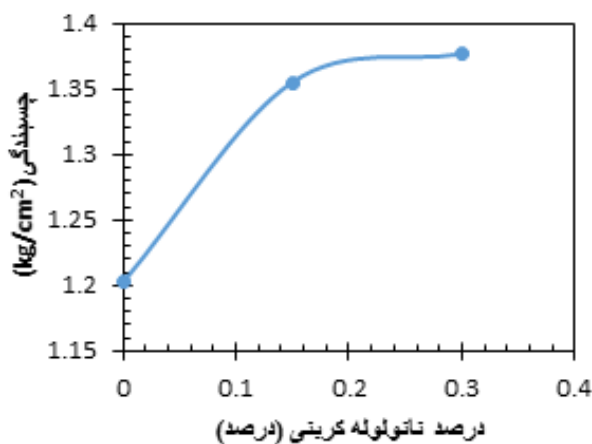
شکل ۱۱، شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب پوش گسیختگی و تغییرات چسبندگی و تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک سیلتی را با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی نشان می‌دهد. در این تصاویر نیز به خوبی دیده می‌شود که با اضافه کردن نانولوله کربنی، افزایش چسبندگی هر دو نوع خاک به صورت صعودی افزایش می‌یابد ولی پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک برای دو نوع خاک مورد استفاده رفتار یکسانی را ندارد و در خاک ماسه‌ای پایین افتادگی نمودار را نیز شاهد هستیم.

با استفاده جزئی از نانولوله کربنی (تنها ۰/۳ گرم) از ۲/۵۹ به ۲/۷۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد که بیانگر ۷/۷ درصد افزایش در چسبندگی خاک است. بهبود در زاویه اصطکاک داخلی خاک سیلتی ۲۷ درصد است. لازم به ذکر است که این در مقایسه فوق فقط تأثیر نانولوله کربنی مورد ارزیابی قرار داده می‌شود و نمونه M14 خاک سیلتی تثبیت شده با سیمان و سورفکتانت است که در آن از افزودنی نانولوله استفاده نشده است.

برای خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان مسلح شده به نانولوله کربنی، از شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد که مقاومت برشی خاک در تنش ۱/۵۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع از ۲/۷۱ به ۲/۹۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد که می‌توان اذعان داشت که این مقدار برابر ۷ درصد است. برای تنش‌های ۰/۷۶ و ۰/۳۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ترتیب ۱۹/۷ درصد و ۵٫۵ درصد افزایش در مقاومت برشی را شاهد هستیم. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز به ترتیب ۸ و ۲ درصد افزایش می‌یابد.

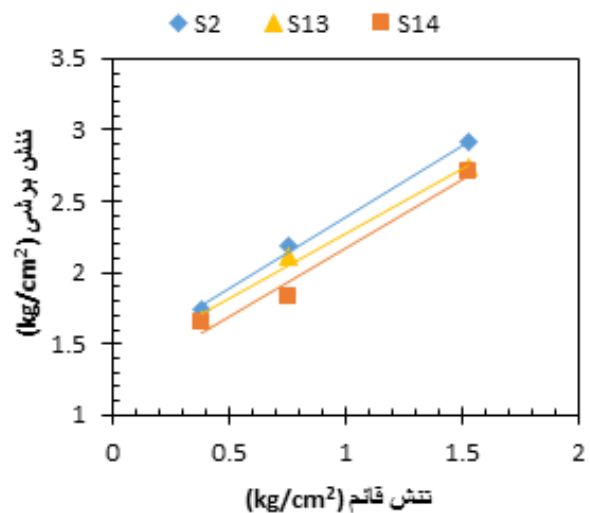
همچنین لازم به توضیح است که درصدهایی فوق‌الذکر با آنچه که در بخش ۶-۱۱ اشاره شد بی‌ارتباط است زیرا در بخش ۶-۱ تأثیر مقادیر مختلف انرژی فراصوتی و سورفکتانت به صورت درصدی بیان شد و حال آنکه در این بخش به تأثیر مقادیر مختلف نانولوله کربنی به صورت درصدی بیان شده است.

مشابه آن پوش گسیختگی و تغییرات چسبندگی و تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی در شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده شده‌است. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که با اضافه کردن نانولوله‌ی کربنی مقدار مقاومت برشی خاک به‌واسطه‌ی افزایش چسبندگی خاک افزایش پیدا می‌کند اما تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک با افزایش نانولوله کربنی روند کاملاً صعودی را ندارد و برای مقدار ۰/۱۵ گرم نانولوله کربنی کاهش در زاویه اصطکاک داخلی خاک را شاهد هستیم. با مقایسه‌ی شکل ۹، شکل ۱۱ و شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با درصد یکسانی از افزودنی نانو مواد و سیمان مقاومت برشی نمونه‌های سیلتی تثبیت شده با سیمان و نانولوله‌ی کربنی به‌مراتب بیشتر از مقاومت برشی نمونه‌های ماسه‌ای است. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در تنش ۰/۷۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مقاومت برشی خاک از ۳/۴۱ (در نمونه M14 که از نانولوله کربنی استفاده نشده است) به ۴/۱۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (در نمونه M6 که از ۰/۳ گرم نانولوله کربنی استفاده شده است) افزایش یافته است و این بدین معناست که مقاومت برشی نمونه در این سطح تنش ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. در سطوح تنش قائم ۰/۳۸ و ۰/۱۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش مقاومت برشی خاک به ترتیب برابر ۱۲/۵ درصد و ۱۲/۲ درصد است. همچنین از شکل ۱۲ و شکل ۱۳ می‌توان مشاهده نمود که با مقایسه این دو نمونه چسبندگی خاک



شکل ۱۵: نمودار تغییرات چسبندگی خاک ماسه‌ای با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی

Fig. 15. Cohesion Changes of sandy soil, stabilized by Different Percentages of Carbon Nanotubes



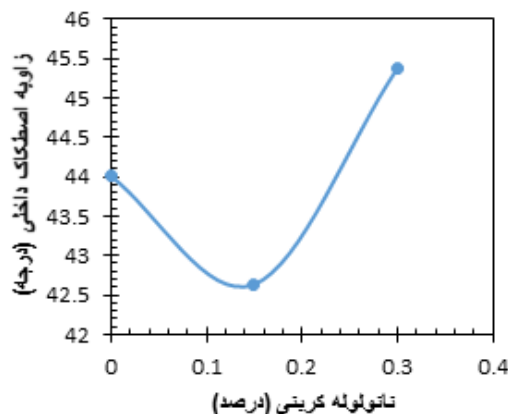
شکل ۱۴: نمودار موهر کلمب مربوط خاک ماسه‌ای تثبیت شده با درصدهای متفاوت نانولوله‌ی کربنی

Fig. 14. Mohr-Coulomb's envelope of the sandy soil, stabilized by different percentages of carbon nanotubes



شکل ۱۷: تصویر SEM از خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و نانولوله به مقدار ۰/۱۲۵ درصد وزنی سیمان

Fig. 17. SEM image of sandy soil stabilized by cement and 0.125% carbon-nanotube by weight of cement



شکل ۱۶: نمودار تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای با درصد‌های متفاوت نانولوله کربنی

Fig. 16. internal friction angle Changes of sandy soil, stabilized by Different Percentages of Carbon Nanotubes



شکل ۱۸: تصویر SEM از خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و نانولوله به مقدار ۰/۱۲۵ درصد وزنی سیمان

Fig. 18. SEM image of silty soil stabilized by cement and 0.125% carbon-nanotube by weight of cement

تصاویر SEM از نمونه‌های خاک سیلتی و ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و نانولوله و با اعمال انرژی فراصوتی که بالاترین مقاومت را نشان داده است (۵۰۰ ژول بر میلی‌لیتر) و مقدار سورفکتانت بهینه (۱ درصد برای خاک ماسه‌ای و ۱/۵ درصد برای خاک سیلتی) در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نشان داده شده‌اند در این تصاویر به خوبی مشاهده می‌شود که نانولوله‌ها مصرف شده و از بین نرفته‌اند و این مسئله نشان می‌دهد که نانولوله‌ها با سیمان یا خاک واکنش داده و به ماده جدیدی تبدیل نمی‌شوند، بلکه به صورت منفرد از همدیگر جدا شده و به صورت مسلح کننده عمل می‌کنند. همچنین در این تصاویر مشاهده می‌شود که مکانیسم افزایش مقاومت خاک با نانولوله‌ها به گونه‌ای است که نانولوله‌ها بین دو دانه‌ی خاک اتصال برقرار می‌کند و مقاومت خاک را بالا می‌برد. در این تصاویر به خوبی مشاهده می‌شود که نانولوله‌ها از داخل خاک بیرون کشیده می‌شوند و در داخل خاک شکسته نمی‌شوند. این رفتار مربوط به مقاومت بالای نانولوله‌ها و بهینه کردن میزان انرژی فراصوتی و سورفکتانت است، زیرا همان گونه که در بخش‌های قبلی ذکر شد نانولوله‌ها توانایی تحمل نیروی کششی بسیار بالایی را دارا هستند که از این لحاظ مقاوم‌ترین ماده‌ی شناخته شده هستند و از سوی دیگر با بهینه کردن مقدار انرژی فراصوتی تا حد مقدور از تورق و کوتاه شدگی نانولوله‌ها جلوگیری شده است. به این دلیل به صورتی در شکل نمایان هستند که اولاً هیچ نانولوله‌ای در چسبیده به هم نیست که توانایی انرژی فراصوتی و سورفکتانت بر پراکندگی نانولوله‌ها را نشان می‌دهد و ثانیاً نانولوله‌ها در هنگام اعمال بار از داخل خاک بیرون کشیده شده‌اند و این امر به صورت نانولوله‌هایی با انتهای بیرون زده از خاک و جاهای خالی به اندازه‌ی نانولوله‌ها در خاک مشخص است.

## ۷- نتیجه‌گیری

- در این مطالعه مقدار انرژی فراصوتی لازم برای همگن‌سازی نانولوله‌های کربنی جهت پراکنده‌سازی نانولوله‌ها برای استفاده به‌عنوان مواد افزودنی به همراه سیمان برای تثبیت سیمانی خاک مقدار بهینه‌ای را نشان داده است و این مقدار برای نانولوله‌ی با مشخصات ذکر شده به میزان ۶۰ کیلوژول انرژی در ۱۲۰ میلی‌لیتر محلول (۵۰۰ ژول بر میلی‌لیتر) به دست می‌آید. دلیل این امر را می‌توان به کوتاه شدگی نانولوله‌ها در انرژی‌های بالاتر از ۵۰۰ ژول بر میلی‌لیتر و آگلومره ماندن آن‌ها در انرژی‌های پایین دانست.
- مقدار فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی مناسب برای خاک سیلتی ۱،۵ درصد و برای خاک ماسه‌ای ۱ درصد به دست آمد. با

- condition, *Current World Environment*, 10(1) (2015) 120-130.
- [7] A.A.S. Correia, P.D. Casaleiro, M.G.B. Rasteiro, Applying multiwall carbon nanotubes for soil stabilization, *Procedia engineering*, 102 (2015) 1766-1775.
- [8] D.T. Figueiredo, A.A.S. Correia, D. Hunkeler, M.G.B. Rasteiro, Surfactants for dispersion of carbon nanotubes applied in soil stabilization, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 480 (2015) 405-412.
- [9] R. Siddique, A. Mehta, Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars, *Construction and Building Materials*, 50 (2014) 116-129.
- [10] J. Yu, N. Grossiord, C.E. Koning, J. Loos, Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution, *Carbon*, 45(3) (2007) 618-623.
- [11] F. Inam, A. Heaton, P. Brown, T. Peijs, M.J. Reece, Effects of dispersion surfactants on the properties of ceramic-carbon nanotube (CNT) nanocomposites, *Ceramics International*, 40(1) (2014) 511-516.
- [12] H. Kim, I.W. Nam, H.-K. Lee, Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume, *Composite Structures*, 107 (2014) 60-69.
- [13] Y. Hu, D. Luo, P. Li, Q. Li, G. Sun, Fracture toughness enhancement of cement paste with multi-walled carbon nanotubes, *Construction and Building Materials*, 70 (2014) 332-338.
- [14] F. Ubertini, A.L. Materazzi, A. D'Alessandro, S. Laflamme, Natural frequencies identification of a reinforced concrete beam using carbon nanotube cement-based sensors, *Engineering structures*, 60 (2014) 265-275.
- [15] S. Xu, J. Liu, Q. Li, Mechanical properties and microstructure of multi-walled carbon nanotube-reinforced cement paste, *Construction and Building Materials*, 76 (2015) 16-23.
- [16] B. Wang, Z. Guo, Y. Han, T. Zhang, Electromagnetic wave absorbing properties of multi-walled carbon nanotube/cement composites, *Construction and Building Materials*, 46 (2013) 98-103.
- [17] S. Samchenko, O. Zemsikova, I. Kozlova, Stabilization of carbon nanotubes with superplasticizers based on polycarboxylate resin ethers, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 87(12) (2014) 1872-1876.
- [18] L. Vaisman, H.D. Wagner, G. Marom, The role of surfactants in dispersion of carbon nanotubes, *Advances in colloid and interface science*, 128 (2006) 37-46.
- [19] H. Wang, Dispersing carbon nanotubes using surfactants,

توجه به اینکه با افزایش مقدار فوق روان کننده به خاک روند تغییر مقاومت خاک به گونه‌ای است که با افزایش مقدار فوق روان کننده پلی کربوکسیلاتی ابتدا مقاومت خاک افزایش پیدا می کند و سپس با اضافه کردن مقدار بیشتری از این ماده مقاومت خاک کاهش پیدا می کند، در نتیجه می توان گفت که مقدار سورفکتانت نیز مقدار بهینه‌ای دارد. از آنجایی که مقدار فوق روان کننده اضافه شده هر دو مورد خاک و نانولوله‌ها را تحت تأثیر قرار می دهد بنابراین هم باید بتواند نانولوله‌ها را پراکنده بکند و هم مقدار بهینه سورفکتانت را تأمین بکند.

۳. با بررسی تأثیر توأمان درصدهای مختلف سورفکتانت و سطوح متفاوت انرژی فراصوتی به ترتیب مقاومت خاک سیلتی در تنش‌های  $0.076 \text{ kg/cm}^2$ ،  $0.38 \text{ kg/cm}^2$  و  $0.19 \text{ kg/cm}^2$  به مقدار  $17/66$  درصد و  $21$  درصد و  $53$  درصد بهبود یافته است.
۴. با مطالعه تأثیر توأمان انرژی فراصوتی و سورفکتانت، بیشترین مقدار مقاومت برشی خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این مطالعه به ترتیب در تنش‌های  $1/52$  و  $0.76$  و  $0.38$  کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ترتیب  $13/23$  درصد و  $26$  درصد و  $26/33$  درصد افزایش می یابد.
۵. با بهینه کردن انرژی فراصوتی ( $500$  ژول بر میلی لیتر که این مقدار مستقل از نوع خاک است) و مقدار سورفکتانت ( $1$  درصد برای خاک ماسه‌ای و  $1/5$  درصد برای خاک سیلتی) استفاده از نانولوله کربنی در بهترین حالت برای خاک سیلتی  $21$  درصد و برای خاک ماسه‌ای  $19/7$  درصد مقاومت برشی افزایش می یابد.

### مراجع

- [1] M.Y. Fattah, M.M. Al-Ani, M.T. Al-Lamy, Studying collapse potential of gypseous soil treated by grouting, *Soils and Foundations*, 54(3) (2014) 396-404.
- [2] K. McManis, M. Nataraj, B.G. Barbu, Identification and stabilization methods for problematic silt soils, University of New Orleans. Department of Civil and Environmental Engineering, 2001.
- [3] M. Ali, Identifying and analyzing problematic soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(3) (2011) 343-350.
- [4] S.H. Bahmani, B.B. Huat, A. Asadi, N. Farzadnia, Stabilization of residual soil using  $\text{SiO}_2$  nanoparticles and cement, *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 350-359.
- [5] F. Sariosseiri, B. Muhunthan, Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils, *Engineering geology*, 104(1-2) (2009) 119-125.
- [6] M. Sadrjamali, S.M. Athar, A. Negahdar, Modifying soil shear strength parameters using additives in laboratory

- [25] M. Dadouch, M.S. Ghembaza, N.-S. Ikhlef, Study in laboratory of treatment with cement of silty material: improvement of the mechanical properties, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(7) (2015) 4329-4336.
- [26] M. Ibragimov, Soil stabilization with cement grouts, *Soil mechanics and foundation engineering*, 42(2) (2005) 67-72.
- [27] H. MolaAbasi, I. Shooshpasha, Prediction of zeolite-cement-sand unconfined compressive strength using polynomial neural network, *The European Physical Journal Plus*, 131(4) (2016) 108.
- [28] R. Papa, M. Ramondini, Soil deep mixing by small equipment, in: *Grouting and Deep Mixing 2012*, 2012, pp. 400-409.
- [29] S. Rios, A.V. Da Fonseca, B.A. Baudet, On the shearing behaviour of an artificially cemented soil, *Acta Geotechnica*, 9(2) (2014) 215-226.
- [30] K. Tariq, T. Maki, Mechanical behaviour of cement-treated sand, *Construction and Building Materials*, 58 (2014) 54-63.
- [31] Y. Yi, X. Zheng, S. Liu, A. Al-Tabbaa, Comparison of reactive magnesia-and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil, *Applied Clay Science*, 111 (2015) 21-26.
- [32] A.S. Zaimoglu, T. Yetimoglu, Strength behavior of fine grained soil reinforced with randomly distributed polypropylene fibers, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1) (2012) 197-203.
- Current Opinion in Colloid & Interface Science, 14(5) (2009) 364-371.
- [20] P.C. Association, *Soil-cement laboratory handbook*, Portland Cement Assoc., 1956.
- [21] O. Mendoza, G. Sierra, J.I. Tobón, Influence of super plasticizer and Ca(OH)<sub>2</sub> on the stability of functionalized multi-walled carbon nanotubes dispersions for cement composites applications, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 771-778.
- [22] G. Filz, D. Hodges, D. Weatherby, W. Marr, Standardized definitions and laboratory procedures for soil-cement specimens applicable to the wet method of deep mixing, in: *Innovations in Grouting and Soil Improvement*, 2005, pp. 1-13.
- [23] O. Bandehzadeh, M. Davoudi, M. Astaneh, Study of the Effect of Lime and Percentage of Lime and Flyash Aggregate on the Physical and Mechanical Properties of Fine Grained Soils, *Modares Civil Engineering journal*, 11(3) (2011) 0-0 (In Persian).
- [24] v. Baghbanpur Khoei, j. behmanesh, The Effect of Cement and microsilica on the Geotechnical Properties of Silty Soils (Soil Case Study: Khoy Industrial Town), in: *Second National Conference on Soil Mechanics and Pioneering*, Qom University of Technology, 2012 (In Persian).

Please cite this article using:

A.R. Negahdar, B. Zareei, Effect of Ultrasonic Energy and Multiwall Carbon-nanotube on the Shear Strength of Problematic Soils, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 485-498.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12470.5219



