



استفاده از روش تراکم کاهش یافته در نمونه‌سازی خاک ماسه کربناتی لای دار بوشهر

الهام قنبری الموتی، رضا ضیائی مؤید*، سید ابوالحسن نائینی

گروه مهندسی عمران-خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:

ماسه لای دار کربناتی
روش تزریق ژلاتین
تراکم کاهش یافته
درصد لای
نمونه همگن

خلاصه: ساخت نمونه‌های همگن دارای نسبت تخلخل یکسان در ارتفاع نمونه در آزمایش سه محوری استاتیکی و سیکلی بسیار مهم می‌باشد زیرا پارامتر نسبت تخلخل بر روی مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای به ویژه مقاومت روانگرایی تأثیرگذار است. روش تراکم کاهش یافته توسعه یافته روش تراکم مرطوب است که برای ساخت نمونه همگن در خاک‌های ماسه با ریزدانه روش بسیار مناسبی می‌باشد. در این تحقیق روش تراکم کاهش یافته برای نمونه‌سازی در خاک ماسه لای دار کربناتی بوشهر مورد استفاده قرار گرفته و به منظور کنترل همگن بودن نمونه در لایه‌های مختلف از روش تزریق ژلاتین استفاده می‌شود. به منظور بررسی تأثیر لای بر کیفیت نمونه‌های ساخته شده ماسه‌ای با درصد لای ۰ تا ۴۰٪ در روش تراکم کاهش یافته و رسیدن به یک نمونه همگن تعدادی آزمایش تزریق ژلاتین در نمونه‌های ماسه لای دار کربناتی بوشهر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از تراکم کاهش یافته نمونه‌سازی همگن در ماسه کربناتی بوشهر امکان پذیر است. با تغییر در درصد لای مقدار پارامتر درصد کاهش تراکم لایه اول (Un مناسب) تغییر می‌کند. پارامتر Un در درصد لای‌های کمتر (۰، ۱۰ و ۲۰٪) به ۴ و ۶٪ محدود می‌شود و در درصد لای بالاتر (۳۰ و ۴۰٪) به مقدار ۶ و ۸٪ افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که در درصد لای‌های کمتر، ذرات لای در بین حفرات ماسه جای می‌گیرند و این امر باعث می‌شود که لایه اول با درصد کاهش تراکم کمتری به تراکم هدف نزدیک شود.

۱- مقدمه

به طوری که در این روش لایه‌های زیرین خاک در تراکمی کمتر از تراکم هدف ریخته و کوبیده می‌شوند و کوبش لایه‌های بالایی موجب متراکم شدن و رسیدن لایه‌هایی زیرین به تراکم هدف خواهد شد. در میان روش‌های مختلف نمونه‌سازی، هدف از ساخت نمونه به روش رسوب در آب دستیابی به نمونه همگن نمی‌باشد بلکه حالت واقعی لایه‌های رسوب کرده در طبیعت را شبیه‌سازی می‌کند [۲]. در روش بارش در آب امکان جدا شدن ذرات ریزدانه از درشت‌دانه به ویژه در نمونه‌های ماسه لای دار وجود دارد و بنابراین رسیدن به تراکم هدف در لایه‌های مختلف دشوار می‌باشد [۱]. در میان روش‌های بارش در هوا و تراکم کاهش یافته، روش تراکم کاهش یافته از لحاظ یکنواختی در سختی در طول نمونه و مقاومت، نمونه همگن تری از خود نشان می‌دهد [۴ و ۲]. بنابراین این روش نمونه‌سازی تاکنون مبنای ساخت نمونه‌های همگن در آزمایش‌های تعیین مقاومت روانگرایی و رفتار دینامیکی و استاتیکی خاک‌های ماسه‌ای با و بدون ریزدانه قرار گرفته است، به طوری که برخی از محققین روش بارش خشک در هوا را طبق روش تراکم کاهش یافته به نحوی توسعه داده‌اند که نمونه‌های همگنی به دست آید [۶-۴].

روش‌های نمونه‌سازی مختلفی در خاک‌های ماسه‌ای همراه با ریزدانه و بدون ریزدانه در حالت سست مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تراکم مرطوب، ریزش خشک، بارش خشک در هوا، بارش در آب، رسوب در آب و تراکم کاهش یافته اشاره نمود. در روش تراکم مرطوب خاک در تعداد لایه‌های مشخص با یک درصد رطوبت اندک توسط یک کوبه استوانه‌ای که قطر آن با قطر نمونه هم اندازه است درون یک قالب جدا شونده کوبیده می‌شود. در این روش تراکم هر لایه کوبیده شده با تراکم هدف یکسان می‌باشد. روش تراکم کاهش یافته توسط لد [۱] به نحوی توسعه یافته است که نمونه‌های همگنی به دست دهد [۳ و ۲].

- 1 Wet tamping
- 2 Dry deposition
- 3 Dry air pluviation
- 4 Water pluviation
- 5 Water sedimentation
- 6 Undercompaction

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ziaie@eng.ikiu.ac.ir



نائینی و همکاران [۲] به بررسی تأثیر روش نمونه‌سازی بر حالت پایدار خاک ماسه سیلیسی اردبیل پرداختند. آن‌ها از روش‌های تراکم مرطوب، تراکم کاهش یافته و رسوب در آب استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های ساخته شده به روش تراکم کاهش یافته و تراکم مرطوب همگن و همسان هستند اما نمونه‌های ساخته شده به روش نشست در آب ناهمگن و لایه‌لایه بوده بنابراین این نمونه‌ها سست‌تر از نمونه‌های ساخته شده به روش تراکم کاهش یافته و تراکم مرطوب هستند و خط حالت پایدار آن در زیر خط بقیه روش‌های نمونه‌سازی قرار می‌گیرد. شی و همکاران [۷] یک سری آزمایش برای بررسی اثر روش ساخت نمونه بر خصوصیات مکانیکی ماسه کربناتی ۱S (که از سایتی در خلیج فارس استخراج شده است) انجام دادند که در مطالعات خود نسبت تنش جانبی خاک K_0 ، مقاومت فشاری و کششی و سیکی زهکشی نشده را در آزمایش سه محوری با استفاده از روش نمونه‌سازی بارش خشک در هوا، بارش در آب، تراکم مرطوب (تراکم کاهش یافته)، تراکم خشک و ریزش خشک با قیف مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در آزمایش سه محوری زهکشی نشده مونوتونیک همه نمونه‌ها به استثنای نمونه‌های ساخته شده به روش تراکم کاهش یافته از خود رفتار سخت شونده‌گی نشان دادند، همچنین این رفتار سخت شونده‌گی در نمونه‌های ریخته شده خشک در هوا بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده به روش تراکم کاهش یافته بیشترین میزان مقاومت را در برابر روانگرایی و نمونه‌های ساخته شده به روش ریزش خشک در هوا کمترین میزان مقاومت روانگرایی را از خود نشان می‌دهند. این امر به دلیل جهت‌گیری ذرات خاک در جهت افقی است که خاک را تراکم ناپذیرتر می‌کند. همچنین ناهمسانی در سختی نیز در نمونه‌های ساخته شده با تراکم کاهش یافته حداقل است زیرا میزان ناهمگنی در تغییر شکل در ارتفاع نمونه و زاویه بین محور طولی ذرات خاک و صفحه افقی (به دلیل کوبش قائمی که در این روش صورت می‌گیرد) حداقل است. شی و همکاران [۸] به بررسی همگنی و همسان بودن ساختار خاک در ماسه کربناتی ۱S در ۵ روش نمونه‌سازی بارش خشک در هوا، بارش در آب، تراکم مرطوب (تراکم کاهش یافته)، تراکم خشک و ریزش خشک با قیف با استفاده از عکس برداری X-Ray پرداختند. ماسه کربناتی ۱S دارای درصد کربنات کلسیم بیشتر از ۹۵٪ و خاک حاوی مرجان و صدف می‌باشد. آن‌ها در این تحقیق نشان دادند که نمونه‌های ساخته شده به روش ریزش خشک در هوا و تراکم کاهش یافته بیشترین میزان همگنی را در جهت شعاعی خود نشان می‌دهند در حالی که در مرزهای قائم نمونه‌های ساخته شده به روش ریزش خشک

در هوا در مقایسه با مرزهای نمونه‌های دیگر بیشترین میزان ناهمگنی (در جهت قائم) را از خود نشان می‌دهد. شی و همکاران [۳] به مقایسه سختی ماسه کربناتی از یک جزیره مصنوعی در خلیج فارس توسط بندر المنت در جهات افقی و قائم در روش‌های مختلف نمونه‌سازی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های ماسه کربناتی ساخته شده توسط روش بارش در هوا، بیشترین مقدار ناهمسانی در سختی را دارند و کمترین میزان ناهمسانی^۱ مربوط به نمونه‌های ساخته شده به روش تراکم کاهش یافته و ریزش خشک با قیف می‌باشد زیرا این روش‌ها سختی در جهت قائم را کاهش می‌دهند و موجب همسان شدن نمونه می‌گردند.

محققین مختلفی به استفاده از روش ریزش در هوا برای ساخت نمونه‌های ماسه کربناتی سست پرداختند اما با توجه به اینکه در این روش یکنواختی در نمونه به درستی تضمین نمی‌شود، لایه‌ها با ضخامت مشخص طوری ریخته می‌شوند که لایه‌های پایینی تراکم کمتری از لایه‌های بالایی داشته باشند تا وزن لایه‌های بالایی باعث تراکم لایه‌های پایینی و در نتیجه یکنواختی نمونه گردد [۱۰ و ۹ و ۵].

ونگ و همکاران [۱۱] در یک خاک ماسه کربناتی در صخره‌های مرجانی جزایر نانشا^۲ در دریای جنوب چین، تعدادی آزمایش بارگذاری صفحه در محل و آزمایشگاهی به منظور به دست آوردن ظرفیت باربری این خاک انجام داده است. نمونه‌ها شامل ماسه کربناتی با درصد کربنات ۹۷٪ و بسیار شکننده و یک نوع ماسه کوارتزی (با دانه‌بندی کاملاً مشابه) در دو حالت خشک و اشباع با درصد تراکم نسبی ۴۴٪، ۵۶٪ و ۶۸٪ مورد آزمایش واقع شده‌اند. برای نمونه‌سازی در این آزمایش‌ها از روش تراکم کاهش یافته لد (۱۹۷۸) استفاده نموده است زیرا که این روش دارای مزیت به دست آوردن نمونه با تراکم یکسان در لایه‌های آن می‌باشد. خیائو و همکاران [۱۲] تعدادی آزمایش فشاری تک محوره با تراز تنش‌های قائم متفاوت و زمان بارگذاری‌های متفاوت برای به دست آوردن روند کرنش حجمی، توزیع دانه‌بندی و شکنندگی یک ماسه کربناتی با درصد لای ۰ تا ۲۰٪، با تراکم نسبی اولیه ۴۰٪ داده است. ماسه کربناتی در این تحقیق از سواحل شرقی چین به دست آمده که دارای تخلخل درون ذره‌ای با سطح زیر و دانه‌های تیز گوشه می‌باشد. ریزدانه خالص از شکسته شدن ماسه کربناتی به دست آمده است که بافت آن با ماسه یکسان می‌باشد. نمونه‌سازی توسط روش تراکم کاهش یافته می‌باشد، زیرا که این روش برای ساخت نمونه‌های همگن در خاک‌های ترکیبی (ماسه-ریزدانه) بسیار مناسب و فراگیر می‌باشد.

1 Anisotropic
2 Nansha Islands

بررسی یکنواختی نمونه‌ها در درصد‌های مختلف کاهش تراکم در نمونه‌های با درصد لای مختلف پرداخته شده و بهترین درصد کاهش تراکم در بین نمونه‌ها با درصد لای یکسان برای انجام نمونه‌سازی به صورت همگن انتخاب گردیده است.

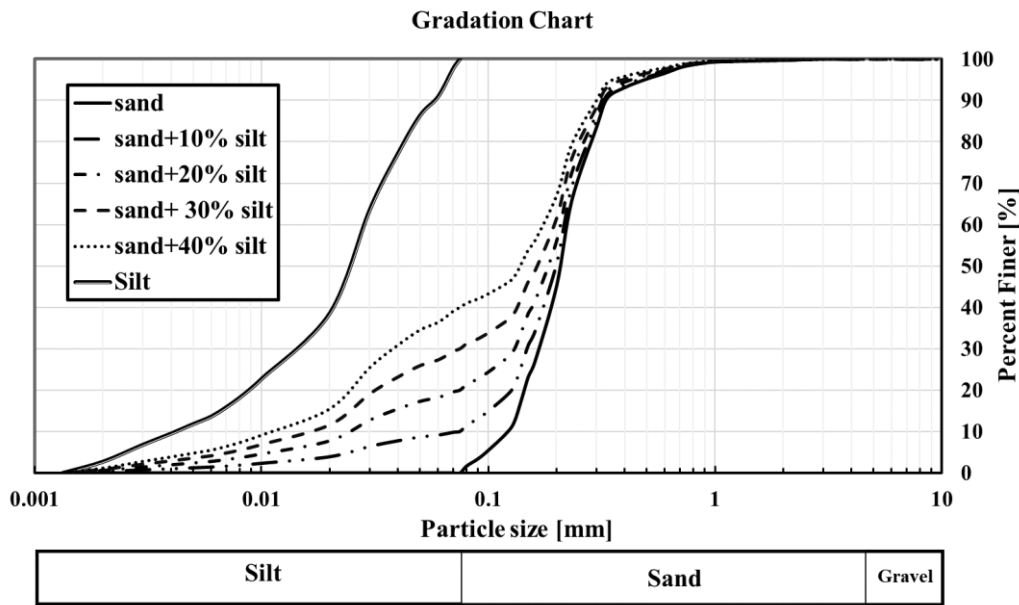
۲- مصالح مورد استفاده

در سواحل شمالی خلیج فارس و جزایر خلیج فارس و دریای عمان مانند قشم و کیش و جزیره هرمز خاک عمدتاً از جنس ماسه همراه با ریزدانه و یا بدون ریزدانه و همچنین دارای کربنات کلسیم (CaCO_3) می‌باشد. این خاک‌ها از لحاظ بافت، منشأ و ساختار خاک، اسکلته و شکل دانه‌ها، منافذ درون‌ذره‌ای و بین‌دانه‌ای، سیمانتاسیون و خرد شدگی با خاک‌های سیلیکاتی تفاوت زیادی دارند. از لحاظ منشأ دانه‌ها می‌توان گفت که این خاک‌ها عموماً دارای منشأ بیولوژیک می‌باشند بدین معنی که از رسوب بقایای جانوران و گیاهان دریایی بر روی یکدیگر به وجود می‌آیند که این امر سبب می‌شود که ماسه‌های کربناتی گوشه‌دار بوده و نسبت منافذ بالاتری نسبت به سایر ماسه‌ها داشته باشند. علاوه بر این دانه‌های ماسه معمولاً دارای تخلخل بین‌ذره‌ای می‌باشند که این تخلخل مضاعف موجب بروز خاصیت شکنندگی در حین بارگذاری می‌گردد [۲۳].

در این تحقیق از خاک ماسه‌ای لای‌دار بندر بوشهر که از سواحل شمالی خلیج فارس استخراج شده، استفاده می‌شود. به منظور اطمینان از کربناتی بودن خاک اسید هیدروکلریک بر روی خاک در محل ریخته شده و پس از مشاهده حل شدن آن در اسید به آزمایشگاه انتقال یافته و آزمایش‌های اولیه شامل آزمایش درصد کربنات و دانه‌بندی و هیدرومتري و حدود اتر برگ بر روی این خاک صورت گرفت. درصد کربنات کلسیم خاک بر اساس استاندارد BS1377 [۲۴] $72/5\%$ به دست آمده است. در این آزمایش مقداری اسید کلریدریک بر روی یک خاک که درون ظرف در بسته‌ای می‌باشد ریخته می‌شود، سپس حجم و وزن گاز CO_2 آزاد شده ناشی از واکنش اسید با CaCO_3 خاک تعیین می‌شود. سپس با استفاده از جداول و روابط درون استاندارد درصد کربنات کلسیم خاک تعیین می‌شود. مولاریته محلول اسید کلریدریک 1 mol/L می‌باشد. با بررسی گمانه‌های محلی در محدوده برداشت نمونه خاک در مطالعات [۲۱] و نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی از گمانه‌های مذکور و همچنین بازدید میدانی و انتقال چند نمونه به آزمایشگاه و انجام آزمایش‌های دانه‌بندی مشخص گردید که در این محدوده درصد لای ۱۰ الی 40% می‌باشد؛ بنابراین ماسه لای‌دار به آزمایشگاه منتقل شده

صدر کریمی [۱۳] به بررسی رفتار یک ماسه کربناتی پس از روانگرایی و روانگرایی مجدد تحت بارگذاری سیکلی مشابه توسط آزمایش برش ساده سیکلی پرداخت. این ماسه از کوه بولر در لندن، به دست آمده است و ماسه بد دانه شده است و دارای کربناتی-سیلیسی نیمه تیز گوشه تا تیز گوشه می‌باشد. برای نمونه‌سازی از روش تراکم کاهش یافته به منظور دستیابی به نمونه‌های یکنواخت‌تر استفاده شده است.

رفتار آزمایشگاهی ماسه کربناتی سواحل جنوبی ایران در مجاورت خلیج فارس به ویژه ماسه کربناتی بندر بوشهر، جزیره هرمز، تنبک، قشم و کیش مورد مطالعه محققین مختلفی قرار گرفته است که در تمام این مطالعات از خاک ماسه‌ای بدون ریزدانه استفاده شده است. [۲۰-۱۴، ۱۰ و ۹ و ۵] زارع و حاجبانی [۲۱] در مطالعات روانگرایی که بر آزمایش‌های SPT انجام شده در ۹۸ گمانه موجود در شهر بوشهر انجام شده است، نشان دادند که در بخش‌هایی از شهر بوشهر که عدد SPT در گمانه‌ها پایین می‌باشد سطح تراز آب زیرزمینی بالا بوده و به دلیل اینکه بر اساس مطالعات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله حداکثر بیشینه شتاب افقی $0/3g$ و بنابراین بوشهر در محدوده لرزه‌خیزی زیاد قرار دارد [۲۲] پتانسیل روانگرایی در عمق صفر تا ۸ متری در بسیاری از گمانه‌ها زیاد و خیلی زیاد می‌باشد. عمده جنس این رسوبات ماسه لای‌دار (SM) و ماسه بد دانه‌بندی شده لای‌دار (SP-) (SM) و لای غیرعالی با خاصیت خمیری کم (ML) می‌باشد بنابراین مطالعه رفتار ماسه لای‌دار کربناتی بوشهر هم در حالت استاتیکی و هم در حالت دینامیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد که در مطالعات محققین گذشته به چشم نمی‌خورد. برای بررسی رفتار خاک ماسه لای‌دار در آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و سیکلی انتخاب روش نمونه‌سازی برای ساخت نمونه همگن جهت مقایسه نمونه‌ها با یکدیگر دارای اهمیت فراوان می‌باشد. در تحقیق حاضر از میان روش‌های نمونه‌سازی مختلف که شامل بارش خشک در هوا و آب، رسوب در آب، ریزش خشک و تراکم مرطوب (تراکم کاهش یافته) می‌باشد روش تراکم کاهش یافته مورد استفاده توسط لد [۱] انتخاب گردیده است. در این روش نمونه‌سازی، انتخاب درصد کاهش تراکم در لایه اول (لایه زیرین) در این روش بسیار حائز اهمیت است و اگر این درصد که دارای محدوده وسیعی می‌باشد، درست انتخاب شود، می‌توان از سعی و خطا در آزمایش‌های سیکلی و استاتیکی برای دستیابی به بهترین درصد کاهش تراکم صرف‌نظر نمود. بنابراین انتخاب یک روش مناسب جهت آزمودن یکنواختی در نمونه‌ها بسیار مهم است. در پژوهش حاضر با استفاده از روش تزریق ژلاتین در خاک‌های ماسه لای‌دار کربناتی بوشهر به



شکل ۱. دانه‌بندی ترکیبات مختلف ماسه-لای به کار رفته در تحقیق حاضر

Fig. 1. Gradation chart of sand-silt mixtures used in this research

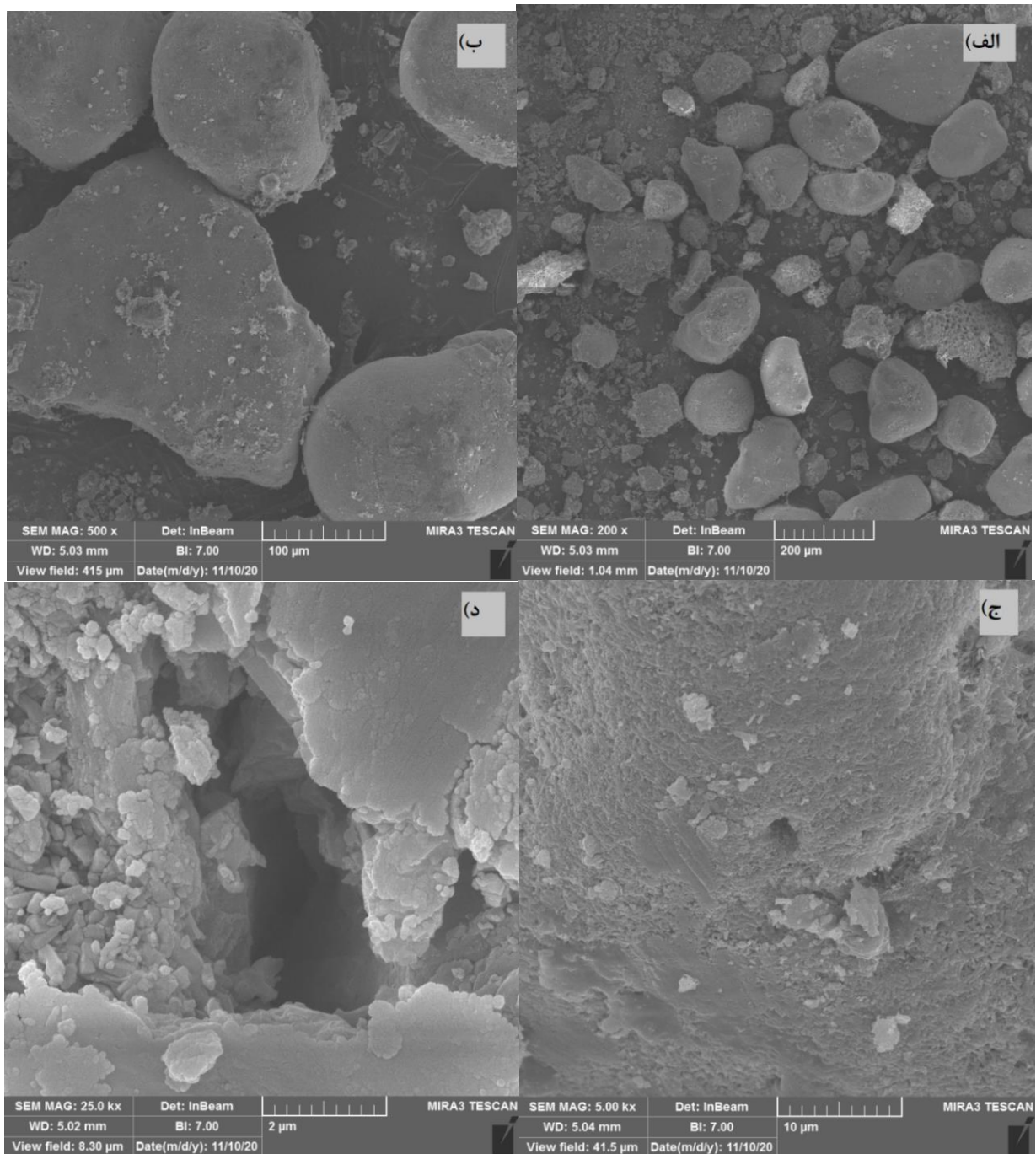
نسبت تخلخل در ماسه‌های لای‌دار تا درصد لای حداکثر ۱۵٪ به کار می‌رود اما با توجه به اینکه استاندارد دیگری برای این نوع خاک‌ها (ماسه لای‌دار با درصد لای بیش از ۱۵٪) وجود ندارد، بنابراین می‌توان نتایج این دو آزمایش را در این خاک قابل قبول دانست. همچنین در این جدول مشخصات D_{50} ، ضریب یکنواختی C_u و ضریب انحناء C_c نیز محاسبه شده است.

۳- روش انجام کار

در روش تراکم کاهش یافته [۱] که روش تراکم مرطوب توسعه یافته است، وقتی لایه‌های ماسه‌ای در یک تراکم خاص کوبیده می‌شوند، تراکم لایه‌های بالایی ممکن است موجب افزایش دانسیته لایه‌های پایینی شود بنابراین این روش از این خاصیت استفاده می‌کند تا نمونه‌ای همگن بسازد. به این صورت که هر لایه در تراکم پایین‌تر از تراکم مورد نظر توسط پارامتر U_n که درصد کاهش تراکم نامیده می‌شود، کوبیده خواهد شد. در این حالت مقدار U_n به صورت خطی از پایین‌ترین لایه (مقدار حداکثر) تا لایه بالایی (مقدار حداقل) تغییر می‌کند. مقدار U_n هر لایه از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱]

و به روش دانه‌بندی‌تر از لای جدا شده و با درصد وزنی لای ۴۰٪، ۳۰، ۲۰، ۱۰، ۰ با ماسه ترکیب شده است. سپس دانه‌بندی بر اساس استاندارد [۲۵] در خاک ماسه‌ای تمیز و لای و ماسه لای‌دار با درصد لای‌های متفاوت انجام شده است که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. همچنین عکس‌های SEM گرفته شده از ماسه لای‌دار کربناتی بوشهر در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس نمودارهای [۲۶] این خاک در دسته نیمه تیز گوشه تا تیز گوشه قرار دارد. همچنین حفرات درون ذره‌ای در دانه‌های خاک مشاهده می‌شود که جزئی از خصوصیات خاک‌های کربناتی می‌باشد. با بررسی چشمی خاک مشخص گردید که باقی‌مانده ذرات پوسته‌های صدفی^۱ در خاک یافت می‌شود همچنین در عکس‌های SEM باقی‌مانده خارتنان^۲ و جانداران دریایی مشاهده می‌شود؛ بنابراین می‌توان گفت که بافت خاک از نوع اسکلتی می‌باشد. چگالی ویژه G_s ^۳ به دست آمده از آزمایش پیکنومتر استاندارد [۲۷] و نسبت تخلخل بیشینه و کمینه e_{min} و e_{max} در نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D4254 [۲۸] و ASTM D4253 [۲۹] برای نمونه‌های ماسه لای‌دار به دست آمده است (جدول ۱). این دو استاندارد برای تعیین

- 1 Shell Fragments
- 2 Echinoderms
- 3 Specific Gravity



شکل ۲. عکس‌های SEM گرفته شده از خاک ماسه‌ای لای‌دار کربناتی بوشهر

Fig. 2. SEM pictures taken from Boushehr carbonated silty sand

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های ماسه‌ای لای‌دار و ماسه خالص کربناتی بوشهر

Table 1. Properties of Boushehr carbonated sand and silty sand

مشخصات خاک						نوع خاک
Cc	Cu	D50	emin	emax	Gs	
۰/۹۶۴۰	۱/۸۷۰۰	۰/۲۰۸۰	۰/۴۳۱	۰/۷۰۲	۲/۷۳۱	ماسه خالص
۱/۳۸۸۰	۲/۸۸۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۳۹۵	۰/۷۲۰	۲/۷۴۲	ماسه با ۱۰٪ لای
۳/۳۵۳۰	۸/۷۵۰۰	۰/۱۹۰۰	۰/۴۰۰	۰/۷۹۰	۲/۷۶۲	ماسه با ۲۰٪ لای
۱/۵۹۸۰	۱۳/۸۷۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۴۱۶	۰/۸۳۳	۲/۷۹۴	ماسه با ۳۰٪ لای
۰/۸۱۷۰	۱۶/۱۸۰۰	۰/۱۴۰۰	۰/۴۴۹	۰/۹۰۰	۲/۸۲۱	ماسه با ۴۰٪ لای
۱/۸۹۶۲	۶/۶۶۶۷	۰/۰۲۷۰	۰/۴۷۵	۰/۹۵۰	۲/۸۵۰	لای

در روش نمونه‌سازی تراکم کاهش یافته که از روش [۱] استفاده می‌نماید، میزان ارتفاع سقوط چکش تا بالای لایه مورد نظر از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$h_n = \frac{h_t}{j} \left[(n_i - 1) + \left(1 + \frac{U_{ni}}{100} \right) \right] \quad (2)$$

h_n ارتفاع سقوط چکش در بالای لایه مورد نظر و h_t ارتفاع کل نمونه می‌باشد.

لد [۱] مقدار Un را بین ۰ تا ۱۵٪ برای نمونه‌های سست تا متراکم پیشنهاد می‌دهد. در این تحقیق با سعی و خطا و بررسی انحراف معیار Un های متفاوت مشخص گردید که مقادیر ۸٪ و ۴، ۲ Un = برای نمونه‌سازی در درصد تراکم ۳۰٪ مناسب می‌باشد. سپس تعداد لایه‌ها انتخاب می‌شود که نباید از یک اینچ (۲۵ mm) بیشتر باشد که در اینجا ۶ لایه با ضخامت تقریبی ۱/۶۶۷ cm انتخاب می‌شود. با معلوم بودن n_i و U_{ni} مقدار U_{ni} برای هر لایه محاسبه می‌شود (رابطه ۱). با داشتن U_{ni} و j و h_t ارتفاع سقوط چکش در بالای لایه مورد نظر برای هر لایه محاسبه می‌شود. وزن خالص مرطوب مورد نیاز برای نمونه‌سازی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$W_t = \gamma_{dry} (1 + \omega) V \quad (3)$$

$$U_{ni} = U_{n1} - \left[\frac{U_{n1} - U_{ni}}{n_i - 1} \times (n_i - 1) \right] \quad (1)$$

U_{n1} مقدار درصد کاهش تراکم است که برای لایه اول در نظر گرفته می‌شود. U_{ni} مقدار درصد کاهش تراکم در لایه آخر که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود. n_i شماره لایه مورد نظر و n_i تعداد کل لایه‌های نمونه است.

در صورتی که مقدار مناسب U_n برای لایه اول در نظر گرفته شود، نمونه ساخته شده نمونه همگنی است که وزن‌های مساوی و نسبت تخلخل مساوی از خاک در ارتفاع نمونه گسترده شده است [۱] نشان داد که رفتار سیکلی خاک متأثر از مقدار U_{ni} انتخاب شده می‌باشد و تعدادی آزمایش سه محوری سیکلی بر روی ماسه انجام داد به طوری که U_{ni} در آن‌ها متفاوت بود و مقدار مقاومت سیکلی بهینه را در یک U_{ni} خاص به دست آورد.

نائینی [۳۰] به مقایسه روش‌های نمونه‌سازی در نمونه‌های ماسه‌ای لای‌دار سست اردبیل و معرفی یک روش نمونه‌سازی مناسب به طوری که نسبت تخلخل در طول نمونه یکسان باشد پرداخته است که این روش مناسب را روش تراکم کاهش یافته معرفی می‌کند و بنابراین نمونه‌های ماسه لای‌دار سست ساخته شده به این روش را مورد آزمایش سه محوری استاتیکی و سیکلی قرار داده و به بررسی مقاومت روانگرایی آن می‌پردازد.



شکل ۳. دستگاه ساخت نمونه روش تراکم کاهش یافته با چکش قابل تنظیم

Fig. 3. Sample preparation equipment used for under compaction method with adjustable hammer

پس از آن، سلول‌های حاوی نمونه آب‌بندی شده و در دستگاه تزریق که در شکل ۴ نشان داده شده است قرار می‌گیرد. محلول ژلاتین ۲٪ برای تزریق انتخاب شده به دلیل اینکه حداقل میزان ژلاتین برای گرفتن نمونه می‌باشد مطابق استاندارد ASTM D4320 [۳۱] که برای تزریق شیمیایی در داخل خاک استفاده می‌شود، می‌بایست قبل از تزریق ژلاتین، آب از داخل نمونه به میزان حداقل ۳ برابر حجم نمونه با فشار اندک kPa ۱۰ عبور داده می‌شود. سپس محلول ژلاتین با فشار تزریق ۱۰ تا kPa ۱۵ به نمونه تزریق می‌شود و فشارها طبق استاندارد ASTM D4320 به حدی کوچک (کمتر از kPa ۲۰۰) در نظر گرفته شده است که تراکم و ساختار نمونه به هم نخورد. سپس سلول حاوی نمونه‌ها به مدت حداقل ۲۴ ساعت درون یخچال قرار داده می‌شود تا ژلاتین درون خاک خودش را بگیرد و پس از آن نمونه خاک از درون سلول جدا شونده خارج شده و با یک کاتر برنده و تیز به شش قسمت با ارتفاع یکنواخت بریده می‌شود (شکل ۵). وزن نمونه‌های بریده شده، قطر و ارتفاع هر کدام به دقت اندازه‌گیری می‌شود و سپس به مدت حداقل ۲۴ ساعت درون گرمخانه^۱ قرار می‌گیرد تا آب موجود

γ_{dry} دانسیته خشک نمونه‌ها و ω درصد رطوبت نمونه‌ها که باید طوری انتخاب شود که درجه اشباع نمونه بین ۲۰ تا ۷۰٪ باشد. هر چه مقدار ریزدانه کمتر باشد درجه اشباع باید کمتر انتخاب شود. در تحقیق حاضر درجه اشباع با توجه به مقدار ریزدانه بین ۳۰ تا ۳۵٪ انتخاب می‌شود و بنابراین مقدار درصد رطوبت نمونه‌ها بین ۷ تا ۷/۶٪ به دست آمده است. وزن خاک مورد نیاز برای هر لایه از تقسیم وزن کل مرطوب (رابطه ۳) بر تعداد کل لایه‌ها به دست می‌آید. در تحقیق حاضر برای به دست آوردن نمونه‌های ماسه لای دار، ابتدا ذرات زیر الک ۲۰۰ از خاک ماسه‌ای جدا شدند و سپس لای با درصد وزنی ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۰٪ با ماسه ترکیب گردید. نمونه‌های ساخته شده به روش تراکم کاهش یافته در سلول‌های جدا شونده با قطر ۵ cm و ارتفاع ۱۰ cm در دستگاه کوبش تراکم کاهش یافته با سیستم چکش با قابلیت تنظیم ارتفاع که در شکل ۳ نشان داده شده قرار می‌گیرد. قطر چکش کمی کمتر از قطر داخلی قالب جدا شونده یعنی ۳/۳ cm می‌باشد و ارتفاع چکش به اندازه h_n برای هر لایه تنظیم شده و خاک هر لایه به صورت دورانی و یکنواخت کوبیده می‌شود تا جایی که به ارتفاع مورد نظر برسد. سپس لایه بعدی ریخته می‌شود و این کار ادامه می‌یابد.

1 Oven



شکل ۴. دستگاه تزریق نمونه

Fig. 4. Sample injection equipment



شکل ۵. نمونه تزریق شده به همراه نمونه‌های بریده شده

Fig. 5. Injected and sliced sample

همگنی بیشتری برخوردار است. نتایج تغییرات نسبت تخلخل در ارتفاع نمونه در درصد Un های متفاوت در ماسه با درصد لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪ به ترتیب در اشکال ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود.

در شکل ۶-الف تا د نتایج نمونه‌ی ماسه‌ای در ۴ درصد کاهش تراکم $U_n = 2\% - 4\% - 6\% - 8\%$ مشاهده می‌شود. در نمودارهای ۶-الف و ج مشاهده می‌شود که میانگین تراکم در سه لایه پایینی بیشتر از میانگین تراکم در سه لایه بالایی می‌باشد که این امر به دلیل کوبش لایه‌های بالایی است که لایه‌های پایینی را تحت تراکم قرار می‌دهد. در مقایسه با نتایج [۳۰] می‌توان دید که این نتیجه نیز در Un های کمتر نیز رخ داده است. همچنین می‌توان دید که با توجه به انحراف معیار نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نسبت به میانگین آن در $Un = 2$ پراکندگی نسبت تخلخل زیاد است ولی در $Un = 4$ انحراف معیار به شدت کاهش می‌یابد و مجدداً در $Un = 6$ پراکندگی افزایش می‌یابد و در $Un = 8$ انحراف معیار مجدداً کاهش می‌یابد. کاهش مجدد انحراف معیار در $Un = 8$ پس از کاهش و افزایش آن در $Un = 6$ در نمونه‌های ماسه‌ای مرجع [۳۰] و همچنین در نتایج ماسه لای‌دار در همین تحقیق به چشم نمی‌خورد؛ بنابراین با مقایسه نسبت تخلخل اولیه و نسبت تخلخل میانگین می‌توان مشاهده نمود که در $Un = 4$ این دو پارامتر به هم نزدیک هستند اما این امر در $Un = 8$ برقرار نمی‌باشد، بنابراین به نظر می‌رسد در این درصد کاهش تراکم $Un = 8$ خطای آزمایشگاهی رخ داده است بنابراین $Un = 4$ به عنوان درصد کاهش تراکم بهینه (درصد کاهش تراکم) که اگر نمونه‌سازی در آن صورت گیرد، کمترین میزان انحراف از داده‌ها و بیشترین میزان همگنی در نمونه اتفاق می‌افتد) انتخاب می‌گردد که این امر با نتایج [۳۰] مطابقت خوبی دارد. شکل ۷ نتایج مربوط به تغییرات نسبت تخلخل در ارتفاع ماسه ۱۰٪ لای مشاهده می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که با افزایش U_n میزان پراکندگی داده‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار انحراف معیار نیز افزایش می‌یابد تا در $Un = 6$ انحراف معیار داده‌های نسبت تخلخل از میزان نسبت تخلخل میانگین به حداقل می‌رسد و در $Un = 8$ مجدداً افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان گفت که در ماسه با ۱۰٪ لای، $Un = 6$ بهترین درصد کاهش تراکم برای نمونه‌سازی می‌باشد.

در نمودارهای شکل ۸ که مربوط به ماسه با ۲۰٪ لای می‌باشد مشاهده می‌شود که در ۴٪ و $Un = 2$ حداقل میزان انحراف معیار داده‌های نسبت تخلخل مشاهده می‌شود که در مقایسه با پارامتر نسبت تخلخل اولیه می‌توان فهمید که در $Un = 4$ نسبت به سایر Un ها، میزان نسبت تخلخل

در نمونه و آب موجود در ژلاتین کاملاً خشک شود. سپس وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن وزن خاک خشک شده و ژلاتین جامد و کم کردن وزن ژلاتین بر اساس محلول اولیه، وزن خاک خشک به دست می‌آید؛ و با داشتن حجم خاک خشک و حجم کل نمونه نسبت تخلخل در هر قطعه e_j محاسبه می‌شود. سپس نسبت تخلخل میانگین e_m قطعه‌ها در هر نمونه محاسبه می‌شود (رابطه ۴)، همچنین نسبت تخلخل اولیه در کل نمونه e_i با داشتن حجم کل سلول و حجم خاک خشک و وزن خاک خشک ریخته شده به دست می‌آید [۳۰].

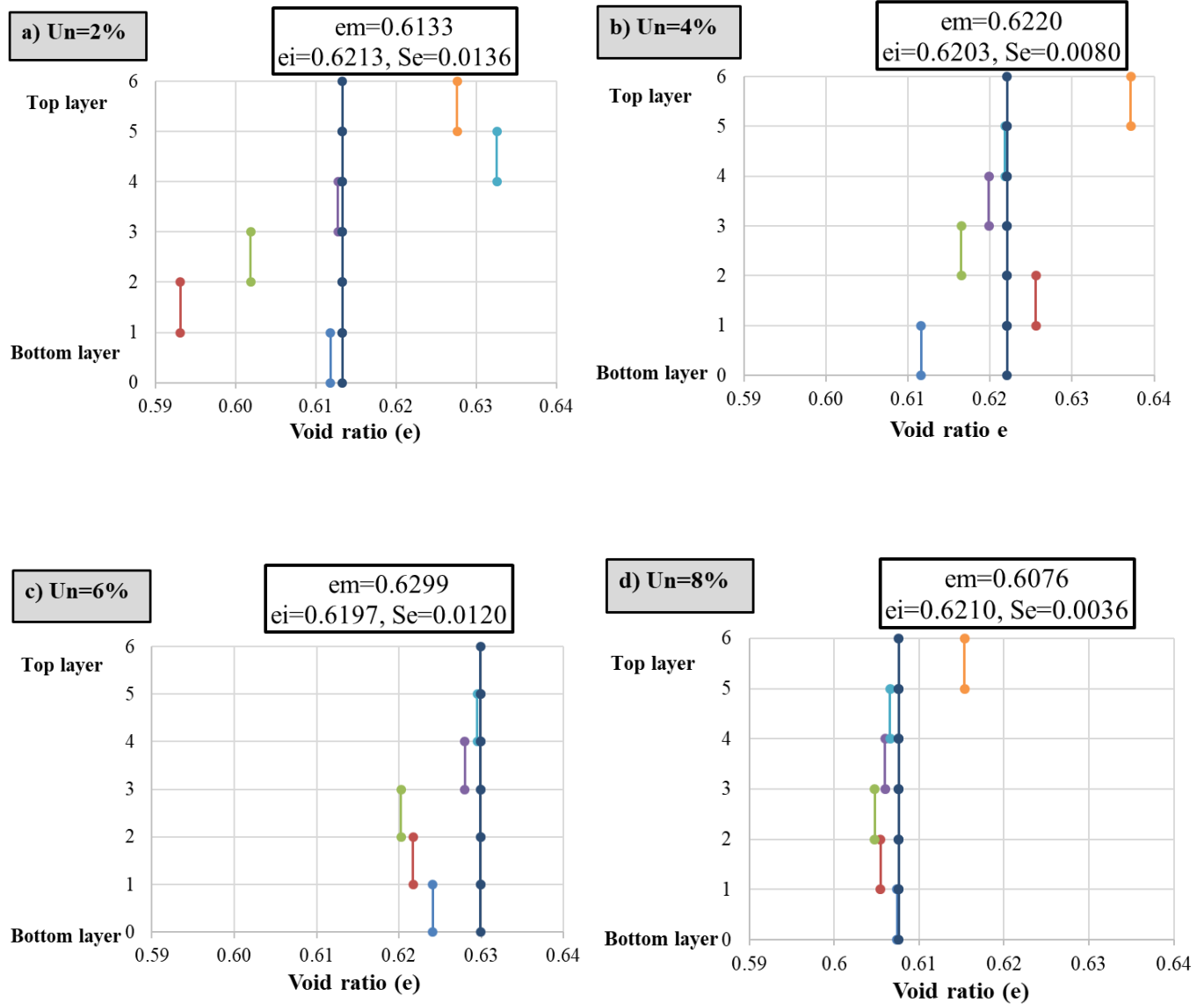
$$e_m = \frac{\sum e_j}{n_i} \quad (4)$$

برای مقایسه نسبت تخلخل در ارتفاع نمونه‌ها به پارامتر دیگری به نام انحراف معیار نیاز است تا میزان پراکندگی نسبت تخلخل را از نسبت تخلخل میانگین در هر نمونه سنجید و با استفاده از آن بهترین میزان درصد کاهش تراکم را به دست آورد. انحراف معیار به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_e = \left[\frac{\sum (e_m - e_j)^2}{n_i} \right]^{0.5} \quad (5)$$

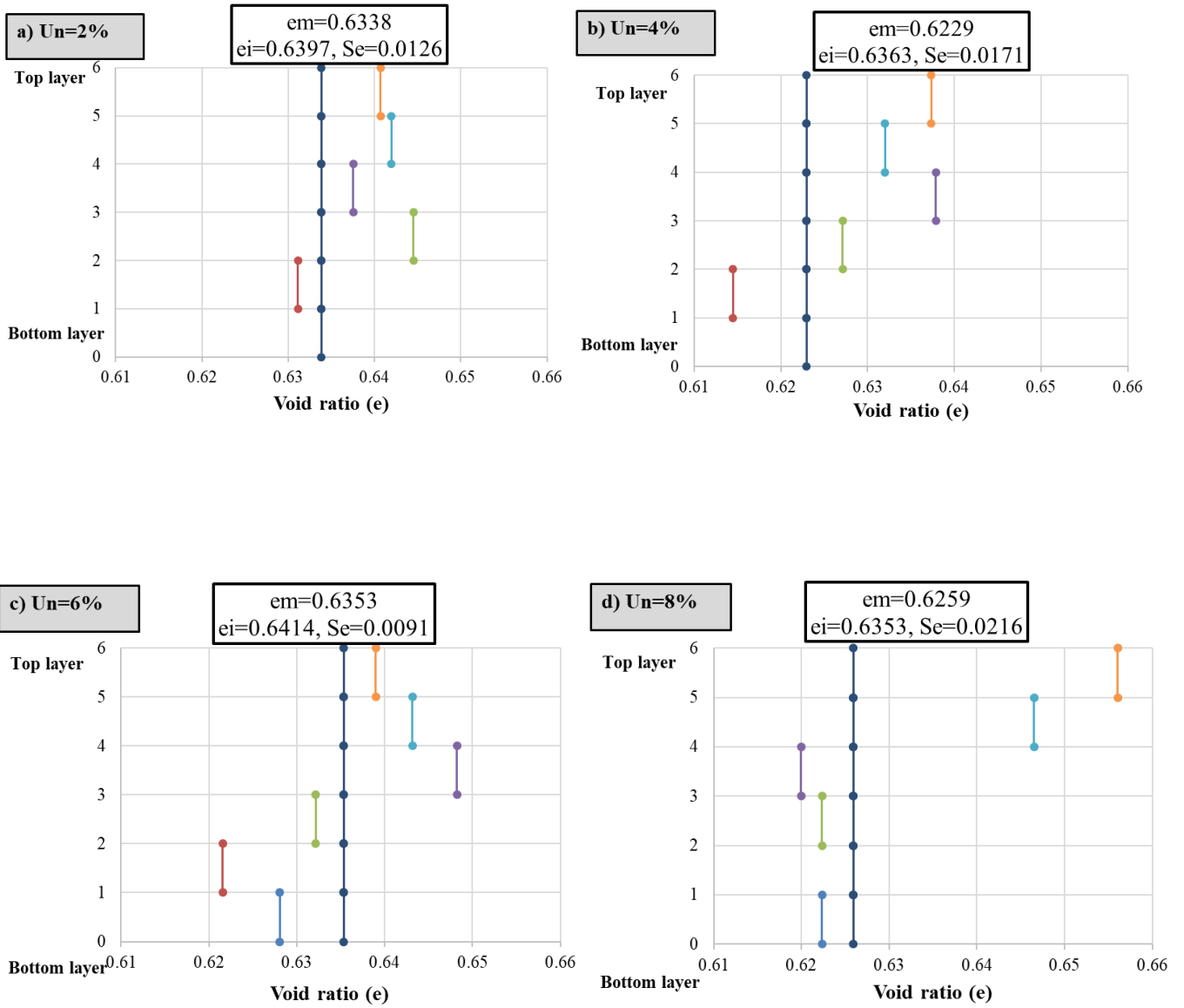
۴- نتایج

نتایج تغییرات نسبت تخلخل در شش لایه مختلف e_j در یک نمونه در مقابل شماره لایه در ارتفاع (شماره ۰-۱ لایه اول در پایین، شماره ۱-۲ لایه دوم و شماره ۵-۶ لایه آخر در بالا) را در هر پارامتر درصد تراکم Un که مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸٪ را بر می‌گیرد، نشان می‌دهد. همچنین مقادیر نسبت تخلخل میانگین (e_m) (به دست آمده از رابطه ۴) مربوط به هر نمونه بر روی هر نمودار به صورت خط قائم نشان داده است تا بتوان نسبت تخلخل را در هر لایه با نسبت تخلخل میانگین مقایسه نمود و نسبت تخلخل اولیه (e_i) اندازه‌گیری شده قبل از تزریق ژلاتین، نیز روی هر نمودار نوشته شده است. علاوه بر این پارامتر انحراف معیار Se نشان دهنده پراکندگی داده‌های نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نسبت به مقدار میانگین داده‌های نسبت تخلخل می‌باشد، بدین صورت که هر چه انحراف معیار کمتر باشد، نشان می‌دهد که نتایج نسبت تخلخل به نسبت تخلخل میانگین نزدیک‌تر و داده‌های روی نمودار به محور قائم (نسبت تخلخل میانگین) نزدیک‌تر و در نهایت نمونه از



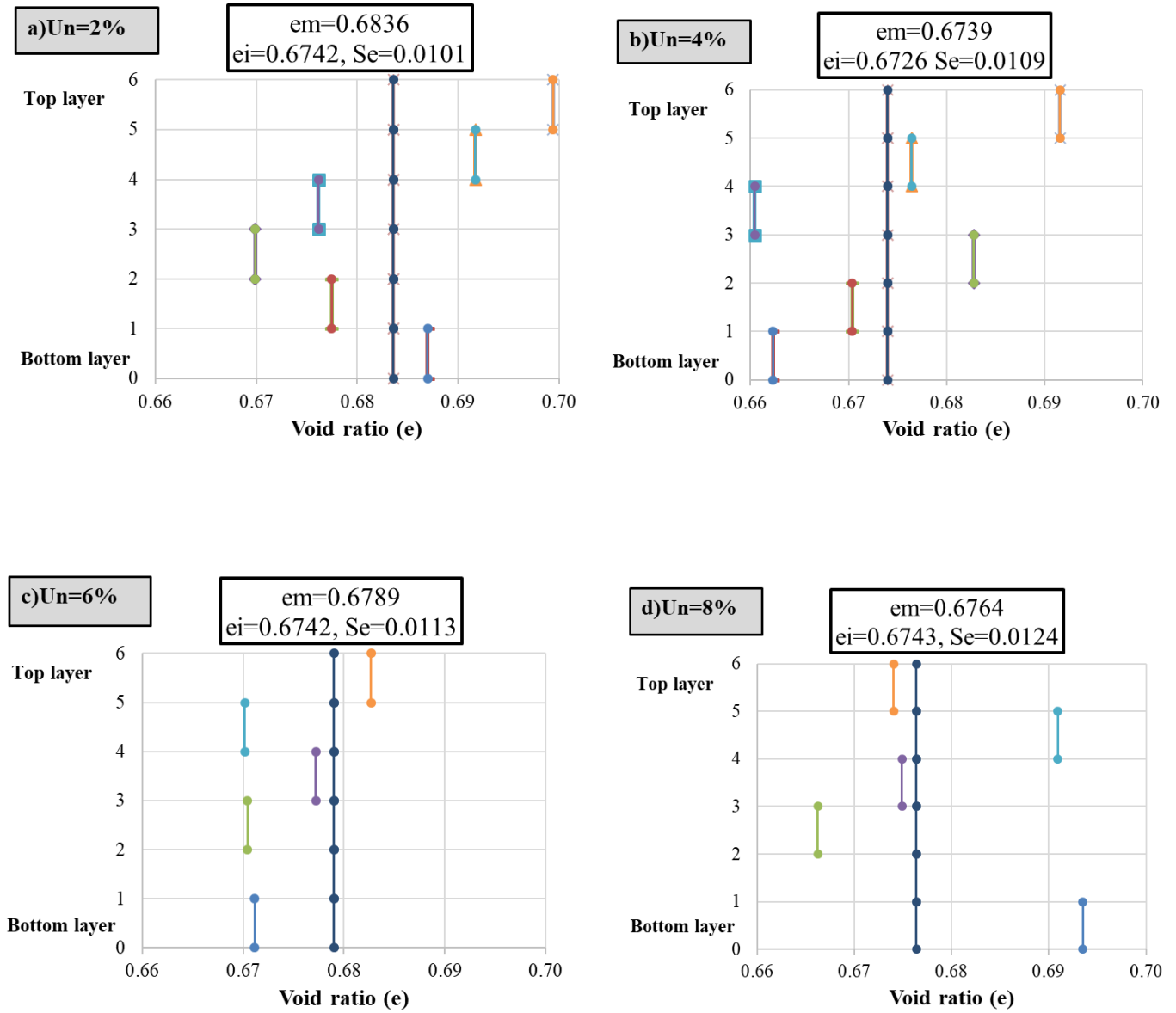
شکل ۶. نمودار تغییرات نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نمونه ماسه خالص با درصد کاهش تراکم الف) ۲٪، ب) ۴٪، ج) ۶٪، د) ۸٪

Fig. 6. Variations of void ratio through sample layers of sandy soil and reduced compaction percent of a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8%



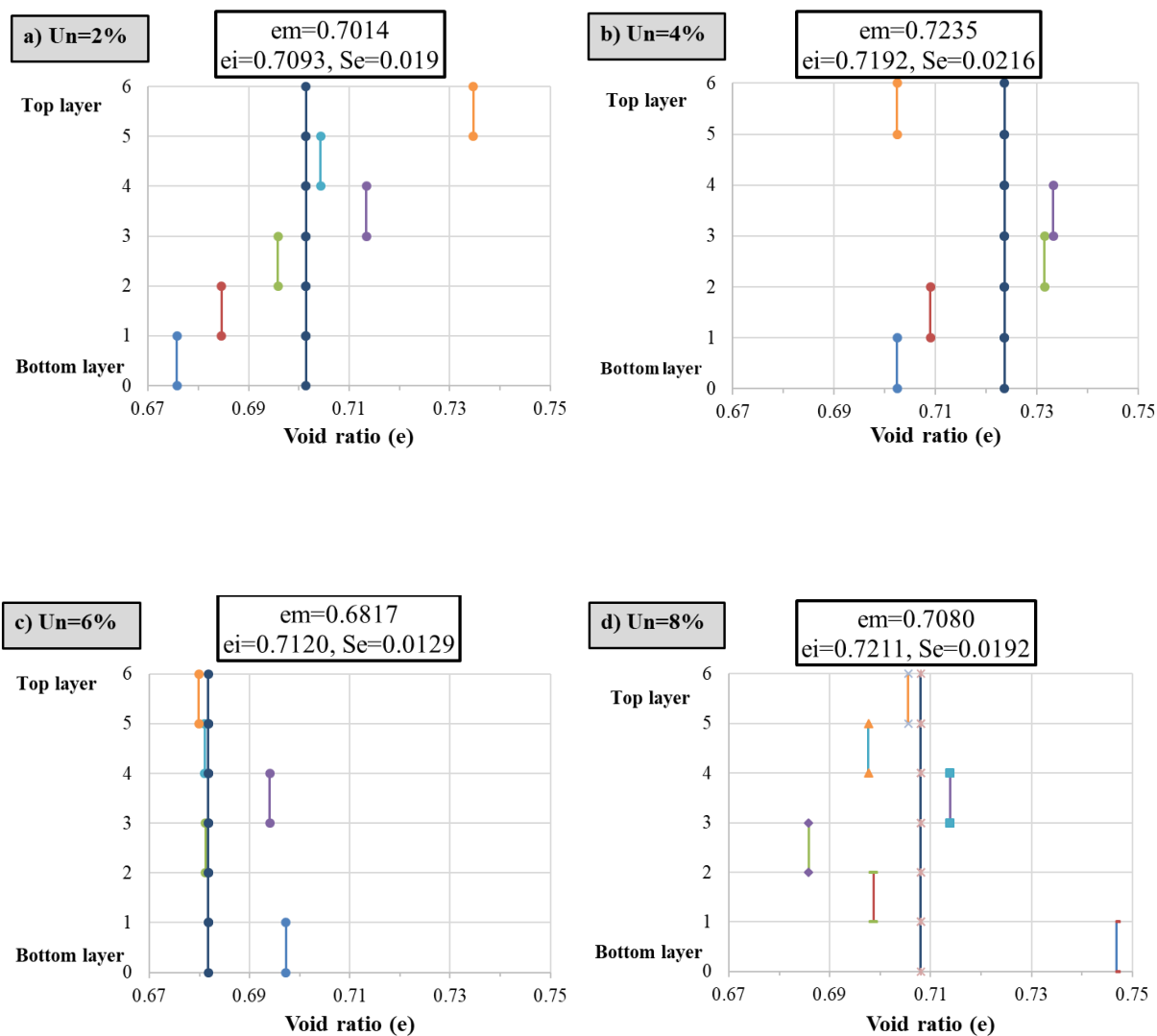
شکل ۷. نمودار تغییرات نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نمونه ماسه با ۱۰٪ لای و درصد کاهش تراکم الف) ۲٪، ب) ۴٪، ج) ۶٪، د) ۸٪

Fig. 7. Variations of void ratio through sample layers of sand with 10% silt and reduced compaction percent of a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8%



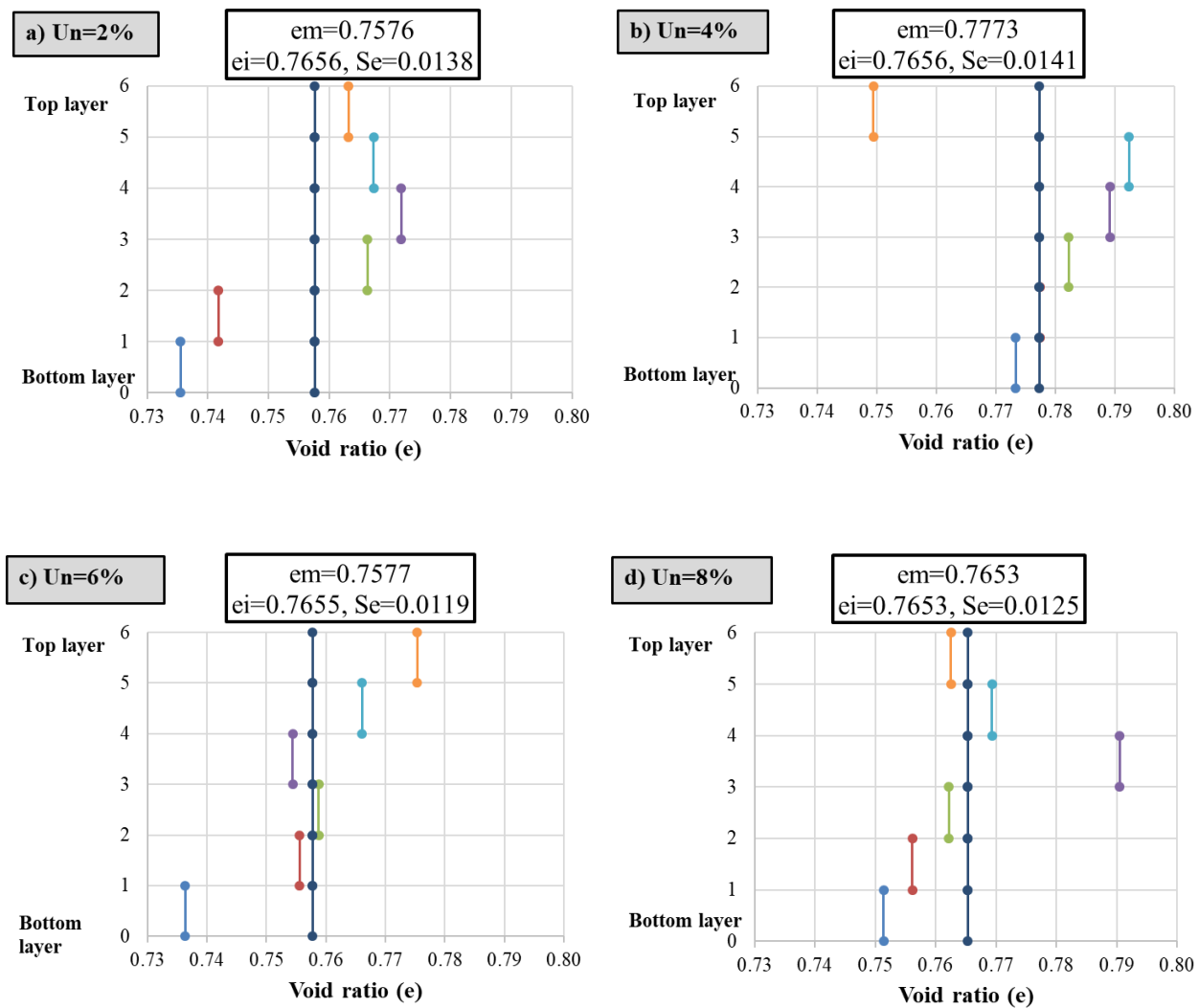
شکل ۸. نمودار تغییرات نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نمونه ماسه با ۲۰٪ لای و درصد کاهش تراکم (الف) ۲٪، (ب) ۴٪، (ج) ۶٪، (د) ۸٪.

Fig. 8. Variations of void ratio through sample layers of sand with 20% silt and reduced compaction percent of a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8%



شکل ۹. نمودار تغییرات نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نمونه ماسه با ۳۰٪ لای و درصد کاهش تراکم الف) ۲٪، ب) ۴٪، ج) ۶٪، د) ۸٪

Fig. 9. Variations of void ratio through sample layers of sand with 30% silt and reduced compaction percent of a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8%



شکل ۱۰. نمودار تغییرات نسبت تخلخل در لایه‌های مختلف نمونه ماسه با ۴۰٪ لای و درصد کاهش تراکم الف) ۲٪، ب) ۴٪، ج) ۶٪، د) ۸٪

Fig. 10. Variations of void ratio through sample layers of sand with 40% silt and reduced compaction percent of a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8%

افزایش Un تا ۴٪ انحراف معیار افزایش پیدا کرده و در $Un = ۶\%$ به مقدار حداقل خود رسیده است؛ و مجدداً در $Un = ۸\%$ افزایش پیدا کرده است؛ بنابراین می‌توان گفت $Un = ۶\%$ مقدار مناسبی برای کاهش تراکم لایه‌های پایینی در نمونه‌سازی به نظر می‌رسد.

در نمودارهای مربوط به ماسه ۴۰٪ (شکل ۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش Un تا ۴٪ انحراف معیار افزایش پیدا کرده و در $Un = ۶\%$ انحراف معیار به حداقل مقدار خود می‌رسد و با توجه به اینکه در $Un = ۸\%$ میانگین نسبت تخلخل و مقدار اولیه آن با هم برابر شده‌اند می‌توان نتیجه

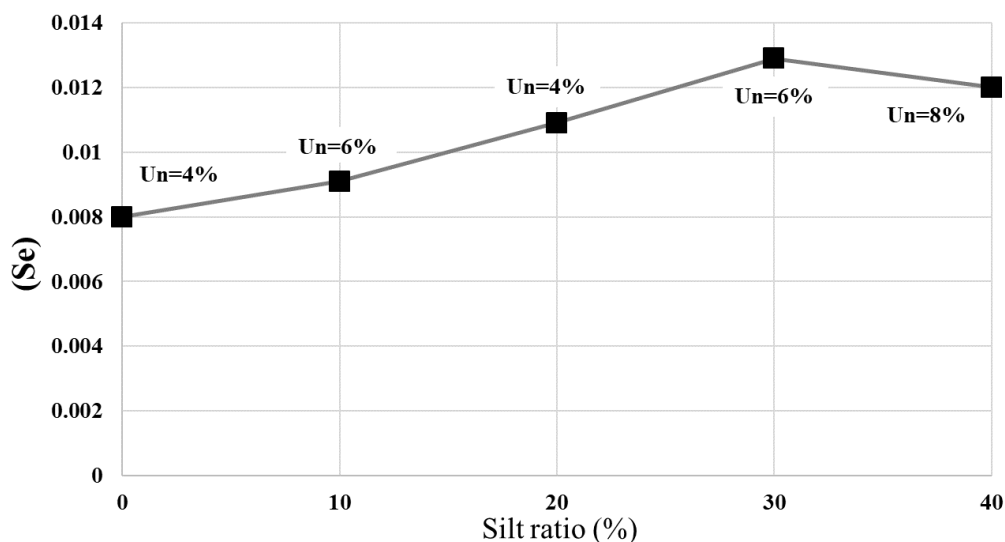
میانگین به نسبت تخلخل اولیه نزدیک‌تر است بنابراین میزان $Un = ۴\%$ برای نمونه‌سازی مناسب به نظر می‌رسد. در این درصد لای مشاهده می‌شود که مقادیر انحراف معیارها به کمترین میزان خود نسبت به سایر ماسه‌های لای‌دار رسیده است. این امر می‌توان نتیجه گرفت که این درصد لای بسیار مناسب برای کوبش ماسه لای‌دار کرنبانی پوشهر می‌باشد که در آن ذرات لای به خوبی در بین حفرات ماسه جای گرفته‌اند و بیشترین میزان همگن بودن نمونه در آن حاصل می‌شود.

در نتایج مربوط به ماسه ۳۰٪ لای (شکل ۹) مشاهده می‌شود که با

جدول ۲. خلاصه مقادیر نسبت تخلخل میانگین و اولیه و مقادیر انحراف معیار داده‌های تخلخل نسبت به مقدار میانگین در U_n بهینه

Table 2. Summary of initial and average void ratio and standard deviation of void ratios from average amounts in optimal U_n

S_e	e_m	e_i	مشخصات خاک	
			نوع خاک	U_n % بهینه
۰/۰۰۸	۰/۶۲۲	۰/۶۲۰	ماسه خالص	۴
۰/۰۰۹۱	۰/۶۳۵	۰/۶۴۱	ماسه با ۱۰٪ لای	۶
۰/۰۱۰۹	۰/۶۷۳	۰/۶۷۲	ماسه با ۲۰٪ لای	۴
۰/۰۱۲۹	۰/۶۸۱	۰/۷۱۲	ماسه با ۳۰٪ لای	۶
۰/۰۱۲۰	۰/۷۶۵	۰/۷۶۵	ماسه با ۴۰٪ لای	۸



شکل ۱۱. نمودار انحراف معیار در مقابل درصد لای در نمونه‌های ماسه تمیز و ماسه لای دار کربناتی بوشهر در درصد تراکم کاهش یافته (U_n) بهینه

Fig. 11. Variation of standard deviation via silt percent in Boushehr carbonated sand and silty sand samples in optimal U_n

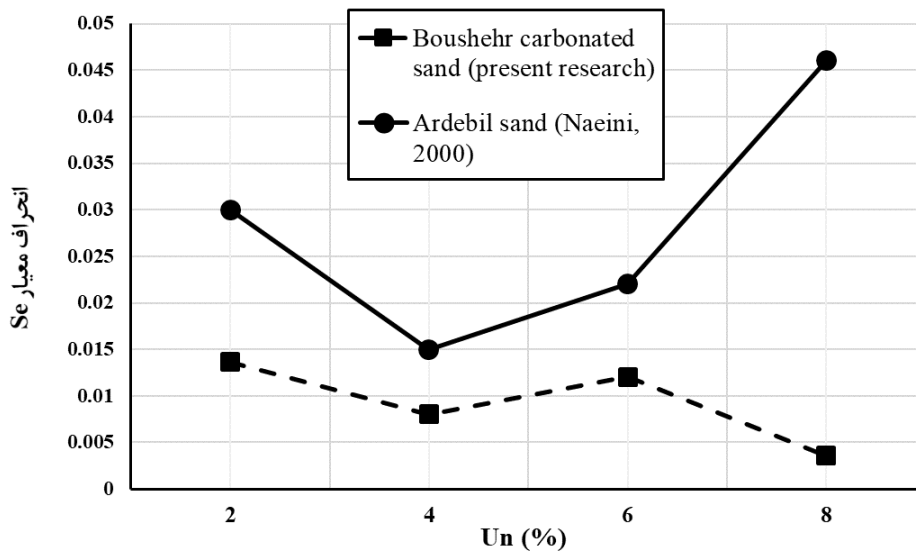
متغیر است و در درصد لای ۱۰ و ۲۰٪ انحراف معیار مقدار اندکی دارد اما با افزایش مقدار درصد لای انحراف معیار داده‌ها نسبت به مقدار میانگین افزایش می‌یابد. این امر حاکی از جای‌گیری لای در بین حفرات ماسه تا درصد لای ۲۰٪ می‌باشد که موجب بهتر شدن تراکم لایه‌ها و همگن شدن بیشتر لایه‌ها می‌شود.

از شکل ۱۱ می‌توان تأثیر درصد سیلت را بر مقدار انحراف معیار در U_n

گرفت که در این مقدار $U_n = ۸\%$ نمونه‌سازی مناسب به نظر می‌رسد.

خلاصه نتایج انحراف معیار و نسبت تخلخل میانگین و نسبت تخلخل اولیه نمونه‌های ماسه لای دار و ماسه خالص در U_n بهینه در جدول ۲ مشاهده می‌شود. شکل ۱۱، نتایج U_n انتخاب شده در مقابل انحراف معیار در هر درصد لای را نشان می‌دهد.

از جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود که میزان U_n بهینه با درصد لای



شکل ۱۲. نمودار انحراف معیار در روش تراکم کاهش یافته در مقابل درصد کاهش تراکم (Un) متفاوت در ماسه تمیز اردبیل [۳۰] و ماسه تمیز کربناتی بوشهر

Fig. 12. Chart of standard deviation for under-compaction method via reduced compaction percent (Un) in Boushehr carbonated sand compared with that of Ardebil sand [30]

معیارها به شدت با نتایج [۳۰] متفاوت است و در این تحقیق مقادیر انحراف معیار نسبت به مقدار میانگین بسیار در حدود ۴۰ الی ۵۶٪ کمتر از مقادیر انحراف معیار در تحقیق [۳۰] می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش تراکم کاهش یافته در نمونه‌سازی سست در ماسه کربناتی بوشهر در درصد لای مختلف به یکنواختی و همگنی مناسب‌تری نسبت به ماسه سیلیسی اردبیل منجر شده است. این امر می‌تواند به دلیل کمتر بودن فاصله بین تخلخل حداکثر و حداقل ماسه کربناتی بوشهر ($e_{max} - e_{min} = 0.27$) نسبت به ماسه اردبیل ($e_{max} - e_{min} = 0.344$) باشد. همچنین از شکل ۱۲ می‌توان مشاهده کرد که در هر دو خاک مقدار انحراف معیار با افزایش پارامتر کاهش درصد تراکم Un ابتدا کاهش می‌یابد و پس از آن افزایش می‌یابد.

۵- جمع‌بندی

نمونه‌های ماسه خالص و ماسه لای‌دار کربناتی بوشهر به روش نمونه‌سازی تراکم کاهش یافته ساخته شده‌اند و با تزریق ژلاتین در این نمونه‌ها میزان درصد کاهش تراکم مناسب در لایه اول به منظور دستیابی به نمونه‌ای همگن برای استفاده در نمونه‌سازی در آزمایش‌های سه محوری استاتیکی و سیکی که بر روی این خاک صورت می‌گیرد، تعیین گردیده

بهینه به وضوح مشاهده نمود، طبق این شکل با افزایش درصد لای مقدار انحراف معیار نسبت به مقدار میانگین نسبت تخلخل افزایش می‌یابد، به ویژه در درصد لای ۳۰ و ۴۰٪ این امر مشاهده می‌شود که این امر نشان دهنده این است که با روش تراکم کاهش یافته، نمونه‌های ماسه لای‌دار همگنی می‌توان ساخت اما میزان همگنی در درصد لای کمتر و مساوی ۲۰٪ بیشتر می‌باشد زیرا فضاهای بین حفرات ماسه‌ای از لای پر می‌شود و تراکم به خوبی انجام می‌گیرد و لایه‌های مختلف نمونه به تراکم هدف نزدیک می‌شود اما در درصد لای بالاتر می‌توان گفت که تدریجاً لای جایگزین ماسه می‌شود و لایه‌های ساخته شده در این روش، اندکی از تراکم هدف دور می‌شود اما به طور کلی می‌توان گفت که فاصله بین مقادیر انحراف معیارها خیلی اندک بوده به طوری که در همه درصدهای لای می‌توان به نمونه همگن مناسبی دست یافت.

نتایج انحراف معیار نسبت تخلخل نسبت به مقدار میانگین در Un های مختلف در ماسه تمیز اردبیل [۳۰] و ماسه تمیز کربناتی بوشهر در تحقیق حاضر که به روش تراکم کاهش یافته ساخته شده‌اند، در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. در ماسه خالص مقدار کاهش درصد تراکم مناسب ۴٪ = Un انتخاب شده است که این امر با نتایج [۳۰] که روش تراکم کاهش یافته را در ماسه اردبیل به کار برده است، مشابه است اما میزان انحراف

ذرات ماسه غلبه می‌کنند و رفتار لای بر رفتار نمونه ماسه‌ی لای‌دار حکم‌فرما می‌شود و میزان انحراف معیار حداقل از همین پارامتر در نمونه‌های با درصد لای کمتر (۱۰ و ۲۰٪)، حدود ۴۴٪ بیشتر به دست آمده است.

(۴) انجام مطالعات بیشتر در درصد لای بالاتر در خاک مشابه، موجب تکمیل این مطالعات خواهد شد اما با توجه به نتیجه‌گیری به دست آمده از این تحقیق پیش‌بینی می‌شود که در درصد لای بالاتر، رفتار لای بر رفتار ذرات ماسه غلبه کرده و بنابراین مقدار U_n بهینه افزایش می‌یابد؛ زیرا همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد لای، تفاوت نسبت تخلخل بیشینه و کمینه افزایش می‌یابد و برای ساخت نمونه سست با درصد تراکم مشابه، نسبت تخلخل بیشتر است و در نتیجه حفرات و فضاهای خالی در نمونه بیشتر شده و انرژی کوبشی بیشتری مصرف می‌شود تا لایه‌ی بالایی به تراکم هدف برسد بنابراین باید لایه اول را درصد تراکم کمتری (U_n بیشتری) نسبت به تراکم هدف ساخت.

۶- فهرست علائم

e	نسبت تخلخل
e_i	نسبت تخلخل اولیه کل نمونه
e_j	نسبت تخلخل در هر قطعه
e_m	نسبت تخلخل میانگین قطعه‌ها در یک نمونه
e_{max}	حداکثر نسبت تخلخل
e_{min}	حداقل نسبت تخلخل
G_s	چگالی ویژه
g	ثابت گرانش
h_n	ارتفاع سقوط چکش در بالای لایه مورد نظر
h_t	ارتفاع کل نمونه
K_0	نسبت تنش جانبی خاک
n_i	شماره لایه مورد نظر در نمونه خاک
n_t	تعداد کل لایه‌ها
S_e	انحراف معیار
U_n	پارامتر درصد کاهش تراکم لایه اول
W_t	وزن خالص مرطوب مورد نیاز برای نمونه‌سازی
γ_{dry}	دانسیته خشک نمونه‌ها
ω	درصد رطوبت نمونه‌ها

منابع

است. نتایج زیر به صورت خلاصه از این تحقیق حاصل شده است:

(۱) به طور کلی در یک درصد لای ثابت با افزایش مقدار درصد کاهش تراکم U_n انحراف معیار کاهش می‌یابد تا در یک U_n خاص انحراف معیار حداقل به دست آید و در نتیجه کمترین پراکندگی نسبت تخلخل به دست می‌آید. این پارامتر U_n به عنوان U_n بهینه انتخاب می‌شود که در آن نسبت تخلخل میانگین لایه‌ها به نسبت تخلخل اولیه نیز بسیار نزدیک است. مقدار U_n بهینه در ماسه خالص و ماسه لای‌دار با درصد لای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪ به ترتیب ۴، ۶، ۴، ۶ و ۸٪ به دست آمده است. سپس با افزایش U_n مجدداً پراکندگی در میزان نسبت تخلخل مشاهده می‌شود و انحراف معیار افزایش می‌یابد. این امر بدین دلیل است که در U_n اندک (۲ و ۴٪)، یعنی زمانی که لایه اول با درصد تراکم کاهش یافته کمتری نسبت به تراکم هدف ریخته می‌شود، احتمال اینکه لایه‌های زیرین تحت تراکم بیشتری در اثر لایه‌های بالایی قرار بگیرند وجود دارد، در نتیجه لایه‌های زیرین نسبت به تراکم هدف، تراکم بالاتری دارند. با افزایش U_n و با رسیدن به U_n بهینه در درصد لای مشخصی این احتمال از بین خواهد رفت و نمونه همگن‌تری خواهیم داشت. در U_n های بالاتر (۶ و ۸٪) مجدداً پراکندگی در داده‌های نسبت تخلخل مشاهده می‌شود زیرا درصد کاهش تراکم لایه زیرین (۶ و ۸٪) به نحوی است که با وجود تراکم توسط لایه‌های بالایی، باز هم به تراکم هدف نمی‌رسد؛ بنابراین برای هر درصد لای یک U_n بهینه وجود دارد.

(۲) با تغییر در درصد لای مقدار پارامتر درصد کاهش تراکم لایه اول U_n مناسب تغییر می‌کند. در درصد لای کمتر (۱۰ و ۲۰٪) این پارامتر به ۴ و ۶٪ محدود می‌شود و در درصد لای بالاتر (۳۰ و ۴۰٪) این پارامتر به مقدار ۶ و ۸٪ افزایش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که در درصد لای کمتر، ذرات لای در بین حفرات ماسه جای می‌گیرند و این امر باعث می‌شود که لایه اول با درصد کاهش تراکم کمتری به تراکم هدف نزدیک شود.

(۳) به طور کلی می‌توان مشاهده نمود که در درصد لای‌های کمتر (۱۰ و ۲۰٪) میزان انحراف معیار اندک است (کمتر از ۰/۰۱) و با افزایش درصد لای تا ۴۰٪ میزان انحراف معیار و پراکندگی داده‌ها تا حدود ۰/۱۳ افزایش می‌یابد. این امر نشان دهنده این است که در درصد لای کمتر (۱۰ و ۲۰٪) ذرات لای به خوبی در بین حفرات ماسه جای می‌گیرند و در ساخت نمونه به روش تراکم کاهش یافته، نمونه‌های همگن‌تری نسبت به درصد لای بالاتر به دست می‌آید؛ اما در درصد لای بیشتر (۳۰ و ۴۰٪) ذرات لای در نمونه به

- F.-Y. Tan, Engineering characteristics of the calcareous sand in Nansha Islands, South China Sea, *Engineering Geology*, 120 (2011) 40-47.
- [12] Y. Xiao, Z. Yuan, C.S. Desai, M. Zaman, Q. Ma, Q. Chen, H. Liu, Effects of load duration and stress level on deformation and particle breakage of carbonate sands, *International Journal of Geomechanics*, 20(7) (2020) 06020014-06020019.
- [13] A. Sadrekarimi, Evaluating the liquefaction and reliquefaction behavior of a carbonate sand, in: the 70th Canadian Geotechnical Conference and the 12th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference held in Ottawa, civil and environmental engineering presentations, Ontario, 2017, pp. 1-4.
- [14] Y. Dehnavi, H. Shahnazari, H. Salehzadeh, R. Rezvani, Compressibility and Undrained Behavior of Hormuz Calcareous sand, *Electronic Journal of Electrical Engineering, EJGE*, 15 (2010) 1684-1702.
- [15] H. Farshbaf Aghajani, H. Salehzadeh, R. Rezvani, Energy equilibrium during crushing of sandy soils under isotropic compression, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016) 1531-1542.
- [16] M. Hassanlourad, H. Salehzadeh, H. Shahnazari, Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands, *International Journal of Civil Engineering*, 9(4) (2011) 307-314.
- [17] S.H.R. Kargar, H. Shahnazari, H. Salehzadeh, Post-cyclic behavior of carbonate sand with anisotropic consolidation, *International Journal of Civil Engineering*, 12(4) (2014) 316-325.
- [18] H. Shahnazari, R. Rezvani, Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study, *Engineering geology*, 159 (2013) 98-105.
- [19] H. Shahnazari, R. Rezvani, m.a. Tutunchian, An Experimental Study on the Phase Transformation Point of Crushable and Non-crushable soils, *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(2) (2017) 176-185.
- [20] H. Shahnazari, H. Salehzadeh, R. Rezvani, Y. Dehnavi, The Effect of Shape and Stiffness of Originally Different Marine Soil Grains on Their Contractive and Dilative
- [1] R. Ladd, Preparing test specimens using undercompaction, *Geotechnical testing journal*, 1(1) (1978) 16-23.
- [2] S.A. Naeini, M.H. Baziar, Effect of sample preparation on steady state, in: *Geotechnical Measurements: Lab and Field*, 2000, pp. 16-29.
- [3] J. Shi, W. Haegeman, V. Cnudde, Anisotropic small-strain stiffness of calcareous sand affected by sample preparation, particle characteristic and gradation, *Géotechnique*, 71(4) (2021) 305-319.
- [4] Y. Jafarian, I. Towhata, M. Baziar, A. Noorzad, A. Bahmanpour, Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 35 (2012) 13-28.
- [5] Y. Jafarian, H. Javdanian, A. Haddad, Strain-dependent dynamic properties of Bushehr siliceous-carbonate sand: experimental and comparative study, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107 (2018) 339-349.
- [6] I. Towhata, *Geotechnical earthquake engineering*, Department of Civil Engineering, University of Tokyo, Tokyo, Japan, 2008.
- [7] J. Shi, W. Haegeman, J. Andries, Investigation on the mechanical properties of a calcareous sand: the role of initial fabric, *Marine Georesources and Geotechnology*, (2020) DOI:10.1080/1064119X.1062020.1775327.
- [8] J. Shi, W. Haegeman, A. Mascini, V. Cnudde, X-ray analysis on the effect of sample preparation on the microstructure of calcareous sands, *Marine Georesources & Geotechnology*, 39(3) (2021) 302-311.
- [9] H. Shahnazari, R. Rezvani, M.A. Tutunchian, Post-cyclic volumetric strain of calcareous sand using hollow cylindrical torsional shear tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124 (2019) 162-171.
- [10] Y. Jafarian, I. Towhata, M.H. Baziar, A. Noorzad, A. Bahmanpour, Strain energy based evaluation of liquefaction and residual pore water pressure in sands using cyclic torsional shear experiments, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 35 (2012) 13-28.
- [11] X.-Z. Wang, Y.-Y. Jiao, R. Wang, M.-J. Hu, Q.-S. Meng,

- [27] Standard test methods for specific gravity of soils by water pycnometer, in: ASTM D854-14, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [28] Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density, in: ASTM D4254-16, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [29] Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, in: ASTM D4253-16e1, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [30] S.A. Naeini, The influence of silt presence and sample preparation on liquefaction potential of silty sands, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2001.
- [31] Laboratory preparation of chemically grouted soil-specimens for obtaining design strength parameters, in: ASTM D4320-02, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- Behavior, KSCE Journal of Civil Engineering, 18(4) (2014) 975-983.
- [21] M.H.B. Zare, Alireza, Boushehr liquefaction hazard zonation based on SPT and results presentation by using GIS platform, Journal of Civil and Environmental Engineering, 48(3) (2018) 109-119.
- [22] M. Davoudi, seismic geotechnical microzonation studies, in, international Institute of earthquake engineering and seismology, Project in connection with industry, 2010.
- [23] R. Rezvani, Investigation of volumetric strain in saturated carbonated soil after applying cyclic load University of Science and Technology, Tehran, Iran, 1395.
- [24] BS1377-3, BS 1377: part 3 Chemical and electro-chemical tests, BSI, London, 1990.
- [25] Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis, in: ASTM D6913-17, ASTM International, 2017.
- [26] M. powers, A new roundness scale for sedimentary particles, Journal of sedimentary petrology, 23(2) (1953) 117-119.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Ghanbari Alamouti, R. Ziaie Moayed, S. A. H. Naeini, Under-compaction method for sample preparation of Boushehr carbonated silty sand, Amirkabir J. Civil Eng., 54(9) (2022) 3243-3262.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20439.7433



