

بررسی رفتار برشی ماسه کربناته جزیره خارک در حالت سیمانی سازی شده به صورت شبه طبیعی

محمد رضا آروین*، علی معصومی، محسن اژدری

دانشکده مهندسی، دانشگاه فسا، فارس، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۷
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

کلمات کلیدی:

ماسه کربناته
سیمانی سازی شبه طبیعی
آزمایش برش مستقیم
مقاومت برشی
جزیره خارک

خلاصه: در این پژوهش به بررسی تاثیر سیمانی شدن طبیعی بر رفتار برشی ماسه کربناته جزیره خارک پرداخته شده است. بدین منظور از یک روش شبیه سازی سیمانی شدن خاک در طبیعت برای سیمانی سازی کردن نمونه های این خاک استفاده گردید. اهمیت این روش سیمانی سازی در قابلیت آن به عنوان جایگزینی برای نمونه های دست نخورده سیمانی شده طبیعی است که در عمل به دست آوردن آن ها سخت و پرهزینه است. نمونه های سیمانی سازی شده با این روش و نمونه های غیر سیمانی با استفاده از آزمایش برش مستقیم تحت برش قرار گرفته و نتایج با هم مقایسه و تحلیل گردیدند. همچنین تاثیر متغیرهای مدت زمان عمل آوری ماسه سیمانی شده و درصد تراکم بر رفتار برشی ماسه این محل بررسی شد. مشاهده گردید که سیمانی کردن ماسه خارک باعث افزایش مقاومت به ویژه در تنش های قائم بزرگتر و همچنین کاهش تمایل به اتساع گردید. سیمانی کردن خاک باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی گردید در حالی که مشاهده گردید که با سیمانی شدن، چسبندگی خاک میتواند افزایش یا کاهش یابد و یا بدون تغییر بماند. افزایش زمان عمل آوری خاک سیمانی شده خارک همواره باعث افزایش قابل توجه چسبندگی و تغییر ناچیز در زاویه اصطکاک داخلی آن گردید. همچنین مشاهده گردید که افزایش تراکم خاک سیمانی شده خارک میتواند منجر به کاهش، افزایش و یا بدون تغییر ماندن چسبندگی آن شود در حالی که عمدتاً باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی آن می گردد. عوامل محتمل در ایجاد تغییرات یاد شده معرفی شده و تاثیر هر یک از آن ها بررسی گردید.

۱- مقدمه

نهشته های کربناتی عمدتاً ناهمگن هستند [۱]. این مسئله باعث بروز مشکلات زیاد در پیش بینی رفتار سازه های ژئوتکنیکی احداث شده در این خاک ها می شود. به عنوان مثال، هر چند مقاومت خاک های کربناته در برابر روانگرایی به دلیل تفاوت در دانه بندی و هندسه ذرات، در حالت کلی بیش از خاک های کوارتزی است، نمونه هایی از خرابی های ناشی از روانگرایی سازه های قرار گرفته بر روی خاک های کربناته طی زلزله های گوام در سال ۱۹۹۳، زلزله هاوایی در سال ۲۰۰۶ و هائیتی ۲۰۱۰ گزارش شده است [۲]. لزوم ساخت و ساز در مناطق ساحلی پوشیده از ماسه کربناته و تفاوت های خاص این نوع خاک با خاک سیلیکاته منجر به آغاز تحقیقات در این زمینه از اوائل دهه شصت میلادی شد. تحقیقات در زمینه رفتار این گونه خاک ها را می توان به مقایسه رفتار خاک

درصد قابل توجهی از مناطق ساحلی دنیا و ایران از خاک های کربناته تشکیل شده است. ماده اصلی تشکیل دهنده خاک های کربناته، کربنات کلسیم (CaCO_3) است. خاک های کربناته نسبت به خاک های سیلیکاته دارای شکل نامنظم تر، جنس ضعیف تر، تخلخل بین دانه ای و درون دانه ای زیادتر و شکنندگی و قابلیت فشردگی بالاتر به ویژه ناشی از خردشدگی هستند. درجه سیمان شدگی این خاک ها بسیار متغیر (غیر سیمانی تا به شدت سیمانی) است. از این رو، نوع دانه ها، منحنی دانه بندی و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی این خاک ها مانند مقاومت، قابلیت فشردگی و نفوذپذیری دارای تغییرات زیاد در فواصل مکانی کوتاه می باشد. در واقع می توان گفت که

* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.r.arvin@fasau.ac.ir



کربناته و سیلیکاته در حالت غیر سیمانی، رفتار ماسه کربناته غیر سیمانی، مقایسه رفتار ماسه های سیلیکاته و کربناته سیمانی شده و پارامترهای موثر بر رفتار ماسه کربناته سیمانی شده گروه بندی کرد. همچنین تحقیقات فراوانی برای بررسی عملکرد سازه های ژئوتکنیکی واقع در خاک های کربناته مانند پی ها [۴ و ۳] و شمع ها [۶ و ۵]، انجام شده است.

براندس با انجام آزمایش های برش ساده مونوتونیک (ASTM D6۲۵۸) و سیکلیک (ASTM D۸۲۹۶) بر نمونه های خاک کوارتز و کربناته غیر سیمانی به مقایسه این دو خاک از نظر سختی، مقاومت و رفتار تحت بار تناوبی پرداخت [۲]. او نتیجه گرفت که زاویه اصطکاک داخلی خاک های کربناته نسبت به خاک های کوارتزی بزرگ تر است. همچنین زاویه اصطکاک داخلی خاک های کربناته در محیط های آبی کم عمق، کمتر از محیط های آبی عمیق تر است. زاویه اصطکاک داخلی هر دو خاک کوارتز و کربناته در تنش های همه جانبه بزرگ تر، کاهش می یابد که این کاهش در خاک های کربناته به دلیل سختی کمتر و حفرات درون دانه ای، بیشتر است. سافینوس و همکاران رفتار برشی خاک های سیلیکاته و کربناته را با انجام آزمایش های برش ساده بر نمونه های این دو خاک و آزمایش سانتریفیوز بر اسپادکن های واقع بر این دو خاک مشاهده کردند که اتساع در خاک های کربناته به شدت به میزان فشار همه جانبه وابسته است. به گونه ای که رفتار اتساعی حتی در تراکم های کم و فشار همه جانبه پایین در این خاک ها دیده می شود که حاکی از میزان بالای قفل و بست بین دانه ای در این خاک ها است و از طرفی با افزایش فشار همه جانبه، اتساع به سرعت کاهش یافته و در فشارهای نسبتاً پایین کاملاً از بین می رود که دلیل آن خردشدگی دانه های کربناته تحت فشار همه جانبه است [۷]. تاثیر دانه بندی، درصد رطوبت، تراکم و نوع کانی بر ویژگی های برشی خاک کربناته غیر سیمانی سواحل جنوبی چین و همچنین خاک کوارتزی توسط ژین ژی و همکاران با انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ مقیاس بررسی گردید و نتایج با هم مقایسه شد [۸]. همچنین شانگ و همکاران با انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ مقیاس، رفتار شن های کربناته و کوارتزی را با هم مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که از یک متوسط اندازه دانه بزرگ تر، پوش گسیختگی این دو نوع شن به صورت دو خطی می باشد [۹].

کوپ و همکاران با انجام آزمایش های برش حلقه بر خاک های

کربناته غیرسیمانی نتیجه گرفتند که حالت بحرانی مبتنی بر توقف تغییر حجم یک وضعیت گذرا در این گونه خاک ها است که ناشی از خنثی شدن افزایش حجم حاصل از جابجایی دانه ها نسبت به هم توسط کاهش حجم حاصل از شکست دانه ها می باشد [۱۰]. این یافته توسط حسنلوراد و همکاران نیز تایید شد [۱۱]. همچنین کوپ و همکاران نتیجه گرفتند که حالت بحرانی حاصل از آزمایش سه محوری را احتمالاً نمی توان برای یافتن ظرفیت باربری سازه های ساخته شده بر این خاک ها استفاده کرد چرا که با افزایش جابجایی (به ویژه در خاک کنار شمع های کوبشی)، خاک حتی پس از حالت بحرانی گذرا نیز به کاهش حجم ناشی از خرد شدن دانه ها ادامه می دهد، هر چند که این کاهش حجم بر مقاومت بسیج شده تاثیری نمی گذارد [۱۰]. زاویه اصطکاک داخلی در خاک های کربناته از سه عامل اصطکاک بین دانه ها، اتساع دانه ها و خرد شدن دانه ها تاثیر می گیرد که افزایش فشار همه جانبه باعث کاهش اثر عامل اتساع دانه ها و افزایش تاثیر عامل خردشدگی دانه ها می شود [۱۱]. آقاجانی و صالحزاده تاثیر ناهمسانی بر رفتار برشی خاک غیرسیمانی کربناته بوشهر را با انجام آزمایش های پیچش استوانه تو خالی بررسی کردند [۱۱]. همچنین، وانگ و همکاران به بررسی نفوذپذیری خاک های کربناته غیرسیمانی در دانه بندی و نسبت های منافذ (تراکم های) مختلف پرداختند [۱۳]. هوزن وی و همکاران با انجام آزمایش های برشی حلقه بر خاک های کربناته سیمانی نشده به بررسی دقیق تشکیل باند برشی، خردشدگی دانه ها در سطح تنش های مختلف و حساسیت آن به دانه بندی اولیه و نرخ برش اولیه پرداختند [۱۴]. همچنین، تاثیر تغییرات در شکل دانه های خاک کربناته ناشی از خردشدگی در اثر فشار و برش بر رفتار مکانیکی این خاک ها توسط ژانگ و همکاران با استفاده از آزمایش برش حلقه بررسی گردید [۱۵]. خواص مقاومتی خاک کربناته غیر سیمانی مرکز ایران توسط هوایی و همکاران با استفاده از یک دستگاه برش مستقیم ابداعی که قابلیت استفاده در محل را دارد بررسی گردید [۱۶]. همچنین شاه نظری و همکاران ویژگی های مکانیکی خاک کربناته غیر سیمانی جزیره هرمز را با استفاده از آزمایش های سه محوری مونوتونیک و سیکلیک مطالعه کردند [۱۷]. تاثیر اندازه دانه ها، دانه بندی، تراکم نسبی و تنش قائم بر رفتار برشی شن های کربناته غیرسیمانی با استفاده از آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس توسط شانگ و همکاران بررسی

می شود و به دلیل ایجاد پیوند بین سطوح تماس دانه ها باعث افزایش چسبندگی خاک میشود [۲۳]. آن‌ها نتیجه گرفتند که ویژگی های مکانیکی ماسه های کربناته و سیلیکاته با هر تزریق به شدت بهبود یافت در حالی که نسبت منافذ و نفوذپذیری کاهش ناچیزی داشت [۲۲]. هانگ و آیری با انجام آزمایش های سه محوری به بررسی تاثیر میزان تراکم و درصد سمناسیون بر ویژگی های فیزیکی و رفتار فشاری و سختی خاک های کربناته سیمانی شده پرداختند [۲۴]. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش تراکم و میزان سیمان شدگی باعث افزایش سختی و مقاومت می شود ولی با افزایش تراکم از میزان این تاثیر نسبی کاسته می شود. آن‌ها نتیجه گرفتند که ساختن نمونه ای سیمانی شده با سختی، بافت و دانه بندی مشابه با خاک سیمانی سازی شده طبیعی بسیار مشکل است. بنابراین برای تعمیم نتایج این پژوهش با خاک سیمانی سازی شده طبیعی بایستی محتاطانه عمل کرد. اسماعیل و همکاران با انجام آزمایش های سه محوری به بررسی تاثیر نوع سیمان (کلسیت با روش CIPS، سیمان پرتلند و گچ) بر رفتار مکانیکی خاک های کربناته فرا ساحلی (offshore) پرداختند [۲۳]. ژائو و همکاران از روش بایوسمناسیون برای سیمانی سازی ماسه کربناته استفاده کرده و تاثیر میزان سیمانی سازی و تراکم نسبی بر رفتار برشی سیکلیک این خاک را با استفاده از آزمایش سه محوری سیکلیک بررسی کردند [۲۵]. بررسی نمونه ها با میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده مکانیزم پیوندی متفاوت برای هر یک از عوامل سیمانی بود. گراین و همکاران با انجام آزمایش های برش مستقیم بر خاک کربناته مخلوط شده با مواد سیمانی و خاک های کربناته با افزودنی ماسه سیلیکاته تاثیر این دو عامل بر میزان شکست دانه ها را بررسی کردند [۲۶]. مهم ترین تاثیر افزودن سیمان و ماسه سیلیکاته، کاهش شکست دانه ها می باشد که منجر به کاهش تراکم در هنگام برش می شود. همچنین، بیشینه مقاومت در برابر شکست دانه ها زمانی ایجاد می شود که هم سیمان و هم ماسه سیلیکاته به خاک کربناته افزوده شود و در متراکم ترین حالت مخلوط شوند. حسنلواد و همکاران با انجام آزمایش های سه محوری تحکیم شده زهکشی نشده به بررسی تاثیر پارامترهای موثر رفتار برشی ماسه کربناته سیمانی شده (با تزریق دوغاب کربنات) پرداختند [۲۷]. این پارامترها شامل مقاومت دوغاب سیمان (ضعیف، متوسط و قوی)، دانسیته اولیه خاک، فشار همه جانبه، نرخ بارگذاری و ویژگی های فیزیکی خاک

گردید و چسبندگی ظاهری نسبتاً زیاد ناشی از خاصیت اتساع شن کربناته گزارش گردید [۹].

سیمانی شدن یا به طور طبیعی صورت می گیرد یا به صورت مصنوعی به عنوان روشی برای بهبود ویژگی های خاک به کار می رود. ویژگی های یک خاک سیمانته شده متأثر از ویژگی های خاک پایه، چگونگی سیمانی شدن خاک (یا روش سیمانی کردن خاک به طور مصنوعی) و ویژگی های ماده همبند (ماده سیمان) دارد [۱۸]. سمناسیون هم در حفره های درون ذره ای و هم در حفره های بین ذره ای می تواند رخ دهد اما سمناسیون بین ذره ای است که مهم می باشد [۱۹].

در مورد تاثیر سیمان بر رفتار خاک های کوارتزی پژوهش های گوناگونی انجام شده است. لد و اورتون با انجام آزمایش های سه محوری زهکشی شده بر نمونه های ماسه سیلیکاته متراکم غیرسیمانی، ترکیب خاک و سیمان و ملات به مقایسه رفتار این مصالح اصطکاکی به ویژه در فشارهای همه جانبه زیاد پرداختند [۲۰]. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش درصد سیمان باعث افزایش چسبندگی، مقاومت کششی و زاویه اصطکاک داخلی در فشارهای همه جانبه کم می شود و پوش گسیختگی خاک های سیمانی شده انحنای قابل توجهی دارد. آجرلو و همکاران با انجام آزمایش های سه محوری تحکیم شده زهکشی شده بر نمونه های ماسه سیلیکاته سیمانی شده با سیمان پرتلند، آهک و گاز کربنات به بررسی تاثیر زمان عمل آوری و سنجش میزان تاثیرگذاری سیمان بر رفتار تنش کرنش، سختی و مقاومت برشی خاک سیمانی شده پرداختند [۲۱]. آن‌ها نتیجه گرفتند که رفتار تنش-کرنش و سختی و مقاومت ماسه سیمانی شده قویاً از تنش همه جانبه موثر و مقدار سیمان تاثیر می گیرد.

رفتار خاک های کربناته سیمانی از جنبه های مختلف مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از جمله این جنبه ها می توان به تاثیر روش سیمانی سازی، زمان عمل آوری سیمان، نوع سیمان و تاثیر ویژگی های فیزیکی ماسه کربناته اشاره کرد. بهبود رفتار مکانیکی خاک های سیلیکاته و کربناته پس از سیمانی شدن به روش CIPS با انجام آزمایش های برش مستقیم، فشاری محصور نشده و سه محوری توسط کوچارسکی و همکاران انجام شد [۲۲]. روش CIPS یک روش سیمانی سازی مصنوعی است که با پاشش ترکیبی از یک محلول رقیق با پایه آب، خنثی و غیر کلوخه شده بر سطح ماسه انجام

که منافذ به صورت جزیی و یا موقتاً با آب دریا پر می شوند مواد سیمانی به صورت ناهمگن در بین ماسه ها و یا سنگ ها پراکنده می گردند و در نزدیکی نقاط تماس دانه ها ته نشین شده و باعث پدیده سمنتاسیون می شوند.

کربنات کلسیمی که در سواحل به دلیل تبخیر متناوب آب دریا و جذر و مد پیوسته و ... موجود است در اثر یورش امواج بلند و طوفان تشکیل مخلوط CaCO_3 داده و با ورود CO_2 هوا به داخل این مخلوط موجب حل شدن و اشباع محلول از کربنات کلسیم شده و با غلتیدن امواج بر روی یکدیگر و حرکت به سمت ساحل و حبس هوا محلول فوق اشباع شده و شرایط را برای سیمانی سازی مساعد می نماید. پس از برخورد محلول فوق اشباع مذکور با دانه های خاک های کربناته موجب ته نشینی کربنات کلسیم بر روی دانه های خاک می شود. سیمانی شدگی بلافاصله پس از ته نشینی کربنات کلسیم رخ می دهد مگر اینکه فشار آب خیلی زیاد بوده و یا ماسه ها دائماً در حال حرکت باشند. در مناطقی که نفوذپذیری خاک کم باشد، بر اثر ویژگی موئینگی، آب دریا در کنار دانه ها قرار گرفته سرعت سیمانی سازی را افزایش می دهد. از طرفی اگر نفوذ پذیری خاک زیاد باشد به علت محبوس شدن حباب هوا در بین منافذ، سرعت این پدیده کاهش می یابد.

زمانی که منافذ با آب دریا پر شوند سیمانی سازی به طور همگن در حاشیه دانه های ماسه ادامه می یابد. ضخامت سیمانی سازی در روی دانه ها کم و بیش یکسان است اما لایه های سیمانی شده ممکن است بر روی یکدیگر قرار گیرند و به صورت تصادفی به یکدیگر پیوسته و تا کیلومترها ادامه یابند. ضخامت این لایه ها از چند میلی متر تا شصت سانتی متر متغیر است اما لایه های ضخیم تر زمانی حاصل می گردند که زمان و شرایط مناسب باشد و رسوب گذاری مداوم رخ دهد [۱۹].

به منظور مدل کردن سمنتاسیون در آزمایشگاه (سیمانی سازی مصنوعی) بایستی شرایط تا حد امکان شبیه آنچه که در طبیعت اتفاق می افتد باشد. در این پژوهش از روش ارائه شده توسط مولنار و ونماس برای شبیه سازی سیمان سازی طبیعی در آزمایشگاه استفاده شده است [۱۹]. بدین منظور، محلول فوق اشباع کربنات کلسیم را آماده نموده و با قرار دادن نمونه در آن روند سیمانی سازی شکل می گیرد. از آنجا که آهک در آب به میزان کمی حل می گردد، در

(دانه بندی، شکل دانه ها، نسبت منافذ و بافت) بودند. آن ها نتیجه گرفتند که پیوند ضعیف سیمانی (دوغاب ضعیف) تاثیر چندانی بر رفتار برشی ماسه کربناته سیمانی شده ندارد و در این حالت عملاً اصطکاک بین دانه هاست که مقاومت خاک را ایجاد می کند. پیوند متوسط سیمانی (دو غاب متوسط) باعث بهبود مقاومت و رفتار برشی خاک ناشی از افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک می شود که این هر دو ناشی از مقاومت دوغاب می باشد و سهم هر یک بستگی به میزان تنش هم جانبه و خواص فیزیکی ماسه دارد. آنها نتیجه گرفتند که معیار موهر-کولمب را می توان برای بیان تسلیم (از بین رفتن پیوندهای سیمانی) و گسیختگی خاک کربناته سیمانی شده به کار برد.

در محیط های دریایی، به طور طبیعی درجه سمنتاسیون خاک با عمق کاهش می یابد و میزان آن در عرض می تواند بسیار متغیر باشد. به دلیل هزینه های زیاد تحقیقات ژئوتکنیکی در زیر آب و تهیه نمونه دست نخورده ماسه سنگ برای برآورد قیمت در مناقصات لایروبی کف دریا برای شرکت های پیمانکار، مولنار و ونماس، با تشریح چگونگی سیمانی شدن خاک های کربناته در محیط های دریایی، روشی برای ساخت نمونه های خاک کربناته سیمانی شده مشابه با آنچه در طبیعت رخ می دهد ارائه دادند [۱۹]. در این پژوهش رفتار خاک کربناته سیمانی شده جزیره خارک با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی و تحلیل شده است. بدین منظور از روش سیمانی سازی طبیعی پیشنهاد شده توسط مولنار و ونماس [۱۹] استفاده شده است. تاثیر پارامترهای نسبت تراکم و زمان عمل آوری پس از سیمانی شدن بر پارامترهای مقاومت برشی و رفتار تغییر حجمی این ماسه در آزمایش ها دیده شده و با حالت غیر سیمانی شده مقایسه شده است.

۲- سمنتاسیون طبیعی و شبیه سازی آن در آزمایشگاه

سواحل کم عمق دریاهای مناطق حاره ای که عمدتاً عمقی کمتر از ۱۱ متر دارند محیط مناسبی برای روند سیمانی سازی طبیعی هستند. ماده سیمان طبیعی برای این روند، کربنات کلسیم و یا آرگونایت با درصد منیزیم بالا می باشد که هر دو در آب دریا وجود دارند. این مواد در روزنه ها و خلل و فرج دانه های خاک رسوب کرده و منجر به سیمانی سازی و ایجاد رسوبات متراکم می شوند. زمانی

مستقیم آورده شده است.

۳-۱- مصالح

در گام نخست، مقادیری از خاک جزیره خارک از نزدیک ساحل آن تهیه گردید. با انجام آزمایش دانه بندی بر این خاک مطابق با استاندارد ASTM C136 مشخص گردید که درصد ریزدانه (رد شده از الک ۲۰۰) آن کمتر از ۱٪ می باشد. همچنین مقادیر ضریب یکنواختی و ضریب انحنا خاک به ترتیب برابر با ۱/۵۱۲ و ۱/۰۳ به دست آمد. بنابراین مطابق با طبقه بندی متحده، نام این خاک SP می باشد. نمودار دانه بندی خاک جزیره خارک در شکل ۱ نشان داده شده است

مقدار D_{50} خاک خارک برابر با ۰/۶۶ میلی متر به دست آمد. تصویر این خاک در شکل ۲ نمایش داده شده است.

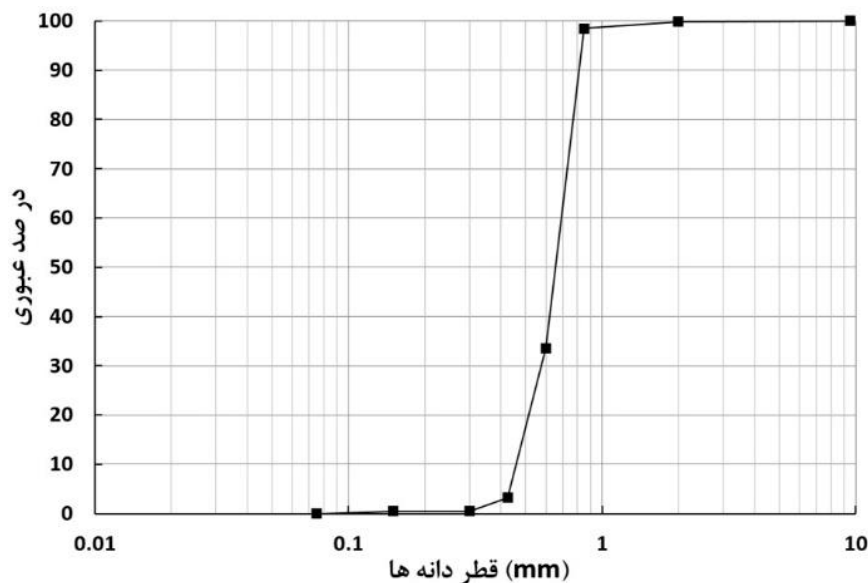
با انجام آزمایش پروکتور استاندارد (ASTM D698)، وزن حجمی خشک بیشینه و رطوبت بهینه ماسه خارک به ترتیب برابر با 16 kN/m^3 و ۱۳/۱٪ به دست آمد.

برای تعیین میزان کربنات موجود در خاک، روش های متفاوت آزمایشگاهی وجود دارد [۲۸] که از آن جمله روشی است که به علت سهولت و دقت بالا در این پژوهش استفاده شده است. در ابتدا نمونه های خاک به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد

ابتدا یک دوغاب به نسبت ۱۰:۱ آهک با آب مقطر تهیه گردیده سپس برای تبدیل این دوغاب (مخلوط) به محلول، گاز CO_2 درون دوغاب تزریق شده و جهت رسیدن به درجه اشباع مداوم هم زده می شود. سپس پیش از گذاشتن نمونه درون این محلول، محلول به درجه فوق اشباع رسانده می شود. بدین منظور گاز اکسیژن را به درون محلول وارد کرده و همزمان محلول هم زده می شود و از طرفی به جهت جلوگیری از لخته شدن کربنات کلسیم، PH محلول بین ۷/۳ تا ۷/۴ نگاه داشته می شود. در این هنگام بایستی نمونه را در محلول قرار داد تا روند سیمانی سازی درون نمونه یا نمونه ها انجام شود. هم زدن محلول در طی مراحل سیمانی سازی شبه طبیعی، به نوعی بازسازی نقش امواج دریا برای حرکت دادن کربنات کلسیم فوق اشباع محلول در آب دریا در بین ذرات خاک نیز می باشد.

۳- روش کار

هدف از این پژوهش بررسی مقاومت برشی خاک کربناته خارک با سیمان سازی طبیعی شبیه سازی شده در آزمایشگاه است. همچنین تاثیر نسبت تراکم و زمان عمل آوری پس از سیمانی سازی بر مقاومت برشی نیز بررسی گردیده است. در ادامه توضیحات مربوط به نوع خاک، ویژگی های فیزیکی خاک، روش نمونه سازی، روش سیمان سازی، چگونگی عمل آوری نمونه ها و در نهایت آزمایش برش



شکل ۱. نمودار دانه بندی خاک کربناته جزیره خارک

Fig. 1. Grain distribution curve of the carbonate sand of Khark Island



شکل ۲. نمایی از خاک کربناته جزیره خارک

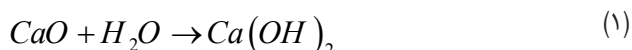
Fig. 2. Photographic view of the carbonate sand of Khark Island

دستگاه برش مستقیم ابداع و ساخته شد. این سلول مشابه با سلول اصلی دستگاه برش مستقیم است با این تفاوت که در درون آن محاط می شود. با استفاده از این سلول، می توان نمونه های خاک را در خارج از سلول اصلی دستگاه برش مستقیم ساخت و عمل آوری کرد و سپس با گذاشتن آن در درون سلول اصلی آن ها را تحت برش قرار داد. نکته مهم آن است که بدین ترتیب از دست خوردگی نمونه ها از زمان ساخت تا زمان انجام آزمایش برش مستقیم جلوگیری می شود. با توجه به هزینه نسبتاً پایین ساخت این سلول، تعداد زیادی از آن ساخته شد و همزمان تعداد زیادی نمونه سیمانی سازی و عمل آوری گردید. برای ساخت نمونه ها از روش ریزش ماسه استفاده گردید. در این روش مقداری ماسه با جرم متناظر با درصد تراکم مورد نظر از درون یک قیف که در ارتفاع مشخصی از سلول محاطی دستگاه برش مستقیم قرار داشت به درون آن ریخته شد. برای جلوگیری از پخش شدن ماسه به خارج از سلول، از یک منشور با سطح مقطع مربعی برابر با سطح مقطع سلول محاطی دستگاه برش مستقیم استفاده گردید. ارتفاع مناسب ریزش ماسه به درون سلول محاطی دستگاه

در گرم خانه نگهداری و خشک شده سپس مقداری از آن دقیقاً وزن گردیده و پس از نرم نمودن در هاون چینی، مقدار مناسبی اسید نیتریک یا اسید سولفوریک بر روی آن ریخته شده و با هم زدن متوالی و گرم کردن باعث حل شدن کربنات در اسید شده، سپس با گذراندن محلول حاصل از کاغذ صافی و وزن نمودن میزان باقی مانده روی کاغذ صافی و کسر نمودن از وزن اولیه، میزان ناخالصی و به تبع آن میزان کربنات خاک مشخص می گردید. با این روش، درصد کربنات خاک جزیره خارک ۹۰/۴ درصد تعیین گردید.

۳-۲- نمونه سازی

همه نمونه ها (غیر سیمانی و سیمانی سازی شده) می بایستی از زمان ساخت تا زمان انجام آزمایش برش مستقیم دست نخورده باقی می ماندند. یک روش بدیهی برای تحقق این مهم ساخت نمونه ها در درون سلول دستگاه برش مستقیم بود که با توجه به زمان های دو و هفت روزه برای عمل آوری و تعداد زیاد آزمایش ها، زمان انجام پروژه بسیار طولانی می شد. برای رفع این مشکل سلول محاطی



سپس آهک شکفته را به میزان مورد نیاز از الک شماره ۲۰۰ عبور داده و اقدام به تهیه دوغاب آهک به نسبت ۱۰ به ۱ شد. پس از آن دوغاب ساخته شده را به درون مخزن دستگاه منتقل کرده و ۶ عدد از نمونه ها را (برای ایجاد شرایط یکسان ۳ نمونه از خاک جزیره خارک با نسبت تراکم مشابه) بر روی چهار پایه مخصوص قرار داده و بالای سطح دوغاب ثابت نگاه داشته شد، درب بالایی مخزن را در جای خود قرار داده و همزن را با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه روشن کرده تا از ته نشینی آهک جلوگیری شود. در این هنگام با وارد کردن گاز CO_2 با فشار ثابت ۱۰۰ kPa برای زمان ۹۰ ثانیه به درون مخزن، دوغاب به حالت محلول اشباع در آمد. تزریق گاز CO_2 به محلول حاوی هیدروکسید کلسیم، با ایجاد واکنش شیمیایی زیر منجر به تشکیل کربنات کلسیم می گردد.



پس از سپری شدن زمان ۹۰ ثانیه شیر مخزن اول بسته شده و شیر مخزن اکسیژن باز گردید و با وارد شدن اکسیژن به مخزن، محلول به حالت فوق اشباع درآمد. در این هنگام pH محلول باید در حدود ۷/۳ تا ۷/۴ ثابت باشد. فوق اشباع کردن محلول به منظور شبیه سازی با رسوب گذاری محلول کربنات کلسیم بر روی سطح دانه های خاک در دریا و همچنین تسریع عمل رسوب گذاری انجام می شود. بلافاصله و به آهستگی چهار پایه حامل نمونه ها را آزاد نموده تا نمونه ها در درون محلول فوق اشباع جهت سیمانی سازی قرار گیرند و رسوب گذاری در بهترین شرایط انجام پذیرد. رسوب گذاری $CaCO_3$ بر روی دانه های ماسه باعث شروع سیمانی سازی در نمونه ها می شود. عملیات رسوب سیمان بر روی دانه های ماسه، به مدت ۵ دقیقه برای همه نمونه ها انجام شد. بعد از آن به نمونه های بیرون آورده شده برای انجام عمل آوری به دستگاه انکوباتور انتقال داده می شدند.

با توجه به اینکه مدت زمان انجام واکنش سیمانی سازی مطابق پیشنهاد اسماعیل و همکاران از ۶ تا ۴۸ ساعت متغیر است، ۴۸ ساعت فرصت داده شد تا فرآیند سیمانی سازی در آن ها تکمیل گردد

برش مستقیم برای رسیدن به درصد های تراکم نسبی مورد نظر در این پژوهش با آزمون و خطا بسته به میزان تراکم، بین ۴۰ تا ۶۰ سانتی متر به دست آمد.

۳-۳- سمنتاسیون و عمل آوری

برای شبیه سازی سیمان سازی طبیعی در آزمایشگاه، از دستگاهی که به منظور آماده سازی محلول فوق اشباع (مطابق با شرح بخش ۲) تهیه شد استفاده گردید. این دستگاه همان گونه که در شکل شماتیک ۳ مشخص است از قسمت های زیر تشکیل شده است:

الف) یک مخزن شیشه ای به شکل مکعب مستطیل به ابعاد $19 \times 25 \times 34$ سانتی متر که گنجایش ۱۶/۱ لیتر محلول را دارد.

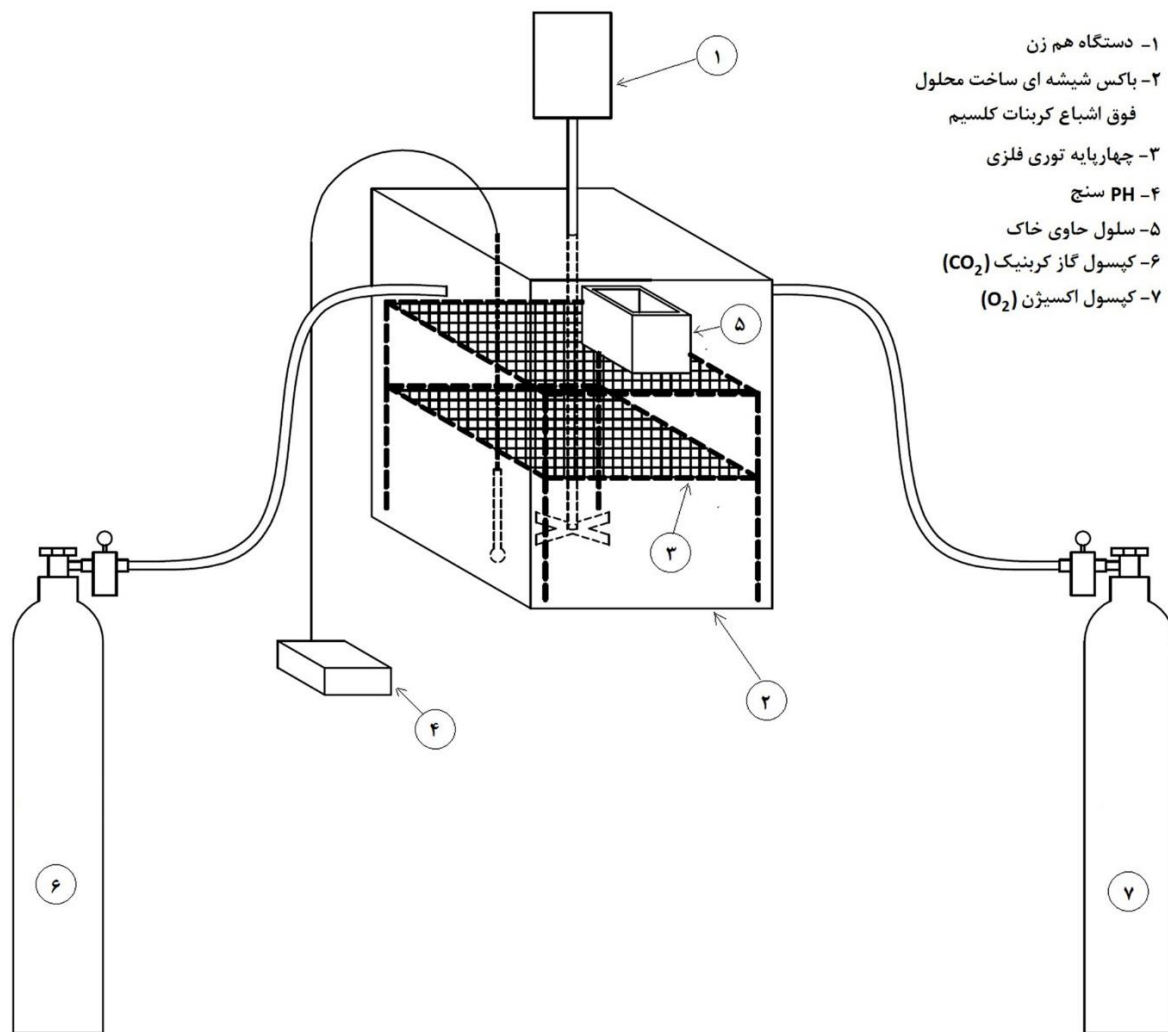
ب) یک دستگاه همزن خودکار به منظور شبیه سازی جریان آشفته امواج که دقیقاً در مرکز سطح بالایی مخزن قرار دارد.

ج) دو عدد کپسول اکسیژن و دی اکسید کربن در طرفین مخزن که هر کدام با دو شیر تنظیم توسط لوله های مربوطه به مخزن متصل است. این لوله ها تا کف مخزن ادامه داشته تا هنگام ورود گازها به داخل دوغاب با سطح بیشتری از دوغاب در تماس باشند. همچنین عملکرد شیر ها بدین گونه است که در هر طرف، شیر اول میزان فشار گاز را با انتقال فشار به نشان گر فشار تنظیم می نماید و شیر دوم میزان گاز با فشار تنظیمی مشخص را به درون مخزن دوغاب انتقال می دهد.

د) دستگاه pH سنج

ه) چهار پایه برای نگه داری قالب های ساخته شده در نمونه سازی با نسبت تراکم های متفاوت در درون محلول فوق اشباع

برای انجام عملیات سیمانی سازی در محیط آزمایشگاه مشابه سیمانی سازی طبیعی نیاز به حجم کافی از کربنات کلسیم بود تا پس از انحلال آن در آب و ساخت محلول فوق اشباع، نمونه ها در این محلول قرار گیرد و نهایتاً با رسوب $CaCO_3$ بر روی دانه های ماسه کربناته موجب سیمانی سازی نمونه ها شود. بنابراین ابتدا مقداری آهک زنده (CaO) را با رعایت شرایط ایمنی در میزان مناسبی آب قرار داده شد (واکنش آهک زنده با آب شدیداً گرما زا می باشد) تا به آهک شکفته، آب آهک یا هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ تبدیل شود. رابطه شیمیایی ساخت آب آهک به صورت زیر است:



شکل ۳. شماتیک دستگاه سمنتاسیون کربناتی ماسه کربناته

Fig. 3. Schematic view of the set used for cementation of the carbonate soil

سیمانی سازی شده در دستگاه انکوباتور به منظور عمل آوری آن‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

۳-۴- آزمایش برش مستقیم

برای انجام آزمایش برش مستقیم (ASTM D3080) از سلول مربعی ۶×۶ سانتی‌متر مربع استفاده گردید. خاک درون سلول تحت سه سربار قائم مختلف به اندازه های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفته و با اعمال کرنش ثابت افقی با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه، برای ایجاد شرایط زهکشی شده، به گسیختگی رسانده شدند. در حین انجام هر آزمایش، جابجایی‌های افقی و قائم و نیروی افقی در بازه های زمانی ۳۰ ثانیه ثبت گردیدند.

[۲۳] و پس از آن نمونه ها یا برای انجام آزمایش برش مستقیم آماده شده و یا به جهت دوره عمل آوری هفت روزه، پنج روز دیگر عمل آوری شدند و سپس آزمایش برش مستقیم بر آن‌ها انجام شد. کلیه مراحل عمل آوری، در دمای بین ۲۸ تا ۳۸ درجه (در اینجا ۳۳ درجه) با توجه به پیشنهاد شانگ و همکاران و درون دستگاه انکوباتور با میزان رطوبت کافی (برای همسان سازی با شرایط ساحلی مناطق حاره ای) انجام شد [۲۹]. تحت شرایط یاد شده، رطوبت نهایی همه نمونه های سیمانی سازی شده در حدود ۵٪ اندازه گیری شد (ASTM D2216). به منظور همسان سازی نمونه های غیر سیمانی با نمونه های سیمانی شده، رطوبت نمونه های غیر سیمانی نیز برای انجام آزمایش برش مستقیم به ۵٪ رسانده شد. تصویری از نمونه های

یاد شده، پیش از انجام برش مستقیم در دو زمان ۴۸ ساعت و یک هفته عمل آوری شدند تا تاثیر زمان عمل آوری بر مقاومت برشی آن‌ها تعیین گردد. خلاصه برنامه آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ آمده است. همانگونه که از این جدول مشخص است، در مجموع ۲۷ آزمایش برش مستقیم برای انجام پژوهش حاضر انجام شده است.

۴- برنامه آزمایش‌های تعیین مقاومت برشی

برای دیدن تاثیر درصد تراکم نسبی بر مقاومت برشی خاک کربناته خارک، نخست همه نمونه‌ها در حالت غیر سیمانی در سه نسبت تراکم اولیه ۸۵٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ ساخته شدند و سپس نمونه‌هایی که قرار بود سیمانی سازی شوند، به شرح داده شده در بخش ۳، سیمانی سازی شدند. همچنین نمونه‌های ساخته شده با نسبت تراکم‌های



شکل ۴. تصویر دستگاه سمنتاسیون کربناتی ماسه کربناته

Fig. 4. Photographic view of the set used for cementation of the carbonate soil



شکل ۵. سلول‌های حاوی نمونه‌های سیمانی سازی شده در دستگاه انکوباتور به منظور عمل آوری آنها

Fig. 5. Cells containing cemented samples inside the incubator for curing

جدول ۱. خلاصه آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده

Table 1. Summary of the performed direct shear tests

تعداد آزمایش	سر بار قائم (kPa)	درصد تراکم نسبی	زمان عمل آوری	وضعیت سیمانی- سازی	سری آزمایش
۹	۴۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰	۹۵، ۹۰، ۸۵	-	سیمانته نشده	۱
۹	۴۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰	۹۵، ۹۰، ۸۵	۴۸ ساعت	سیمانته شده	۲
۹	۴۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰	۹۵، ۹۰، ۸۵	یک هفته	سیمانته شده	۳

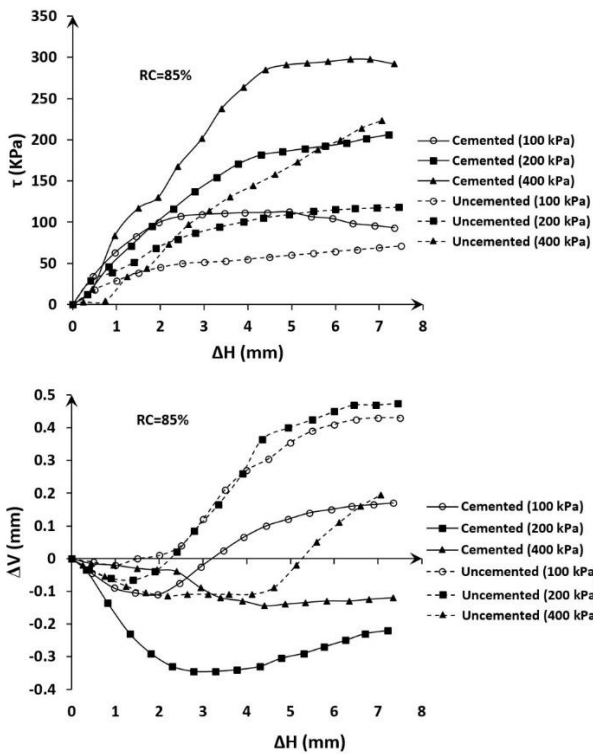
۵- تجزیه و تحلیل نتایج

۵-۱- تاثیر سیمانی سازی بر رفتار مقاومت برشی

برای بررسی سیمانی سازی بر رفتار خاک کربناته خارک، نمونه هایی از این خاک در تراکم های ۸۵، ۹۰ و ۹۵ درصد ساخته شد و طبق روش توضیح داده شده در بخش ۳-۳ سیمان سازی شد. سپس برخی از نمونه ها به مدت ۴۸ ساعت و برخی به مدت یک هفته در دستگاه انکوباتور عمل آوری شدند. شکل های ۶ و ۷ رفتار برشی ماسه های کربناته سیمانی سازی شده و به مدت ۴۸ ساعت عمل آوری شده خارک در مقایسه با حالت غیر سیمانی شده آن ها را در آزمایش برش مستقیم (زیر تنش های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال) را به ترتیب برای درصد تراکم های ۸۵% و ۹۰% نشان می دهند. همان گونه که نمودار تنش برشی-جابجایی افقی این خاک ها (شکل های ۶ و ۷) نشان می دهد، در حالت کلی در یک تنش قائم مشخص، خاک سیمانی سازی شده (خط های توپر) نسبت به حالت غیر سیمانی خود (خط چین) دارای مقاومت بالاتری می باشد. به عنوان نمونه، در خاک با درصد تراکم ۸۵% در جابجایی افقی ۴ میلی متر، سیمانی سازی باعث افزایش تقریبی ۱۰۳، ۷۰ و ۱۰۲ درصدی در مقاومت برشی خاک به ترتیب در تنش های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال شده است. همچنین در یک استثنا، خاک سیمانی سازی شده با درصد تراکم ۹۰% در تنش قائم ۱۰۰ kPa، دارای یک قله در تنش برشی می باشد که از مقاومت در جابجایی متناظر مربوط به همان خاک در تنش ۲۰۰ kPa نیز بزرگ تر است ولی در جابجایی های افقی بزرگ تر (حالت بحرانی)، این روند برعکس می شود (شکل ۷). پدیده یاد شده را می توان به تمایل بیشتر خاک به اتساع در تنش های قائم کوچک تر و در نتیجه کاهش مقاومت ناشی از صرف انرژی برای کاهش اتساع به جای افزایش مقاومت و در پی آن رخ دادن پدیده نرم شوندگی نسبت داد. با بررسی رفتار تغییر حجم ماسه خارک در تراکم های ۸۵% و ۹۰% (شکل های ۶ و ۷) با نگاه به منحنی جابجایی قائم (ΔV) در برابر جابجایی افقی (ΔH) آن ها مشخص است که فارغ از میزان تنش قائم وارده، در حالت کلی سیمانی سازی باعث ایجاد تمایل بیشتر به رفتار تراکمی در خاک شده است. به عنوان مثال خاک غیر سیمانی خارک با تراکم ۸۵% در تنش قائم ۴۰۰ kPa تا جابجایی افقی در حدود ۵/۲ میلی متر رفتار تراکمی و سپس رفتار اتساعی از خود نشان می دهد در حالی

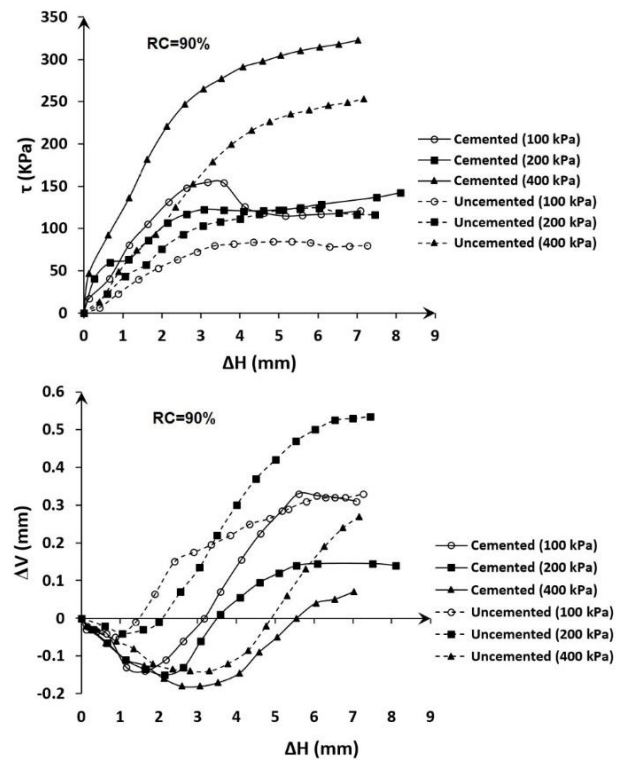
که پس از سیمانی شدن رفتاری کاملاً تراکمی در کل بازه جابجایی افقی وارد شده داشته است. در یک جمع بندی از رفتار مقاومتی و تغییر حجمی خاک های کربناته سیمانی شده و غیر سیمانی خارک می توان گفت که سیمانی شدن با ایجاد پیوند در نقاط تماس دانه ها، از یک سو باعث افزایش سختی و مقاومت خاک شده و از سوی دیگر از غلتش دانه ها نسبت به هم جلوگیری کرده و در نتیجه از اتساع خاک می کاهد. با از بین رفتن پیوندهای ناشی از سیمان کربناته با پیشرفت جابجایی های افقی، دانه های خاک اجازه غلتش بیشتری پیدا کرده و در نتیجه، رفتار تغییر حجمی خاک سیمانی شده به سمت اتساعی سوق می یابد. یکسان بودن تقریبی مقاومت تسلیم و گسیختگی در تنش های قائم کم و متوسط (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلو پاسکال) در تغییر شکل های بزرگ افقی در تراکم ۹۰% (شکل ۷) را می توان به افزایش امکان غلتش و در نتیجه اصطکاک بین دانه ای پس از از بین رفتن پیوندهای سیمانی از یک سو و کاهش مقاومت ناشی از خرد شدن دانه ها و همچنین از بین رفتن پیوندهای سیمانی از سوی دیگر نسبت داد. در فشار قائم ۴۰۰ kPa، تراکم زیاد خاک باعث افزایش تماس بین دانه ها و در نتیجه افزایش اصطکاک می شود که به نوعی منجر به جبران خردشدگی دانه ها و از بین رفتن پیوندهای سیمانی شده و مقاومت خاک از مقاومت حالت گسیختگی بیشتر می شود.

برای یافتن پارامترهای مقاومت برشی خاک های کربناته خارک، از مقاومت برشی در جابجایی افقی برابر با ۰/۱ طول نمونه خاک یعنی جابجایی ۶ میلی متر استفاده گردید. با این معیار، پوش موهر-کولمب در حالت های سیمانی سازی شده و غیر سیمانی سازی شده در شکل ۸-الف برای تراکم ۸۵% و در شکل ۸-ب برای تراکم ۹۰% ترسیم و قابل مقایسه با یکدیگر است. در تراکم ۸۵% در حالت سیمانی سازی شده، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب برابر با ۵۳ kPa و ۲۸/۹% و در حالت غیر سیمانی به ترتیب برابر با ۲۷/۶ kPa و ۲۰/۲% به دست آمده است. بنابراین در تراکم ۸۵% سیمانی سازی باعث دو برابر شدن چسبندگی و افزایش ۳۷% در زاویه اصطکاک داخلی شده است. اما در تراکم ۹۰% سیمانی سازی تقریباً تغییری در چسبندگی ایجاد نکرده (۲۲/۶ kPa) در حالت سیمانی سازی شده و ۲۲ kPa (در حالت غیر سیمانی) در حالی که زاویه اصطکاک را ۲۰% افزایش داده است (۳۱/۷% در حالت سیمانی سازی شده و ۲۵/۶% در حالت غیر سیمانی).



شکل ۶. تاثیر سیمانی سازی بر رفتار برشی ماسه کربناته خارک در آزمایش برش مستقیم نمونه های با تراکم ۸۵٪ و به مدت ۴۸ ساعت عمل آوری شده

Fig. 6. Effect of cementation on the shearing behavior of carbonate sand of the Khark (RC=85%, curing time=48 hours)

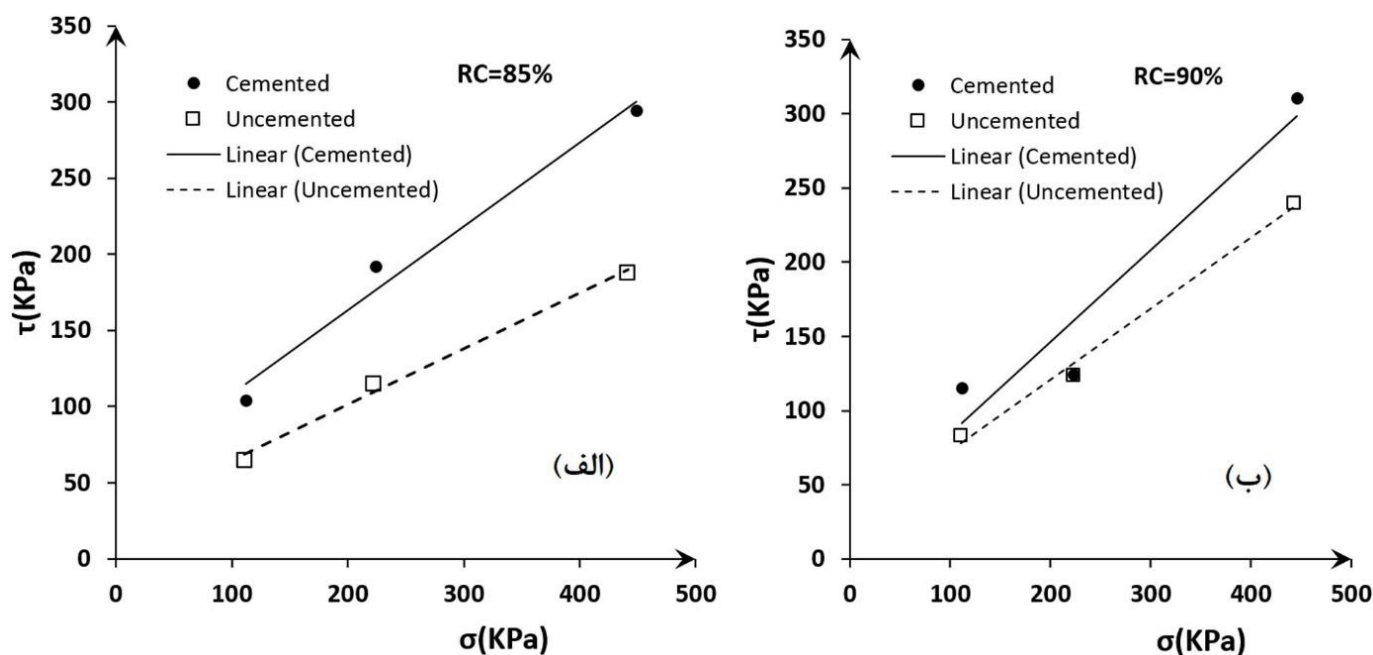


شکل ۷. تاثیر سیمانی سازی بر رفتار برشی ماسه کربناته خارک در آزمایش برش مستقیم نمونه های با تراکم ۹۰٪ و به مدت ۴۸ ساعت عمل آوری شده

Fig. 7. Effect of cementation on the shearing behavior of carbonate sand of the Khark (RC=90%, curing time=48 hours)

تاثیر این دو اثر، می‌توان انتظار داشت که چسبندگی خاک سیمانی سازی شده نسبت به حالت غیر سیمانی آن افزایش یا کاهش یابد و یا بدون تغییر بماند. بنابراین افزایش چسبندگی ماسه کربناته خارک در تراکم ۸۵٪ و عدم تغییر در چسبندگی در تراکم ۹۰٪ را می‌توان با استدلال بالا توجیه نمود. همچنین از آنجا که سیمانی سازی با کاهش نسبت منافذ خاک باعث افزایش تماس دانه ها با هم می‌شود، میزان زاویه اصطکاک خاک افزایش یافته است. همچنین همان گونه که شکل ۸-ب نشان می‌دهد، افزایش مقاومت ناشی از افزایش سربار قائم از ۱۰۰٪ به ۲۰۰٪ در خاک سیمانی سازی شده نسبتاً کم است. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه بیان کرد که از دو عامل ایجاد مقاومت در خاک یعنی اصطکاک و چسبندگی، اصطکاک با افزایش سربار قائم افزایش یافته ولی چسبندگی خاک سیمانی سازی شده با افزایش سربار قائم و در نتیجه کاهش نسبت منافذ در یک

برای تحلیل تغییر در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک در اثر سیمانی سازی می‌توان این‌گونه استدلال کرد: از آنجا که درصد رطوبت خاک (۵٪) از درصد رطوبت بهینه خاک (۱۳/۱٪) کوچک‌تر است پس خاک در حالت غیر اشباع قرار دارد. بنابراین می‌توان گفت که بخشی از چسبندگی خاک ناشی از غیر اشباع بودن آن است. سیمانی سازی خاک با کاهش نسبت منافذ خاک و در نتیجه افزایش درصد اشباع خاک، منجر به کاهش چسبندگی ناشی از غیر اشباع بودن خاک می‌شود. میزان کاهش چسبندگی ناشی از غیر اشباع بودن خاک (در یک درصد رطوبت ثابت)، با افزایش درصد تراکم خاک بیشتر است چرا که در این حالت افزایش بیشتری در درصد اشباع حاصل می‌شود. از طرف دیگر، سیمانی سازی با ایجاد پیوندهای سیمانی باعث ایجاد نوعی دیگر از چسبندگی می‌شود. به طور خلاصه، سیمانی سازی دو اثر متضاد در کاهش و افزایش چسبندگی دارد که با توجه به میزان



شکل ۸. پوش گسیختگی موهر-کولمب خاک کربناته خارک سیمانی سازی شده (با ۴۸ ساعت عمل آوری) در برابر حالت غیر سیمانی شده در حالت (الف) تراکم ۸۵٪ (ب) تراکم ۹۰٪

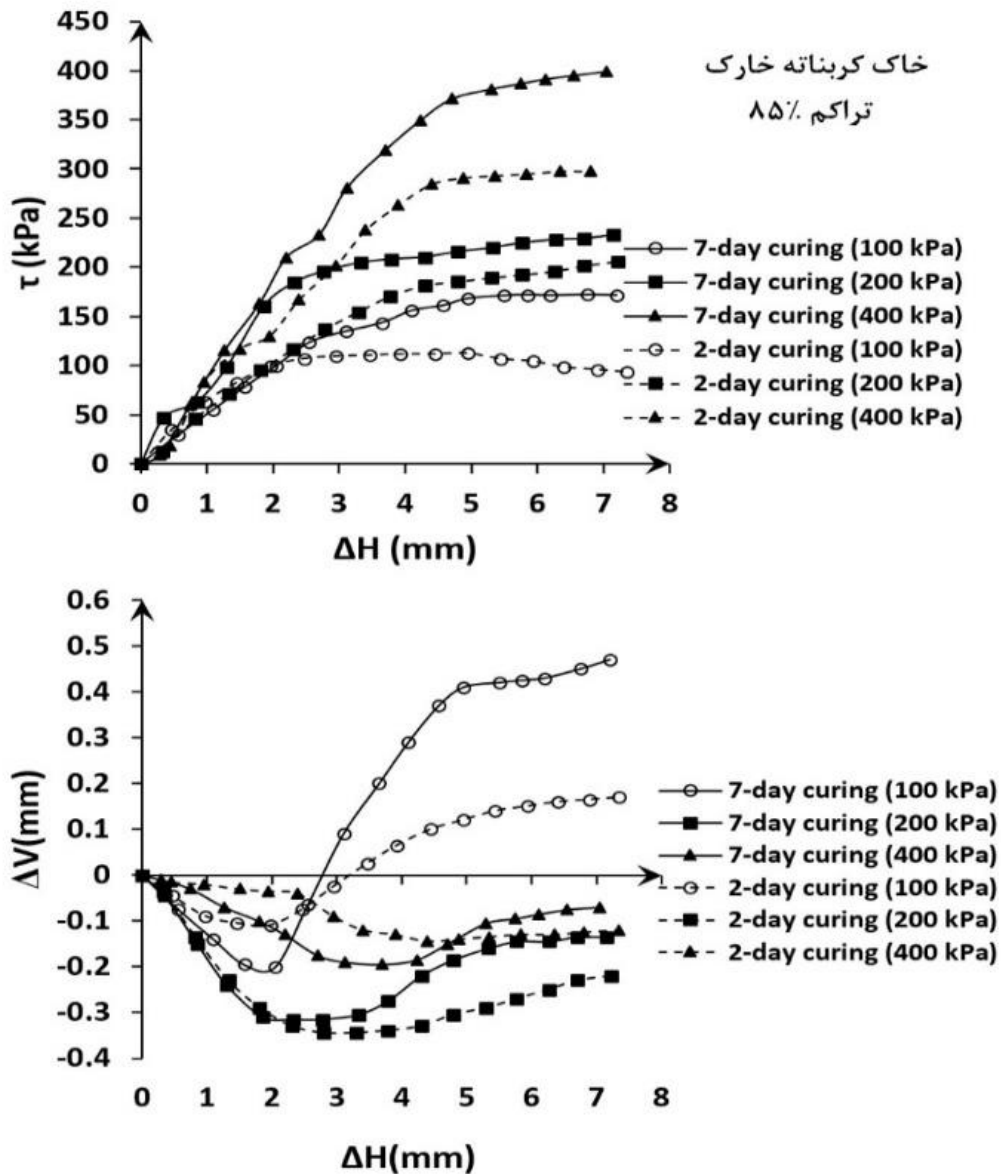
Fig. 8. Mohr-Coulomb failure envelope of the cemented Khark sand (2-day curing) against the uncemented situation (a) RC=85%, (b) RC=90%

و ۴۰۰ کیلوپاسکال) افزایش می یابد. به عنوان مثال افزایش مقاومت برشی بیشینه خاک با ۷ روز عمل آوری نسبت به ۲ روز عمل آوری در تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب ۵۳٪، ۱۳٪ و ۳۴٪ بوده است. این موضوع نشان دهنده افزایش تدریجی مقاومت پیوندهای سیمان کربناته در خاک‌های کربناته سیمانته شده در محیط‌های مرطوب است. رفتار تغییر حجمی خاک کربناته خارک در شکل ۹ نشان داده شده است گویای آن است که بر خلاف مقاومت که همواره با افزایش زمان عمل آوری روند افزایشی دارد، تغییر حجم خاک از الگوی ثابتی پیروی نمی‌کند. در بارهای قائم ۱۰۰ kPa و ۲۰۰ kPa با افزایش زمان عمل آوری از ۲ به ۷ روز، خاک تمایل به اتساع پیدا کرده است و در بار قائم ۲۰۰ kPa در بیشتر تغییر مکان‌های ۷ افقی تمایل به تراکم بیشتر شده است. از آنجا که عوامل گوناگونی چون مقاومت سنگدانه‌ها، مقاومت سیمان، سطح سیمانی سازی شده، مقاومت نسبی سنگدانه‌ها به مواد سیمان، نسبت منافذ اولیه خاک (نسبت تراکم)، میزان خرد شدگی دانه‌ها در اثر فشار قائم و میزان خرد شدگی دانه‌ها در اثر تنش افقی در تغییر حجم خاک در اثر فشار افقی مشارکت دارند، تعیین میزان اثر هر یک

درصد رطوبت ثابت کاهش می یابد. ترکیب این دو عامل متضاد بسته به میزان افزایش و کاهش مقاومت ناشی از هر یک از آن‌ها می تواند در یک سربار خاص (در اینجا ۲۰۰ kPa) افزایش کمی را در مقاومت نسبت به سربار کوچک‌تر (در اینجا ۱۰۰ kPa) باعث شود.

۵-۲- تاثیر زمان عمل آوری بر رفتار مقاومت برشی

برای دیدن تاثیر زمان عمل آوری بر رفتار برشی ماسه خارک، برای هر درصد تراکم در نظر گرفته شده (۸۵، ۹۰ و ۹۵ درصد) شش نمونه ساخته شده و برای کاهش خطا، هر شش نمونه به طور همزمان در دستگاه سیمانی سازی طبیعی سیمانی سازی شده و سپس در دستگاه انکوباتور برای عمل آوری قرار داده شدند. سه عدد از این نمونه‌ها را پس از ۴۸ ساعت و سه تای باقیمانده را پس از یک هفته از دستگاه انکوباتور خارج کرده و توسط دستگاه برش مستقیم گسیخته شدند. در شکل ۹ نتایج مربوط به تاثیر عمل آوری بر رفتار برشی ماسه کربناته خارک در تراکم ۸۵٪ نشان داده شده است. همان گونه که این شکل نشان می‌دهد، با افزایش زمان عمل آوری از دو روز به ۷ روز، مقاومت برشی خاک در همه فشارهای قائم (۱۰۰، ۲۰۰

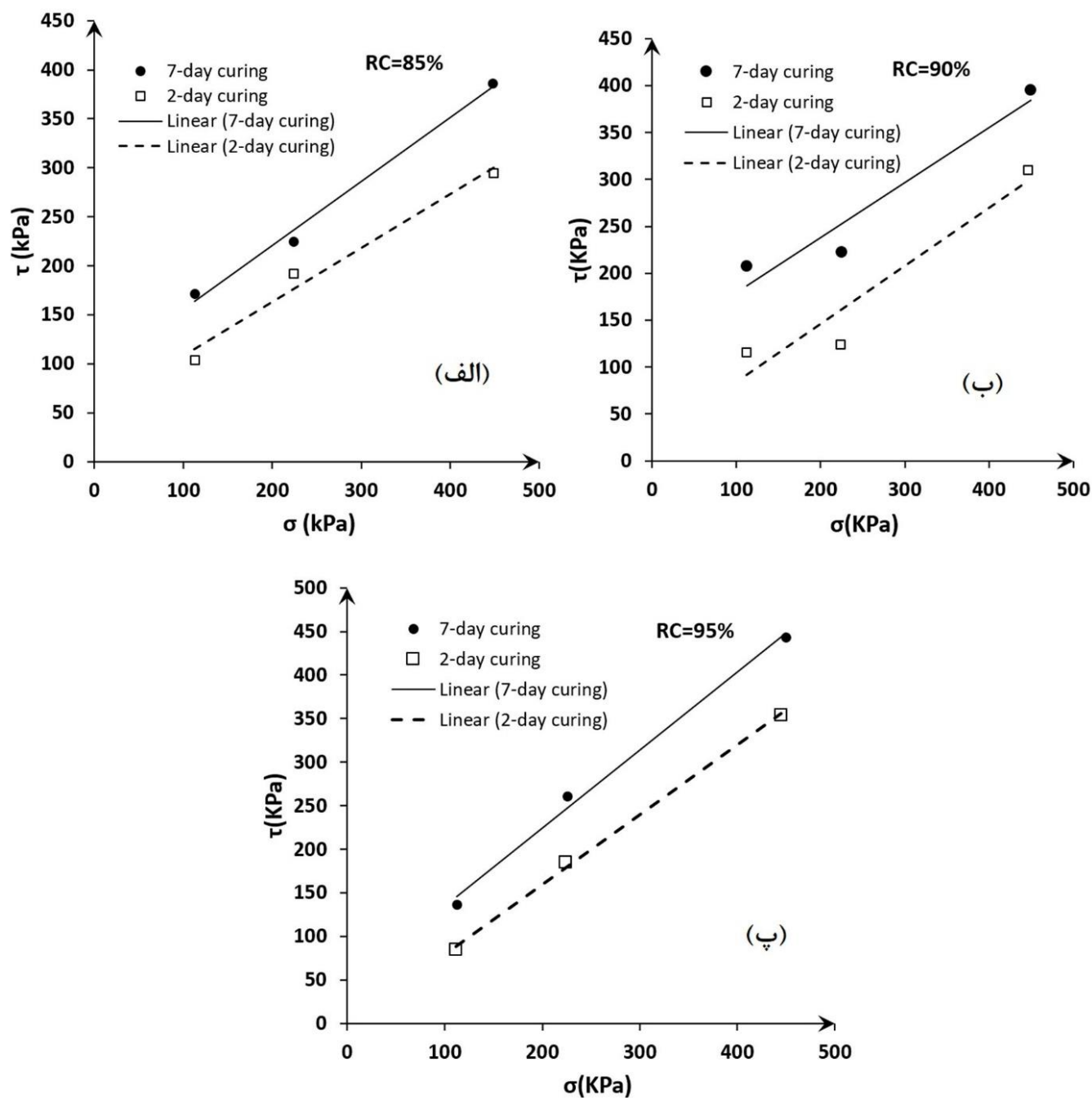


شکل ۹. تاثیر زمان عمل آوری بر رفتار برشی ماسه کربناته سیمانی سازی شده خارک در آزمایش برش مستقیم نمونه های با تراکم ۸۵٪

Fig. 9. Effect of the curing time on the shearing behavior of carbonate sand of the Khark (RC=85)

ناچیز در زاویه اصطکاک داخلی خاک شده است. در مورد ماسه خارک با تراکم های ۸۵٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ با افزایش زمان عمل آوری، چسبندگی به ترتیب از ۵۳ kPa به ۹۰/۶ kPa، از ۲۲/۶ kPa به ۱۲۱ kPa، و از صفر به ۴۵ kPa افزایش داشته است درحالی که بیشینه افزایش در زاویه اصطکاک داخلی ۲/۱٪ برای ماسه با تراکم ۹۵٪ می باشد (شکل ۱۰). افزایش در چسبندگی در اثر افزایش زمان عمل آوری را می توان به مستحکم تر شدت پیوندهای سیمانی با زمان

از عوامل یاد شده نیاز به مطالعات گسترده تری دارد. نمودار تنش برشی بر حسب تنش قائم و پوش گسیختگی موهر-کولمب ماسه خارک در دو زمان عمل آوری ۲ و ۷ روز در سه تراکم مختلف (۸۵٪، ۹۰٪ و ۹۵٪ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل های ۱۰-الف، ۱۰-ب و ۱۰-پ نشان داده شده است، افزایش زمان عمل آوری از ۲ روز به ۷ روز در همه تراکم های در نظر گرفته شده باعث افزایش قابل توجه در چسبندگی و تغییر



شکل ۱۰. پوش گسیختگی موهر-کولمب ماسه کرناته خارک متراکم سیمانی سازی شده با ۴۸ ساعت عمل آوری در برابر حالت سیمانی شده با ۷ روز عمل آوری برای (الف) تراکم ۸۵٪، (ب) تراکم ۹۰٪ و (پ) تراکم ۹۵٪

Fig. 10. Mohr-Coulomb failure envelope of the cemented Khark sand cured for 48 hours and 7 days, (a) RC=85%, (b) RC=90%, (c) RC=95%

نسبت داد. همچنین از آنجا که افزایش زاویه اصطکاک در اثر سیمانی شدن احتمالاً به طور عمده ناشی از کاهش نسبت منافذ خاک پس از سیمانی شدن و افزایش تماس دانه ها با هم است، طولانی شدن زمان عمل آوری تاثیر کمی بر آن خواهد داشت. همچنین شکل ۱۰-ب نشان دهنده افزایش نسبتاً کم در مقاومت خاک سیمانی سازی شده

هفت روز عمل آوری شده با افزایش تنش قائم از ۱۰۰ kPa به ۲۰۰ kPa در نسبت تراکم ۹۰٪ است. از آنجا که این پدیده مشابه با رفتار خاک سیمانی سازی شده دو روز عمل آوری شده در تراکم نسبی ۹۰٪ است شکل های ۸-ب و ۱۰-ب، می توان استدلال آورده شده در مورد شکل ۸-ب در بخش پیشین را برای این پدیده نیز

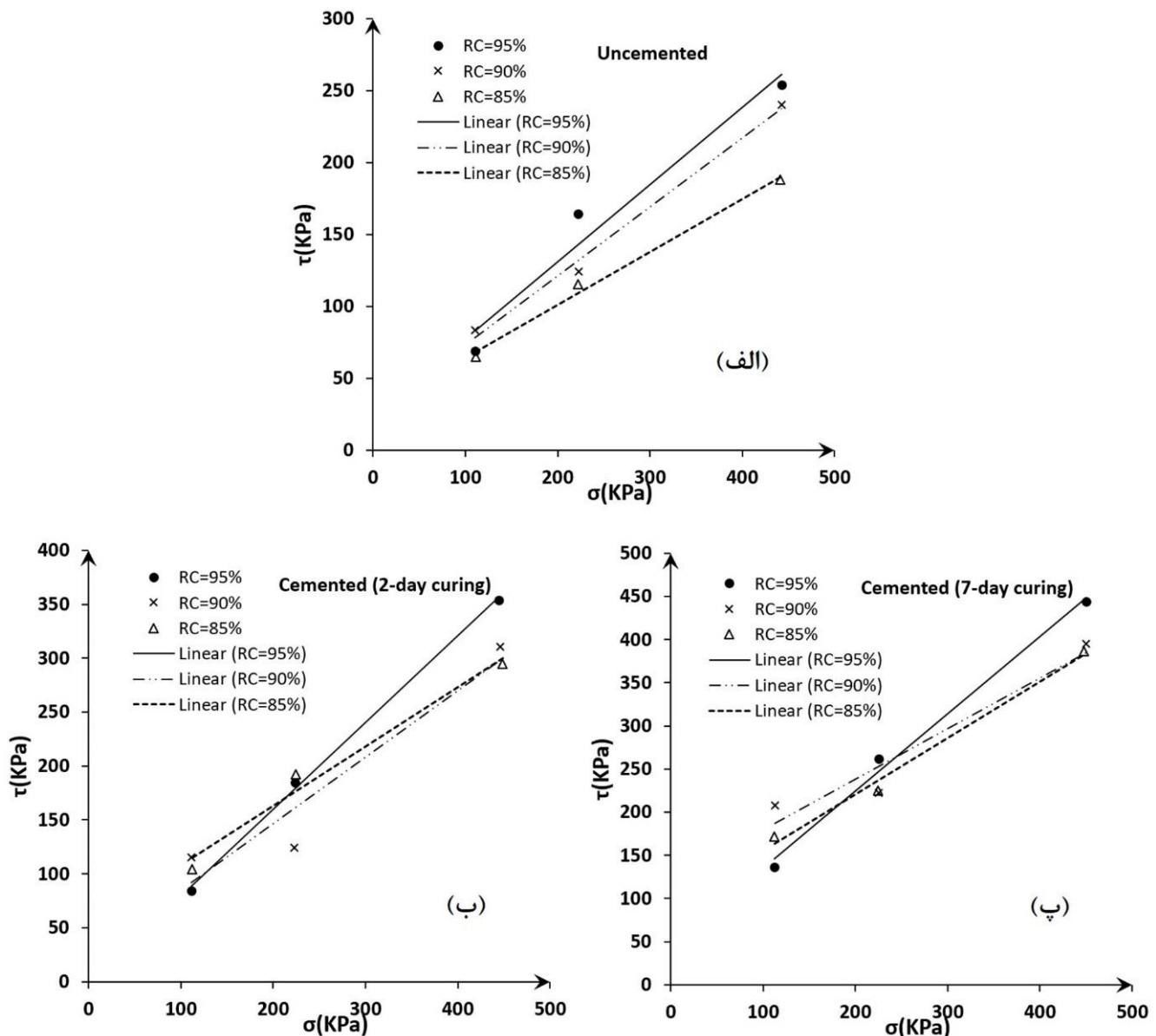
نسبت داد. همچنین از آنجا که افزایش زاویه اصطکاک در اثر سیمانی شدن احتمالاً به طور عمده ناشی از کاهش نسبت منافذ خاک پس از سیمانی شدن و افزایش تماس دانه ها با هم است، طولانی شدن زمان عمل آوری تاثیر کمی بر آن خواهد داشت. همچنین شکل ۱۰-ب نشان دهنده افزایش نسبتاً کم در مقاومت خاک سیمانی سازی شده

به کار برد.

۵-۳- تاثیر درصد تراکم بر مقاومت برشی

هر یک از حالت‌های ماسه غیرسیمانی شده، سیمانی سازی شده با ۲ روز عمل آوری و سیمانی سازی شده با هفت روز عمل آوری در سه نسبت تراکم مختلف (۰.۸۵٪، ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ برای ماسه کربناته خارک در نظر گرفته شد تا تاثیر درصد تراکم بر رفتار برشی این خاک دیده شود. شکل ۱۱ نمودارهای تنش قائم-تنش برشی و پوس گسیختگی موهر-کولمب مربوط به ماسه خارک در سه حالت سیمانی نشده شکل ۱۱-الف، سیمانی سازی شده با ۲ روز عمل آوری شکل ۱۱-ب و سیمانی سازی شده با ۷ روز عمل آوری شکل ۱۱-پ را نشان می‌دهد. همان گونه که شکل ۱۱-الف نشان می‌دهد، با افزایش درصد تراکم، چسبندگی خاک غیر سیمانی خارک نخست افزایشی نسبتاً کم و سپس کاهش نسبتاً ناچیز را تجربه کرده است (۲۷/۶ kPa، ۲۰/۱۱ و ۲۳/۷ kPa به ترتیب برای نسبت تراکم ۰.۸۵٪ و ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ در حالی که زاویه اصطکاک داخلی همواره روندی افزایشی داشته است (۲۰/۲°، ۲۵/۶° و ۲۸/۲°، به ترتیب برای نسبت تراکم ۰.۸۵٪، ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ همان گونه که پیش از این در توجیه تغییرات چسبندگی سیمانی شدن گفته شد، غیر اشباع بودن خاک حاضر یکی از عوامل چسبندگی خاک است و انتظار می‌رود که در یک خاک غیر سیمانی و غیر اشباع، با افزایش تراکم و کاهش نسبت منافذ و در نتیجه افزایش درجه اشباع، شاهد کاهش چسبندگی خاک باشیم، همان گونه که در مورد تراکم های ۰.۸۵٪ و ۰.۹۰٪ اتفاق افتاده است. اما کاهش ناچیز چسبندگی خاک غیر سیمانی خارک با افزایش تراکم از ۰.۹۰٪ تا ۰.۹۵٪ را می‌توان به تمایل بیشتر دانه های خاک به خرد شدگی با افزایش تراکم نسبت داد. از آنجا که خرد شدگی دانه های خاک باعث کاهش اندازه متوسط دانه ها به ویژه در صفحه گسیختگی می‌شود و در شرایط مساوی، خاک ریز دانه غیر اشباع دارای چسبندگی ظاهری بزرگ‌تری نسبت به خاک درشت دانه می‌باشد، می‌توان انتظار داشت که این مسئله باعث افزایش در چسبندگی ظاهری خاک با افزایش تراکم از ۰.۹۰٪ به ۰.۹۵٪ شده است شکل ۱۱-الف. افزایش زاویه اصطکاک خاک غیر سیمانی با افزایش تراکم را می‌توان به افزایش قفل و بست و تماس بین دانه ای با افزایش تراکم نسبت داد. تغییرات پارامترهای مقاومت برشی ماسه کربناته سیمانی سازی شده و دو روز

عمل آوری شده با افزایش درصد تراکم که در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است نشان دهنده آن است که چسبندگی خاک نخست روندی کاهشی با افزایش درصد تراکم داشته است (۵۳ kPa، ۲۲/۶ kPa و صفر به ترتیب برای نسبت تراکم ۰.۸۵٪، ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ در حالی که زاویه اصطکاک داخلی روندی افزایشی را تجربه کرده است (۲۸/۹°، ۳۱/۷° و ۳۸/۸°، به ترتیب برای نسبت تراکم ۰.۸۵٪، ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ می‌توان استدلال کرد که با افزایش درصد تراکم، با توجه به ثابت ماندن درصد رطوبت، مقدار درصد اشباع خاک افزایش یافته و چسبندگی ظاهری ناشی از غیر اشباع بودن خاک کاهش می‌یابد. از طرفی سیمانی شدن خاک نیز با کاهش نسبت منافذ خاک و افزایش درصد اشباع تاثیری مشابه با تراکم در کاهش چسبندگی ظاهری دارد. عامل سوم ایجاد چسبندگی در خاک، پیوندهای ناشی از مواد سیمانی است که در جهت افزایش چسبندگی عمل می‌کنند. ترکیب سه عامل فوق که دو تای آن در جهت کاهش و یکی در جهت افزایش چسبندگی عمل می‌کنند می‌تواند منجر به تغییرات مختلفی در چسبندگی شود که در مورد ماسه سیمانی دو روز عمل آوری شده باعث ایجاد یک روند کاهشی با افزایش درصد تراکم شده است. همچنین، افزایش زاویه اصطکاک با درصد تراکم در ماسه سیمانی دو روز عمل آوری شده خارک را می‌توان به سه اثر مختلف یعنی افزایش قفل و بست بین دانه ای ناشی از تراکم، افزایش تماس دانه ها با هم ناشی از غشا سیمانی ایجاد شده دور دانه های خاک و کاهش امکان حرکت دانه های نسبت به هم ناشی از سیمانی شدن نسبت داد. از سه اثر یاد شده، دو تای نخست در جهت افزایش و سومی در جهت کاهش اصطکاک عمل می‌کند. بنابراین در مورد ماسه سیمانی شده دو روز عمل آوری شده برآیند سه اثر یاد شده منجر به افزایش اصطکاک با افزایش تراکم شده است. تغییرات ماسه سیمانی هفت روز عمل آوری شده با تراکم در شکل ۱۱-پ نشان دهنده افزایش و سپس کاهش چسبندگی با تراکم است (۹۰/۶ kPa، ۱۲۱ kPa و ۴۴/۲ kPa به ترتیب برای نسبت تراکم ۰.۸۵٪، ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ در حالی که زاویه اصطکاک داخلی نخست کاهش ناچیز و سپس افزایشی قابل توجه با افزایش درصد تراکم داشته است (۳۳/۱°، ۳۰/۴° و ۴۱/۹°، به ترتیب برای نسبت تراکم ۰.۸۵٪، ۰.۹۰٪ و ۰.۹۵٪ دلیل تغییرات ایجاد شده در چسبندگی را می‌توان به تاثیر متضاد سه عامل یاد شده در مورد ماسه سیمانی دو روز عمل آوری شده نسبت داد. به طور مشابه، سه اثر ذکر



شکل ۱۱. تاثیر درصد تراکم بر پوش گسیختگی موهر-کولمب ماسه کربناته خارک در حالت‌های: (الف) غیر سیمانی، (ب) سیمانی-سازی شده با ۲ روز عمل آوری و (پ) سیمانی سازی شده با ۷ روز عمل آوری

Fig. 11. Effect of relative compaction on the Mohr-Coulomb failure envelope of the Khark sand for: (a) uncemented sand , (b) cemented and cured for 2 days (c) cemented and cured for 7 days

از آنجا که در عمل تنوع در میزان درصد اشباع، میزان سیمانی بودن و مقدار تراکم خاک‌های کربناته می‌تواند ناهمگنی زیادی حتی در فاصله‌های کوتاه ایجاد نماید، با توجه به تاثیرات عوامل یاد شده که در مورد آن بحث گردید، می‌توان به دلیل رفتار ناهمگن و متفاوت این گونه خاک‌ها در واقعیت پی برد.

شده برای تغییرات زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیمانی شده دو روز عمل آوری شده را می‌توان به عنوان دلیل تغییرات مشاهده شده در زاویه اصطکاک داخلی ماسه سیمانی شده هفت روز عمل آوری شده نیز مطرح نمود. مضافاً بر آن که عامل سوم یعنی کاهش امکان حرکت دانه‌های نسبت به هم ناشی از سیمانی شدن، با افزایش زمان عمل آوری و سخت تر شدن پیوندهای سیمانی، تاثیر بیشتری در تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خواهد داشت.

۶- نتیجه گیری

داخلی آن شد.

۶- افزایش تراکم در ماسه غیر سیمانی خارک باعث افزایش ناچیز و سپس کاهش کم در چسبندگی و افزایش در زاویه اصطکاک داخلی گردید. تغییرات در چسبندگی با تراکم در خاک غیر سیمانی را می‌توان به دو اثر متضاد تراکم و خرد شدگی دانه‌ها در به ترتیب کاهش و افزایش چسبندگی ظاهری ناشی از غیر اشباع بودن خاک نسبت داد.

۷- با افزایش تراکم در ماسه سیمانی شده و دو روز عمل آوری شده خارک، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی افزایش یافت. کاهش چسبندگی را می‌توان به سه عامل تراکم، کاهش نسبت منافذ در اثر سیمانی شدن و افزایش پیوندهای سیمانی در اثر سیمانی شدن نسبت داد که دو تای اول در جهت افزایش و سومی در جهت کاهش چسبندگی عمل می‌کنند. همچنین، افزایش زاویه اصطکاک با در صد تراکم را میتوان به سه اثر مختلف یعنی افزایش قفل و بست بین دانه‌ای ناشی از تراکم، افزایش تماس دانه‌ها به هم ناشی از غشا سیمانی ایجاد شده دور دانه‌های خاک و کاهش امکان حرکت دانه‌های نسبت به هم ناشی از سیمانی شدن نسبت داد. از سه اثر یاد شده، دو تای نخست در جهت افزایش و سومی در جهت کاهش اصطکاک عمل می‌کند.

۸- با افزایش نسبت تراکم ماسه سیمانی شده و هفت روز عمل آوری شده خارک، چسبندگی نخست افزایش و سپس کاهش یافته و زاویه اصطکاک داخلی نخست کاهش ناچیز و سپس افزایش قابل توجهی را در تراکم ۹۵٪ تجربه کرد. تغییرات چسبندگی را می‌توان به سه عامل موثر بر چسبندگی یاد شده در نتیجه گیری پیشین (نتیجه شماره ۷) نسبت داد. به طور مشابه تغییرات زاویه اصطکاک داخلی را می‌توان به سه عامل موثر بر زاویه اصطکاک داخلی در نتیجه گیری شماره ۷ نسبت داد.

۹- از آنجا که تهیه نمونه‌های دست نخورده ماسه کربناته سیمانته شده سخت و پرهزینه است، استفاده از روش سیمانی سازی شبه طبیعی در آزمایشگاه به دلیل شبیه سازی سیمانی شدن خاک در طبیعت می‌تواند جایگزین مناسبی برای نمونه‌های دست نخورده با نسبت‌های تراکم و درصد‌های سیمانی شدگی گوناگون باشد. از این ویژگی می‌توان برای کاهش هزینه‌های مطالعات اولیه برای برآورد هزینه پروژه‌های بزرگ مانند لارویی رودخانه‌ها استفاده کرد.

در این پژوهش از یک روش سیمانی سازی که سیمانی سازی خاک‌های کربناته را در طبیعت شبیه سازی می‌کند برای سیمانته کردن نمونه‌هایی از ماسه کربناته جزیره خارک. سپس رفتار برشی نمونه‌های سیمانی شده خاک‌های این محل با استفاده از آزمایش برش مستقیم در مقایسه با حالت غیر سیمانی بررسی و تحلیل گردید. همچنین، تاثیر پارامترهای زمان عمل آوری ماسه سیمانی شده و تراکم نسبی بر رفتار برشی خاک این جزیره بررسی گردید. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش به شرح زیر است:

۱- ماسه سیمانی شده جزیره خارک نسبت به خاک غیر سیمانی شده آن‌ها مقاومت برشی بزرگ‌تری به‌ویژه در تنش‌های قائم بزرگ‌تر از خود نشان داد.

۲- سیمانی سازی به دلیل ایجاد پیوندهای سیمانی بین دانه‌های خاک و ایجاد مانع در برابر حرکت آن‌ها نسبت به یکدیگر، باعث تمایل به کاهش اتساع و افزایش تمایل به تراکم در ماسه کربناته خارک گردید. با از بین رفتن پیوندهای سیمانی در جابجایی‌های افقی بزرگ‌تر و امکان حرکت مجدد دانه‌های خاک نسبت به هم، تمایل به اتساع دوباره افزایش یافت.

۳- تغییرات پارامترهای مقاومت برشی ماسه سیمانی سازی شده خارک (با ۴۸ ساعت عمل آوری) نشان می‌دهد که سیمانی شدن همواره باعث افزایش زاویه اصطکاک شده اما می‌تواند باعث افزایش، کاهش و یا بدون تغییر ماندن چسبندگی نسبت به ماسه غیر سیمانی شود. تغییرات یاد شده در چسبندگی خاک ناشی از سیمانی شدن را می‌توان به دو عامل غیر اشباع بودن خاک و پیوندهای سیمانی نسبت داد که اولی در جهت کاهش و دومی در جهت افزایش چسبندگی عمل می‌کند.

۴- افزایش زمان عمل آوری ماسه سیمانی سازی شده از ۲ روز به ۷ روز باعث افزایش مقاومت در همه تنش‌های قائم وارده شد. اما رفتار تغییر حجم-جابجایی افقی خاک خارک از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کرد که احتمالاً این موضوع به تاثیر بعضاً متضاد پارامترهای دخیل در رفتار تغییر حجمی ماسه سیمانی سازی شده مرتبط است.

۵- افزایش زمان عمل آوری ماسه سیمانی سازی شده خارک باعث افزایش قابل توجه چسبندگی و تغییر نسبتاً کم در زاویه اصطکاک

- [12] H.F. Aghajani, H. Salehzadeh, Anisotropic behavior of the Bushehr carbonate sand in the Persian Gulf, *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (10) (2015) 8197-8217.
- [13] X.X. Wang, X. Wang, J.W. Chen, R. Wang, M.J. Hu, Q.S. Meng, Experimental study on permeability characteristics of calcareous soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77 (4) (2018) 1753-1762.
- [14] H. Wei, T. Zhao, J. He, Q. Meng, X. Wang, Evolution of particle breakage for calcareous sands during ring shear tests, *International Journal of Geomechanics*, 18(2) (2018) 04017153.
- [15] X. Zhang, W. Hu, G. Scaringi, B.A. Baudet, W. Han, Particle shape factors and fractal dimension after large shear strains in carbonate sand, *Géotechnique Letters*, 8(1) (2018) 73-79.
- [16] S. Havaee, M. R. Mosaddeghi, S. Ayoubi, In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran, *Geoderma* 237 (2015) 137-148.
- [17] H. Shahnazari, Y. Jafarian, M.A. Tutunchia R. Rezvani, Undrained cyclic and monotonic behavior of Hormuz calcareous sand using hollow cylinder simple shear tests, *International Journal of Civil Engineering*, 14(4) (2016) 209-219.
- [18] D. Bruce, M. Bruce, The practitioner's guide to deep mixing. Grouting and ground treatment, In: *Proceedings of the third international conference, geotechnical special publication*, 120. Edited by American Society of Civil Engineers, (2003) 475-488.
- [19] N. Molenaar, A.A.M. Venmans, Calcium carbonate cementation of sand: a method for producing artificially cemented samples for geotechnical testing and a comparison with natural cementation processes, *Engineering Geology*, 35 (1-2), (1993) 103-122.
- [20] P.V. Lade, D.D. Overton, Cementation effects in frictional materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115 (10) (1989) 1373-1387.
- [21] A.M. Ajorloo, H. Mroueh, L. Lancelot, Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (1) (2012) 129-143.
- [1] B.T. Morioka, Evaluation of the static and cyclic strength properties of calcareous sand using cone penetrometer tests. PhD Thesis, University of Hawaii, (1999).
- [2] H.G. Brandes, Simple shear behavior of calcareous and quartz sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29 (1) (2011) 113-126 .
- [3] N.F. Ismael, A.H.N. Ahmad, Bearing capacity of footings on calcareous sands, *Soils and Foundations*, 30 (3) (1990) 81-90.
- [4] B.W. Byrne, G. T. Houlsby. Observations of footing behaviour on loose carbonate sands, *Géotechnique*, 51(5) (2001) 463-466.
- [5] S. Ohno, H. Ochiai, N. Yasufuku, Estimation of pile settlement in calcareous sands, *Engineering for Calcareous Sediments*, Baklkema, Rotterdam, (1999) 1-6.
- [6] J.L. Alba, J. M. Audibert. Pile design in calcareous and carbonaceous granular materials, and historic review, In *The 2nd International Conference on Engineering for Calcareous Sediments*, (1999) 29-44.
- [7] S.M. Safinus, S. Hossain, M.F. Randolph, Comparison of stress-strain behaviour of carbonate and silicate sediments, In *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Paris, (2013) 267-270.
- [8] X.Z. Wang, X. Wang, Z.C. Jin, Q.S. Meng, C.Q. Zhu, R. Wang, Shear characteristics of calcareous gravelly soil, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76 (2) (2017) 561-573.
- [9] G. Shang, L. Sun, S. Li, X. Liu, W. Chen, Experimental study of the shear strength of carbonate gravel, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (2020) 1-4.
- [10] M.R. Coop, K.K. Sorensen, T. Bodas Freitas, G. Georgoutsos, Particle breakage during shearing of a carbonate sand, *Géotechnique*, 54 (3) (2004) 157-163.
- [11] M. Hasanlourad, H. Salehzadeh, H. Shahnazari, Dilation and particle breakage effects on the shear strength of calcareous sands based on energy aspects, *International Journal of Civil Engineering*, 6 (2) (2008) 108-119.

- Journal, 56(12) (2019) 1849-1862.
- [26] K. Grine, A. Attar, A. Aoubed, D. Breysse, Using the design of experiment to model the effect of silica sand and cement on crushing properties of carbonate sand, *Materials and structures*, 44 (1) (2011) 195-203.
- [27] M. Hassanlourad, H. Salehzadeh, H. Shahnazari, Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands, *International Journal of Civil Engineering*, 9 (4) (2011) 307-314.
- [28] R.C. Chaney, S.M. Slonim, S.S. Slonim, Determination of calcium carbonate content in soils, *Geotechnical properties, behavior, and performance of calcareous soils*. ASTM International, (1982).
- [29] J.Q. Shang, E. Mohamedel Hassan, M. Ismail, Electrochemical cementation of offshore calcareous soil, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5) (2004) 877-893.
- [22] E. Kucharski, G. Price, H. Li, H.A. Joer, Laboratory evaluation of CIPS cemented calcareous and silica sands. In 7th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: Geomechanics in a Changing World: Conference Proceedings (p. 102). Institution of Engineers, Australia, (1996).
- [23] M.A. Ismail, H.A. Joer, H.W. Sim, M.F. Randolph, Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (6) (2002) 520-529.
- [24] J.T. Huang, D.W. Airey, Properties of artificially cemented carbonate sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (6) (1998) 492-499.
- [25] P. Xiao, H. Liu, A.W. Stuedlein, T.M. Evans, Y. Xiao, Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand. *Canadian Geotechnical*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Arvin, A. Masoomi, M. Ajdari, *Shearing behavior of Carbonate Sand of Khark Island Cemented by a Pseudo-natural Method*. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(6) (2021) 2415-2434

DOI: [10.22060/ceej.2020.17405.6552](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17405.6552)



