

تأثیر تغییر ترتیب لایه‌های رسی و ماسه‌ای در دانسیته‌های مختلف بر شاخص رمبندگی خاک

وحیدرضا اوحدی^{۱*}، سید امیرحسین مرتضوی^۲

*۱-استاد گروه عمران، دانشگاه بوعلی سینا و عضو هیئت علمی وابسته دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده فنی مهندسی، مؤسسه آموزش عالی عمران و توسعه

vahidouhadi@yahoo.ca

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۳ تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۲۷

چکیده

خاک‌هایی که در اثر افزایش رطوبت باعث نشست‌های ناگهانی، فرونشست، و فروچاله در سطح زمین می‌شوند خاک‌های رمبنده نامیده می‌شوند. وقوع این گونه فروچاله‌ها در بخش‌هایی از ایران و کشورهای دیگر از جمله مشکلات ژئوتکنیکی است. در زمینه تأثیر تغییر لایه‌های ماسه و رس بر رفتار رمبندگی پژوهش‌های محدودی انجام شده است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر تغییر ترتیب لایه‌های رسی و ماسه‌ای بر تغییرات شاخص رمبندگی است. برای دستیابی به هدف فوق، خاک ماسه‌ای نواحی شمالی استان همدان و رس کائولینیت برای ساخت نمونه‌ها در سه سیستم تک لایه، دو لایه و سه لایه در آزمایش رمبندگی استفاده شده است. نمونه‌ها با وزن مخصوص‌های ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در قالب دستگاه تحکیم، به صورت لایه به لایه متراکم شده و شاخص رمبندگی آنها تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که سازوکار رمبندگی به مقدار قابل توجه‌ای تابعی از ترتیب قرارگیری لایه‌های رسی و ماسه‌ای است. در سیستم دو لایه‌ای (لایه تحتانی ماسه و لایه فوقانی رس)، طبقه‌بندی خاک از شاخص رمبندگی متوسط در سیستم تک لایه (لایه ماسه‌ای) به شاخص رمبندگی شدید تغییر کرده است. با افزایش وزن مخصوص خشک خاک از تأثیر چینش لایه‌ها در مقدار شاخص رمبندگی کاسته می‌شود.

واژگان کلیدی: شاخص رمبندگی، خاک لایه لایه، وزن مخصوص خشک خاک، رس، ماسه.

۱- مقدمه

ناگهانی زیادی در اثر مرطوب شدن خاک شده و در نهایت خاک رمبش می‌کند [1-4]. در این گونه از خاک‌ها شرایط خاص قرارگیری ذرات در کنار یکدیگر سبب شکل‌گیری نیروهای موقتی در بین ذرات خاک شده و باعث می‌شود که ساختار خاک در شرایط خشک به صورت پایدار باقی بماند [5-7]. خاک‌های

تغییر حجم ناگهانی خاک که با حذف عامل پیوند دهنده دانه‌های خاک همراه است، رمبندگی نامیده می‌شود. کاهش قدرت مکش و ضعیف شدن پیوند بین دانه‌ها، که همراه با مرطوب شدن خاک به صورت اتفاقی یا عمدی به وجود می‌آید، باعث تغییر حجم

فروریزی بیشتر شامل رسوبات بادی و یا رسوبات ته‌نشین شده کنار رودخانه‌ها بوده و ساختار لایه‌ای و سست دارند [8].

خاک‌های لسی از خاک‌های مسأله‌دار هستند که با افزایش رطوبت خاک، تحت بار ثابت، کاهش حجم قابل توجه‌ای نشان می‌دهند [1-11]. این خاک‌ها در گروه خاک‌های رمنده قرار می‌گیرند [12-14]. حضور این خاک‌ها در کشورهای زیادی همچون چین، روسیه، ایالات متحده آمریکا، فرانسه، آلمان، نیوزیلند و آرژانتین گزارش شده است [15]. در مجموع، بر اساس مطالعات صورت گرفته در حال حاضر بیش از ۶۰ کشور با مشکلات ناشی از نشست لایه‌های خاک روبرو هستند. استفاده از مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی به عنوان یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی تغییرات نشست خاک‌های لایه‌ای استفاده شده است [17].

برای ارزیابی رمندگی، شاخص رمندگی خاک بر اساس استاندارد ASTM D5333-03 با استفاده از تجهیزات آزمایش تحکیم تعیین می‌شود. بر اساس استاندارد فوق خاک‌هایی که دارای شاخص رمندگی بزرگتر از ۶٪ هستند به عنوان خاک‌هایی با درجه رمندگی شدید طبقه‌بندی می‌شوند. پژوهش‌های زیادی در زمینه تأثیر حضور رس در خاک ماسه‌ای رمنده انجام شده است، در سال ۲۰۱۰ میلادی، سه نوع رس که شامل رس بتونیت، نانو رس طبیعی و نانو رس صنعتی بود با درصدهای مختلف از ۵ تا ۳۰٪ ارزیابی قرار شد [17]. نتایج نشان داد که با اشباع کردن نمونه‌ها در ۲۰۰ کیلوپاسکال، رس بتونیت و نانو رس صنعتی رفتاری یکسان دارند. میزان درصد رس موجود در خاک تأثیر اساسی بر قابلیت رمندگی خاک دارد. در صورتی که درصد رس خاک کم باشد، رس قبل از اشباع شدن به عنوان پیوند دهنده بین ذرات عمل می‌کند. بعد از اشباع شدن، پولک‌های رسی اشباع به علت کاهش اصطکاک بین دانه‌ها سبب افزایش رمندگی می‌شوند. با افزایش درصد رس، با توجه به خاصیت تورمی آن، مقدار رمندگی کاهش می‌یابد [18]. تعیین درصد رس بحرانی برای رسیدن به بیشترین رمندگی در خاک توسط پژوهشگران مختلف ارزیابی و مطالعه آزمایشگاهی شده است [19-20]. بر اساس مطالعات پژوهشگران فوق، خاک ماسه‌ای با درصدهای متفاوت رس از ۱۰٪ تا ۴۰٪ درون رینگ

تحکیم متراکم شد و در نهایت این نتیجه‌گیری حاصل شد که برای خاک با بیش از ۳۰٪ رس، شاخص رمندگی بسیار کم و برای خاک با کمتر از ۵٪ رس، شاخص رمندگی ناچیز است. همچنین در پژوهش دیگری با افزایش درصد کانی رس ایلیت میزان رمندگی با افزایش رس تا ۳۰٪ به بیشترین مقدار خود رسید و سپس با افزایش مقدار درصد ایلیت از آن مقدار، شاخص رمندگی نه‌تنها افزایش نیافت بلکه روند کاهشی پیدا نمود [28].

در مجموع، آنچه در بخش قابل توجه پژوهش‌های قبلی در خصوص مطالعه عوامل مؤثر بر شاخص رمندگی خاک بحث و بررسی شده است، شامل عملکرد فیزیکی بین ذرات، چگونگی اندرکنش شیمیایی مصالح و همچنین شرایط مختلف مخلوط ماسه و رس و یا حضور نمک در این گونه از خاک‌ها بوده است [21-23]. پژوهشگران نشان داده‌اند که جایگزینی بخشی از خاک مستعد به رمندگی سبب بهبود رفتار خاک رمنده می‌شود. به شکلی که استفاده از لایه‌های ماسه‌ای متراکم شده در لایه فوقانی خاک رمنده سبب افزایش قابلیت باربری خاک بعد از اشباع شدن می‌شود [29]. به دلیل وجود خاک‌های لایه در محل و فقدان داده‌های لازم برای رفتار رمندگی خاک‌های لایه لایه، لازم است در خاک‌های رمنده از آزمایش‌های دان هول و آزمایش بارگذاری صفحه استفاده شود [30]. از سوی دیگر، مدل‌های فیزیکی به عنوان یکی از روش‌های متعارف پژوهشی برای درک رفتار مسائل پیچیده رفتاری خاک‌ها شناخته شده و استفاده می‌شوند [2].

در تکمیل این بحث، به عنوان یک مطالعه موردی، بررسی‌های محلی و تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که در نواحی شمالی استان همدان وقوع رمندگی در خاک‌های با تناوب لایه‌های مختلف ماسه‌ای و رسی به وقوع پیوسته است [17, 23]. با این وجود در پژوهش‌های پیشین به نقش حضور لایه و میان لایه‌های رسی و ماسه‌ای بر رفتار رمندگی خاک رمنده توجه بسیار محدودی شده است. از آنجا که در پژوهش دیگر محققین برای اندازه‌گیری قابلیت رمندگی خاک‌های لایه لایه مدل فیزیکی خاصی ارائه نشده است، به نظر می‌رسد استفاده از مدل آزمایش رمندگی با استفاده از تجهیزات تحکیم به عنوان

درجه حرارت ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌طور کامل خشک شده تا آماده نمونه سازی شود.

در خصوص استفاده از آزمایش رمبندگی برای خاک‌های لایه لایه، توجه به سه نکته اساسی ضروری است. نکته اول آنکه اکنون استاندارد مشخصی برای ارزیابی قابلیت رمبندگی خاک‌های لایه لایه وجود ندارد. دومین مورد، توجه به این نکته است که در استاندارد ASTM D5333-03 در بند ۵-۲-۱ به صورت صریح بیان شده‌است که تعیین قابلیت رمبندگی خاک‌ها، همراه با عدم قطعیت است و علت آن عدم امکان ارائه یک معیار واحد برای همه خاک‌های رمبند بیان شده‌است. بطوری‌که در بند ۵-۲-۱ استاندارد ASTM D5333-03 بیان شده است که ممکن است برخی از خاک‌ها بعد از اضافه شدن آب، و تا قبل از رسیدن تنش قائم به یک مقدار مشخص، تورم کنند و رمبندگی در آن‌ها بعد از اضافه شدن تنش فوق رخ دهد. سومین نکته نیز مورد ذکر شده در بند ۱۱-۲-۱ استاندارد است که در این بند بیان شده‌است که در گزارش داده‌ها لازم است چگونگی ساخت نمونه از منظر دست نخورده بودن، و یا تهیه نمونه به روش بازسازی، و یا روش‌های دیگر آماده سازی نمونه قید شود [16]. به استناد این سه نکته، می‌توان استدلال نمود که در خاک‌های لایه لایه نیز استفاده از آزمایش تعیین قابلیت رمبندگی با استفاده از استاندارد ASTM D5333-03 به شرط بیان دقیق روش نمونه‌سازی با استاندارد مغایرت ندارد. از سوی دیگر اگرچه در مدل‌های فیزیکی لازم است اثر مقیاس منظور شود، لیکن در صورت تکرار مدل‌های فیزیکی در شرایط مختلف، مقایسه نتایج بدست آمده حاوی نتایج کاربردی و قابل اعتماد است [31]. در این پژوهش، به منظور تراکم نمونه‌ها در قالب تحکیم، مقدار وزن لازم خاک برای ساخت نمونه با توجه به مشخص بودن حجم رینگ و با در نظر گرفتن وزن مخصوص هر نمونه، اندازه‌گیری شده است. سپس با توجه به مشخص بودن وزن لازم برای ساخت هر نمونه، نمونه‌ها با رطوبت ۱۵٪ برای متراکم شدن در سه لایه جداگانه درون رینگ فلزی به روش استاتیکی متراکم شده است. در واقع، برای حصول وزن مخصوص هدف، وزن خاک هر لایه با ترازوی دقیق توزین شده و سپس به روش

نزدیکترین مدل قابل دسترس در حالت مقایسه‌ای می‌تواند ایده مناسبی از رفتار خاک‌های لایه لایه مستعد رمبندگی ارائه دهد. هدف اصلی این پژوهش، مطالعه تأثیر تغییر ترتیب لایه‌های رسی و ماسه‌ای بر تغییرات شاخص رمبندگی خاک رمبند است. همچنین در این مقاله اثر تغییرات دانسیته خاک بر دامنه تأثیر تغییر لایه‌ها بر رمبندگی مطالعه قرار شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نمونه‌های خاک

در این پژوهش از نمونه ماسه ریزدانه و رس کائولینیت استفاده شده است. ماسه استفاده شده در این پژوهش به صورت طبیعی و از منطقه مورد مطالعه در شمال استان همدان در موقعیت جغرافیایی طولی $48^{\circ}32'$ و عرضی $34^{\circ}51'$ تهیه شده است. در این منطقه وقوع رمبندگی‌های وسیع گزارش شده است [17]. نمونه ماسه از مجاورت فروچال‌های شمال همدان اخذ شده‌است. نمونه خاک مطالعه شده به لحاظ دانسیته در محل، دارای شرایط عمومی خاک‌های رمبند بوده است (خاک ماسه‌ای با دانسیته‌ی خشک بسیار کم $1/3$ گرم بر سانتی‌مترمکعب) [24]. با توجه به درصد تراکم نسبی و نمودارهای رمبندگی پیشنهادی توسط پلز و همکاران، شاخص رمبندگی بزرگی برای خاک با وزن مخصوص خشک $1/3$ گرم بر سانتی‌مترمکعب قابل انتظار است [25]. علت انتخاب خاک کائولینیت به عنوان نمونه رسی مورد آزمایش، غیر فعال بودن این خاک و حضور آن به عنوان کانی رسی غالب در رمبندگی‌های به وقوع پیوسته در ناحیه شمالی استان همدان بوده‌است [28]. نمونه کائولینیت استفاده شده در این پژوهش با نام تجاری کائولینیت سوپر زنوس تبریز است.

۲-۲- روش انجام پژوهش

به منظور تعیین شاخص رمبندگی نمونه‌ها، برای جداسازی بخش ماسه‌ای، ابتدا خاک را الک کرده و عبوری از الک 40 و مانده روی الک 200 که نماینده خاک ماسه‌ای ریزدانه است را جدا نموده و با شستشوی آن، بخش عبوری از الک 200 حذف شده است. سپس نمونه خاک ماسه‌ای ریزدانه در گرم‌خانه با

استاتیکی با دقت در ضخامت لایه مورد نظر متراکم شده است. به بیان دیگر نمونه‌ها به روش دانسیته کنترل بازسازی شده‌اند و برای تراکم نمونه‌ها در هر لایه نیازی به استفاده از بیشترین وزن مخصوص خشک خاک و درصد رطوبت بهینه نیست. درصد رطوبت ۱۵٪ نیز فقط به منظور سهولت تراکم استفاده شده است. با توجه به تأثیر قابل ملاحظه‌ی درصد رطوبت بر مقدار شاخص رمبندگی و به منظور اندازه‌گیری بیشترین شاخص رمبندگی، قبل از انجام آزمایش، کلیه نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت در دمای ۳۶ درجه خشک شده و آماده بارگذاری شده است [5, 21, 27]. سپس برای بارگذاری نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌ها درون

دستگاه تحکیم قرار داده شده و یک‌بار با افزایش مرحله‌ای بارگذاری در تنش‌های ۵، ۱۲، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، کرنش‌های آن ثبت شده است و بار دیگر نمونه‌ها در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال اشباع شده و ۲۴ ساعت به حال خود رها شده و بعد از گذشت این زمان، کرنش نمونه قرائت شده است. برای اشباع کردن نمونه در ۲۰۰ کیلوپاسکال از آب مقطر استفاده شده است. سپس نشانه‌های تخلخل قبل و بعد از اشباع شدن در این آزمایش تعیین و شاخص رمبندگی هر نمونه بر اساس استاندارد D5333-03 ASTM محاسبه شده است.

جدول ۱. نمونه‌های ساخته شده در سیستم تک لایه، دو لایه و سه لایه در قالب تحکیم

Layers	Samples	$\gamma_d (\frac{g}{cm^3})$	Degree of Compaction (%)
One layer	Fine-grained Sand	1.3	66
		1.5	76
		1.7	86
Two Layers	-Bottom First Layer, Fine-grained Sand -Second Layer, Clay	1.3	66
		1.5	76
		1.7	86
	-Bottom First Layer, Clay -Second Layer, Fine-grained Sand	1.3	66
		1.5	76
		1.7	86
Three Layers	-Bottom First Layer, Fine-grained Sand -Second Layer, Clay -Third Layer, Fine-grained Sand	1.3	66
		1.5	76
		1.7	86
	-Bottom First Layer, Clay -Second Layer, Fine-grained Sand -Third Layer, Clay	1.3	66
		1.5	76
		1.7	86

Table 1. Prepared Samples in One, Two, and Three Layers at Consolidation Mold

برای بررسی تأثیر حضور لایه رسی کائولینیت بر تغییرات شاخص رمبندگی، نمونه‌هایی با چینش‌های مختلف لایه‌ای و میان لایه‌ای، خاک ماسه‌ای ریزدانه و رس کائولینیت در سه سیستم تک لایه، دو لایه و سه لایه ساخته شده است. همچنین با توجه به اینکه هدف اصلی از این پژوهش، بررسی اثر تغییر ترتیب لایه‌های رسی و ماسه‌ای ریزدانه بر شاخص رمبندگی خاک است از حلقه آزمایش تحکیم به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر استفاده شده است تا اثر لایه‌ها در مقیاس بزرگتر قابل بررسی و مطالعه باشد. برای ارزیابی تأثیر تغییر وزن مخصوص در سیستم‌های لایه‌ای بر شاخص رمبندگی خاک از وزن مخصوص‌های ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب استفاده شده است (جدول ۱). انتخاب دامنه تغییرات فوق برای وزن

مخصوص خشک نمونه‌ها، به منظور انجام آزمایشها در دانسیته‌های بسیار کم، کم، و متوسط است. ضمن آنکه بر اساس پژوهشهای دیگر پژوهشگران، دو محدوده دانسیته بسیار کم و دانسیته کم در خاک‌های مستعد رمبندگی مشاهده شد. [8].

همچنین بر اساس نتایج ارائه شده در مقالات علمی، نمونه‌های خاک دارای دانسیته بزرگ‌تر از ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب فاقد قابلیت رمبندگی هستند و این مقدار دانسیته به عنوان دانسیته نظیر حد بالائی امکان وقوع رمبندگی در خاک عنوان شده است [23].

نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش تحکیم در سه سیستم لایه‌ای به صورت تک لایه، دو لایه و سه لایه با چینش‌های مختلف لایه‌ای و میان لایه‌ای و با دانسیته‌های ذکر شده در قبل تهیه شده است. در سیستم یک یا چند لایه‌ای،

این در حالتی است که در منطقه مطالعه شده که نمونه از آن اخذ شده، رمبندگی‌های قابل توجهی گزارش شده است. بر این اساس نتیجه می‌شود که نمونه تک لایه (ماسه‌ی ریزدانه) نمی‌تواند رمبندگی‌های دشت‌های شمال استان همدان را توجیه کند.

۲-۳- تأثیر حضور لایه رسی بر رمبندگی ماسه

رفتار رمبندگی در شکل (۲) نشان دهنده سه نمونه با وزن مخصوص‌های متفاوت ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب و در حالتی که لایه‌ی رسی بین دو لایه ماسه‌ای است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود هر سه نمونه در شرایط خشک (غیر اشباع) نشست‌های خیلی کمی را از خود نشان داده‌اند. در صورتی که با اشباع کردن نمونه‌ها در ۲۰۰ کیلوپاسکال، شاخص رمبندگی برای وزن مخصوص‌های ۱/۳ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب برابر ۵/۵٪ و ۲/۱٪ و در وزن مخصوص ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب برابر ۱/۶٪ است. بر اساس این نمودار، حضور رس اثر قابل توجه‌ای بر تغییر شاخص رمبندگی نمونه‌ای که با وزن مخصوص ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب ساخته شده است در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با وزن مخصوص خشک ۱/۳ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب نداشته است. با توجه به شرایط یکسان آماده‌سازی نمونه‌ها، تغییرات به دست آمده در مقادیر شاخص رمبندگی ناشی از حضور لایه‌ی رسی همراه با لایه‌ی ماسه‌ای بوده و تابعی از وزن مخصوص خشک خاک است. به شکلی که در شرایط تراکم بیشتر نمونه، شاخص رمبندگی کاهش یافته است. با توجه به داده‌های ارائه شده در شکل‌های (۱ و ۲) ملاحظه می‌شود که شاخص رمبندگی ماسه مطالعه شده در وزن مخصوص ۱/۳ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب در حالت عادی به ترتیب برابر ۳/۸٪ و ۱/۶٪ به مقادیری برابر ۵/۵٪ و ۲/۱٪ در حالت حضور میان لایه رسی افزایش یافته است.

لایه‌های مختلف دارای دانسیته‌ی یکسان بوده‌است. لازم به تأکید است که کلیه آزمایش‌های این پژوهش با سه بار تکرار انجام شده تا از درستی نتایج، اطمینان کافی حاصل شود. همچنین آزمایش‌های این پژوهش با استفاده از دو نمونه ماسه ریز و درشت تکرار شده است که نتایج بدست آمده، الگوی تغییر مشابهی را در خصوص تأثیر لایه‌ها نشان داده است. با این وجود به علت محدودیت در ارائه مقدار نتایج این پژوهش، در اینجا فقط نتایج مربوط به ماسه ریز است.

۳- بحث و بررسی

۱-۳- اندازه‌گیری شاخص رمبندگی ماسه ریزدانه

نتایج شکل (۱) اندازه‌گیری شاخص رمبندگی نمونه ماسه‌ای ریزدانه مطالعه شده در درصد‌های تراکم اولیه متفاوت را نشان می‌دهد. محور قائم مقدار نشانه خلاء (نسبت تخلخل) نسبی است. منظور از نشانه خلاء نسبی، نسبت نشانه خلاء بعد از هر مرحله بارگذاری و حصول تعادل در هر مرحله از آزمایش رمبندگی (e) به نشانه خلاء اولیه (e_۰) (بعد از نمونه‌سازی) است. به این ترتیب به یک کمیت بدون بعد رسیده بطوری که در ترسیم نمونه‌ها اثر تغییر جزئی در نشانه خلاء اولیه نمونه‌ها در آزمایش‌های مختلف حذف می‌شود. در این صورت امکان مقایسه نتایج ارائه شده در شرایط مختلف نمونه‌های یک یا چند لایه‌ای فراهم می‌شود.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج آزمایش ادومتری انجام شده بیانگر تغییرات نشانه خلاء پس از اشباع شدن نمونه‌های مورد نظر است. به شکلی که مقادیر شاخص رمبندگی (I_e) خاک، برای هر سه وزن مخصوص خشک متفاوت ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب به ترتیب برابر ۳/۸٪، ۱/۶٪ و ۱/۱٪ بوده‌است. با توجه به طبقه‌بندی ارائه شده در استاندارد ASTM D5333-03 برای وزن مخصوص خشک ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب مقدار شاخص رمبندگی متوسط، و در وزن مخصوص‌های ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب مقادیر شاخص رمبندگی خیلی کم بوده و نشان دهنده این است که نمونه ماسه‌ای، رمبندگی قابل ملاحظه‌ای از خود نشان نمی‌دهد.

شکل ۱. تغییرات شاخص رمبندگی ماسه ریزدانه مورد آزمایش در سه وزن مخصوص ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، روش اودومتري ساده

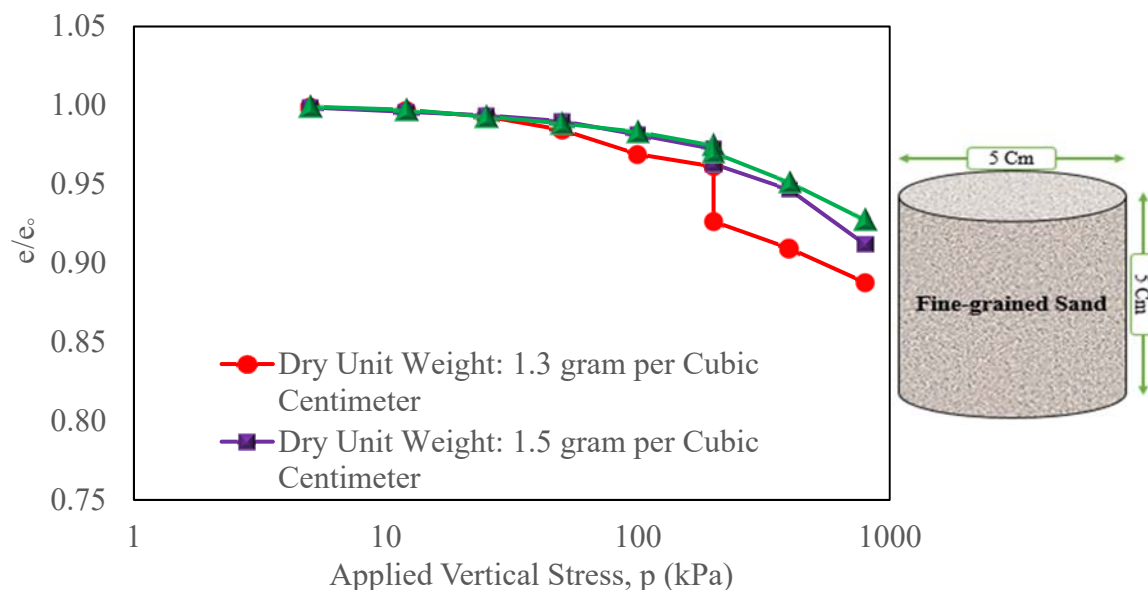


Fig. 1. Collapse Index for Sandy Samples at Three Different Dry Density of 1.3, 1.5, and 1.7 g/cm³ in Oedometer Test.

شکل ۲. رمبندگی برای سه نمونه با وزن مخصوص‌های خشک ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ g/cm³ در حالت نمونه‌ی رسی قرار گرفته بین دو لایه‌ی ماسه‌ای

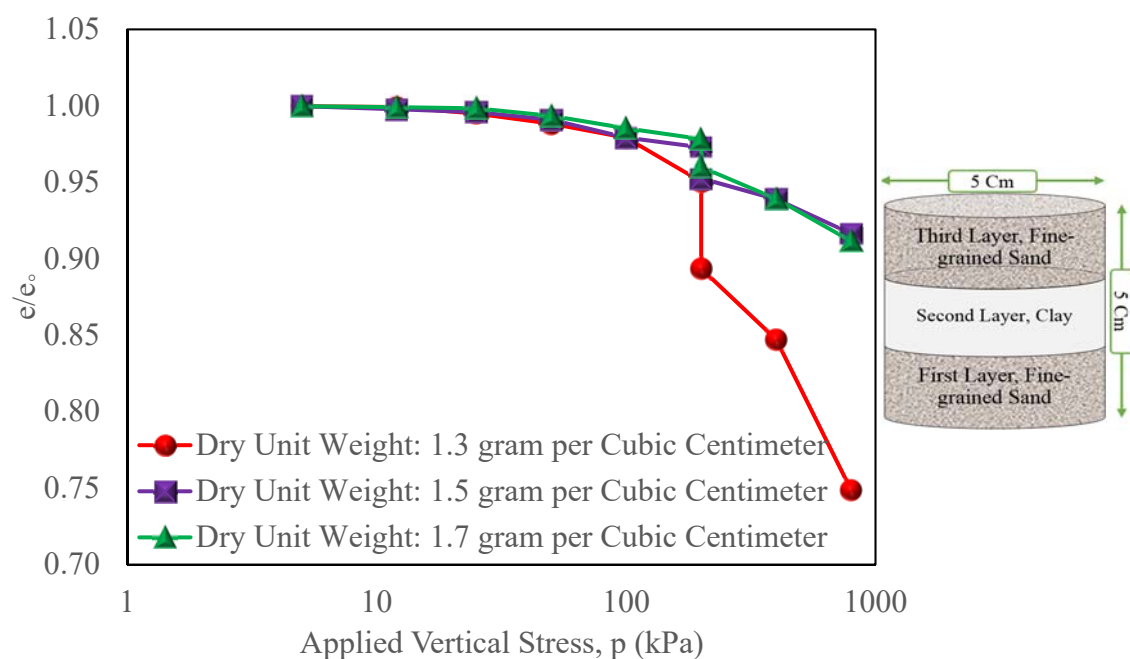


Fig. 2. Variations of Collapse Index for Three Samples at Dry Density of 1.3, 1.5, and 1.7 g/cm³ for Clay Sample Between Two Layers of Sand in Oedometer Test.

از این آزمایش با نتایج آزمایش‌های شکل‌های (۱ و ۲)، نمونه‌های خاک در دستگاه اودومتر با دانسیته‌های ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده‌اند.

به منظور ارزیابی اثر تغییر محل قرارگیری لایه رسی بر تغییرات شاخص رمبندگی خاک لایه‌ای، مقدار شاخص رمبندگی برای نمونه ماسه‌ای قرار گرفته بین دو لایه‌ی رسی اندازه‌گیری شده است. بر این اساس به منظور امکان مقایسه نتایج اخذ شده

ماسه‌ای ذرات رسی وجود داشته باشد، خاک‌های ماسه‌ای مقدار رمبندگی بزرگ‌تری نسبت به حالت عدم حضور رس خواهند داشت. بر این اساس یکی از دلایل تشدید پدیده رمبندگی را می‌توان حضور رس دانست [19, 28].

به منظور ارزیابی جامع‌تر اثر وجود لایه رسی بر رفتار رمبندگی خاک ماسه‌ای، تغییرات شاخص رمبندگی در سیستم دو لایه‌ای حاوی یک لایه ماسه‌ای و یک لایه رسی نیز مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. در شکل (۴) رفتار رمبندگی برای سه نمونه با وزن مخصوص ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب برای نمونه خاک سیستم دو لایه‌ای نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها رس در لایه بالایی، و ماسه در لایه پایینی قرار داشته است. به شکلی که در شکل (۴)، شاخص رمبندگی در وزن مخصوص ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب برابر ۸/۷٪ و در وزن مخصوص‌های ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب به ترتیب برابر ۴/۳٪ و ۲/۲٪ است.

رفتار رمبندگی در شکل (۳) نشان‌دهنده سه نمونه با وزن مخصوص ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب برای نمونه خاک سه لایه در حالت قرارگیری لایه ماسه‌ای قرار گرفته بین دو لایه رسی است. به شکلی که در وزن مخصوص‌های ۱/۳ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب شاخص رمبندگی به ترتیب برابر ۶/۱٪ و ۲/۲٪ و در وزن مخصوص ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب برابر ۲٪ بوده است.

از طرفی نتایج آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های ترکیبی لایه‌های رسی و ماسه‌ای در دو حالت مختلف که در شکل‌های (۲ و ۳) نشان داده شده است، بیانگر مقدار یکسان شاخص رمبندگی (به‌طور نسبی)، در این دو حالت بوده است. به طوری که شاخص رمبندگی سیستم سه لایه‌ای در هر دو حالت قرارگیری لایه‌ها (حالت اول موردی که لایه رسی مابین دو لایه ماسه‌ای و در حالت دوم موردی که لایه ماسه‌ای مابین دو لایه رسی قرار دارد)، نتایج مشابهی از خود نشان می‌دهند. با توجه به پژوهش‌های پیشین در این زمینه، در صورتی که در خاک‌های

شکل ۳. تغییرات رفتار رمبندگی برای سه نمونه با وزن مخصوص خشک ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب در حالت نمونه ماسه‌ای قرار گرفته بین دو لایه

رسی

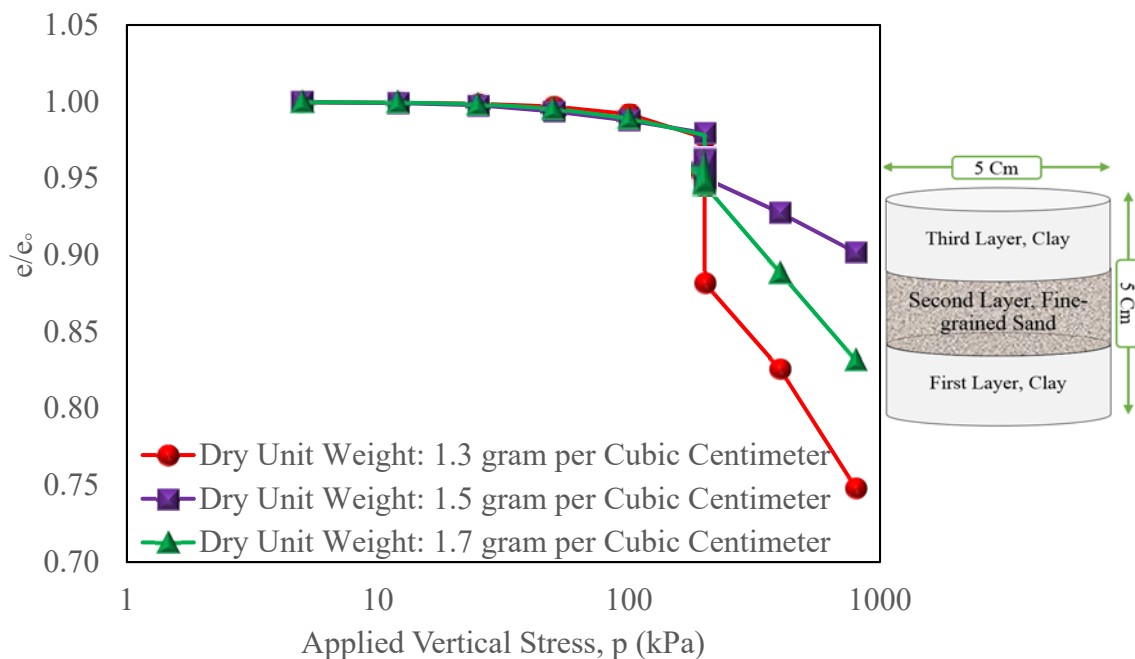


Fig. 3. Variations of Collapse Index for Three Samples at Dry Density of 1.3, 1.5, and 1.7 g/cm³ for Sand Sample Between Two Layers of Clay in Oedometer Test.

با توجه به استاندارد ASTM D5333-03، شاخص رمبندگی نمونه مترمکعب شده با وزن مخصوص $1/3$ گرم بر سانتی مترمکعب به عنوان خاک با درجه‌ی رمبندگی شدید برای این حالت از قرارگیری لایه‌ای طبقه‌بندی می‌شود. نتایج تعیین شاخص رمبندگی در سیستم دولایه‌ای برای حالتی که لایه ماسه در بالا و لایه رسی در پایین واقع شده است نشان دهنده مقادیر شاخص رمبندگی $0/4$ ، $2/9$ ، و $1/98$ ٪ برای نمونه‌های به ترتیب با وزن مخصوص $1/3$ ، $1/5$ و $1/7$ گرم بر سانتی مترمکعب است [34]. در واقع نتایج آزمایش‌های فوق حاکی از آن است که تغییر در چگونگی قرارگیری لایه‌های رسی و ماسه‌ای تأثیر قابل توجه‌ای بر مقادیر شاخص رمبندگی خاک دارد. به شکلی که نه تنها بیشترین مقادیر شاخص رمبندگی در دانسیته $1/3$ گرم بر سانتی مترمکعب مشاهده شده است بلکه با تغییر ترتیب لایه‌های ماسه‌ای و رسی یک افزایش ۱۲۹ درصدی در شاخص رمبندگی ملاحظه شده است.

به منظور طبقه‌بندی، ارزیابی دامنه تغییرات و همچنین مقایسه کلی شاخص رمبندگی در سیستم‌های یک لایه‌ای، دو لایه‌ای و سه لایه‌ای این پژوهش، نتایج مقادیر شاخص رمبندگی تمامی نمونه‌های آزمایش شده در این مقاله بر اساس استاندارد ASTM D5333-03 در جدول (۲) گزارش شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۲)، تغییرات شاخص رمبندگی برای سیستم‌های یک لایه، دو لایه و سه لایه در نمونه‌های دارای وزن مخصوص $1/3$ گرم بر سانتی مترمکعب بیشترین دامنه تغییرات را داشته است. به شکلی که بیشترین شاخص رمبندگی در نمونه ساخته شده در سیستم دو لایه (لایه تحتانی ماسه و لایه فوقانی رس) و همچنین در سیستم سه لایه (لایه رسی مابین دو لایه ماسه‌ای) نسبت به سایر چینش‌های لایه‌ای بزرگ‌تر است. به این صورت که شاخص رمبندگی این دو مورد در رده خاک‌هایی با درجه رمبندگی شدید طبقه‌بندی شده‌اند. پس از اتمام آزمایش‌های تعیین شاخص رمبندگی، کلیه نمونه‌ها با دقت از قالب تحکیم خارج و ارزیابی ظاهری شدند. مشاهده

شد که در نمونه‌های با شاخص رمبندگی بیشترین، ذرات رسی در فضای خالی لایه ماسه‌ای ورود پیدا کرده و در نتیجه سبب افزایش رمبندگی خاک شده‌اند. وقوع چنین سازوکاری با نظریه تنش موثر ترزاقی نیز هماهنگی مناسبی دارد. به شکلی که با اعمال بارگذاری، افزایش تنش موثر در لایه رسی که همراه با نشست آن است با تأثیر حرکت آب در خاک رسی با دانسیته کم همراه شده است. سپس، ورود ذرات رسی به فضای خالی بین ذرات ماسه‌ای در وقوع نشست آبی خاک نقش موثری نشان داده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۲) نیز در نمونه‌هایی که لایه رسی در بالای لایه ماسه‌ای قرار داشته است شاخص رمبندگی بزرگتری مشاهده می‌شود. این موضوع نیز تأیید کننده سازوکار پیشنهاد شده برای افزایش شاخص رمبندگی در خاک‌های لایه لایه و تأثیر ترتیب لایه‌ها بر مقدار شاخص رمبندگی است. در توجیه کامل‌تر رفتار مشاهده شده می‌توان به موضوع شستشوی ذرات کوچک‌تر رسی به درون حفرات بزرگ‌تر در خاک‌های ماسه‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی اشاره کرد. بیشتر در پروژه‌های ژئوتکنیکی در صورتی که جریان تراوش آب از درون لایه رسی به درون لایه ماسه‌ای باشد بخشی از ذرات رسی به درون فضای خالی موجود در بین ذرات ماسه‌ای حرکت می‌کنند [17].

به همین دلیل است که استفاده از مصالح فیلتر در بین دو لایه رسی و ماسه‌ای توصیه شده است. وجود مشاهدات عینی در خصوص انتقال بخشی از ذرات رس لایه رسی به درون لایه ماسه‌ای که در آزمایش‌های این پژوهش اشاره شد، نیز تأیید کننده این موضوع است. به بیان دیگر در سیستم دو لایه‌ای و در شرایطی که لایه رسی بر لایه ماسه‌ای قرار گرفته و انتقال جریان آب نیز از لایه رسی به لایه ماسه‌ای است، علاوه بر سازوکار رمبندگی موضوع فرسایش بخشی از لایه رسی به فضای خالی بین لایه ماسه‌ای در افزایش شاخص رمبندگی نقش افزایشی قابل توجه‌ای داشته است.

شکل ۴. تغییرات رفتار رهمبندگی برای سه نمونه با وزن مخصوص‌های خشک ۱/۳، ۱/۵ و ۱/۷ گرم بر سانتی مترمکعب در حالت قرارگیری لایه‌ی رسی بر لایه‌ی ماسه‌ای

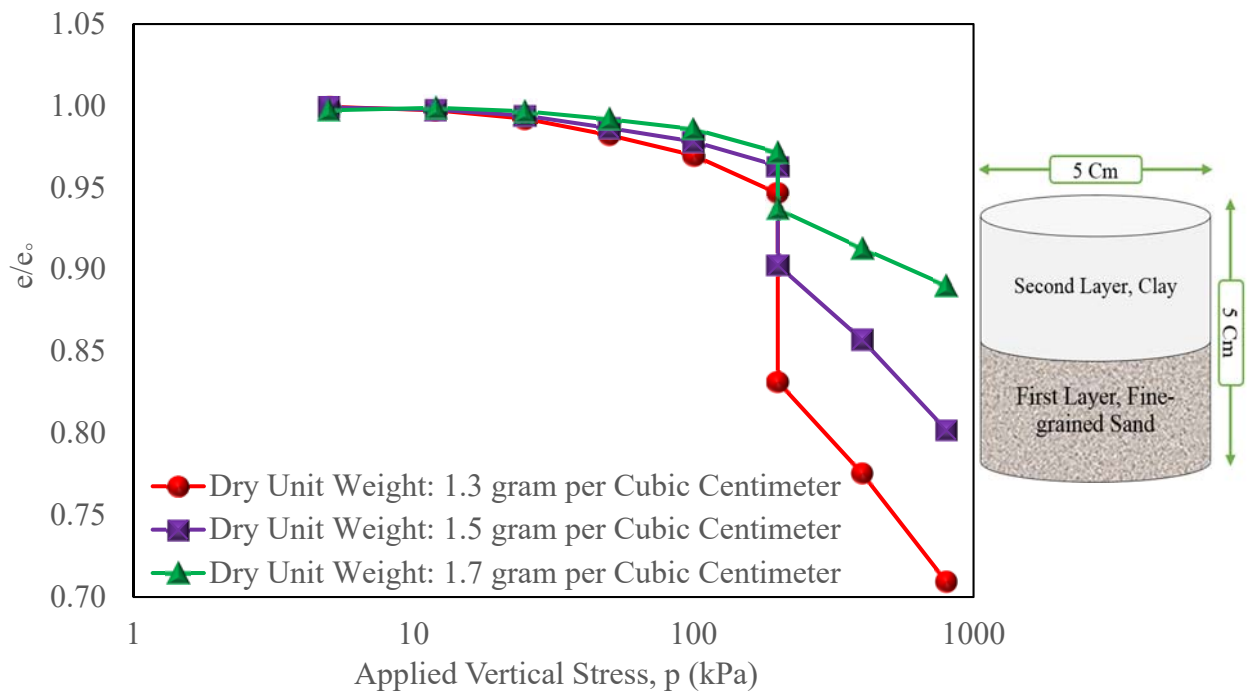


Fig. 4. Variations of Collapse Index for Three Samples at Dry Density of 1.3, 1.5, and 1.7 g/cm³ for Clay Layer Over a Sand Layer in Odometer Test.

جدول ۲. مقادیر شاخص رهمبندگی کلبه لایه‌های ترکیبی خاک مطالعه شده

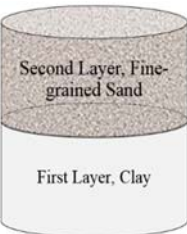
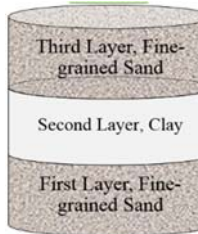
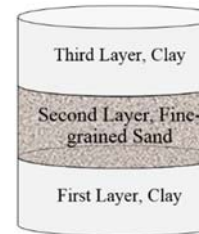
One Layer		Two Layers		Three Layers	
					
					
Dry density (g/cm ³)					
Determination of Collapse Index, I _c (%), (ASTM D5333-03)					
1.3	3.8	4.9	8.7	6.1	5.5
1.5	1.6	2.9	4.3	2.2	2.1
1.7	1.1	1.98	2.2	2	1.6
Legend					
Moderately Severe (I _c from 6 to 10)					
Moderate (I _c from 2.1 to 6)			Slight (I _c from 0.1 to 2)		

Table 2. Collapse Index for All of the Layered Samples

شکل ۵. تغییرات وزن مخصوص خشک خاک در مقابل شاخص رمبندگی کلیه لایه‌های ترکیبی

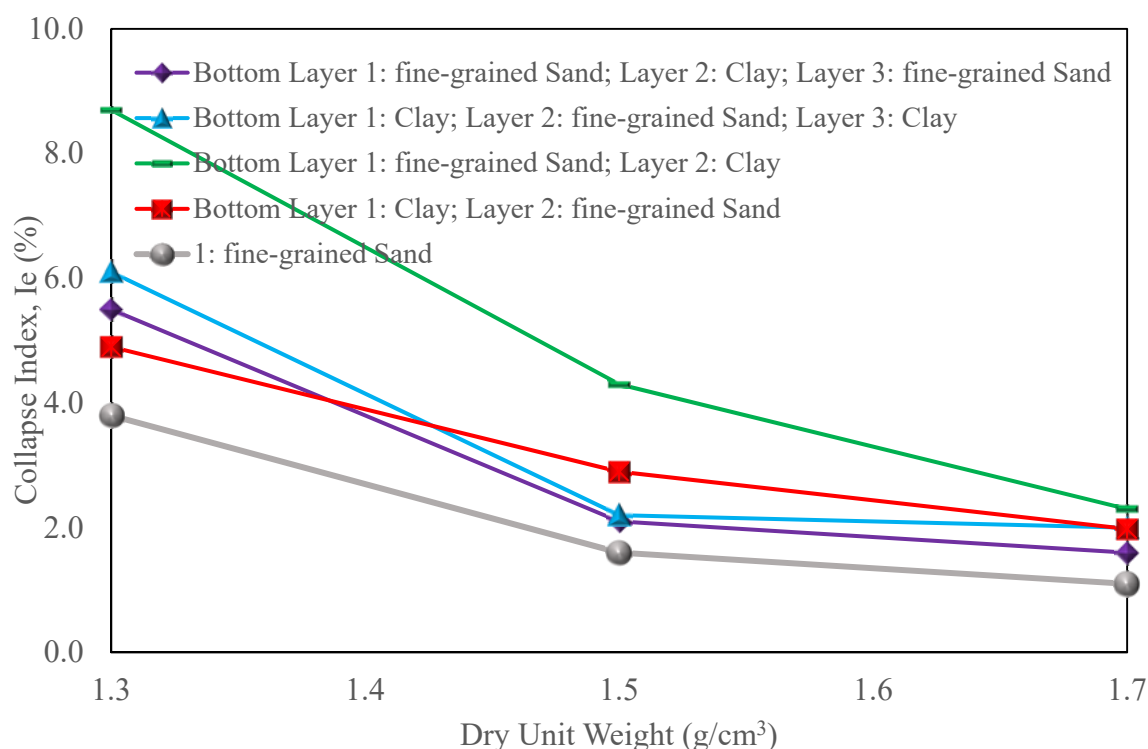


Fig. 5. Dry Density versus Collapse Index for Different Types of Layered Samples.

الف- در نمونه‌های ساخته شده با وزن مخصوص کمتر، چپش لایه‌ها بر شاخص رمبندگی اثر قابل توجهی دارد. به طوری که در دانسیته $1/3$ گرم بر سانتی‌مترمکعب برای نمونه دو لایه‌ای (لایه‌ی تحتانی ماسه و لایه‌ی فوقانی رس) مقدار شاخص رمبندگی 71% بیش از میانگین شاخص رمبندگی دیگر نمونه‌ها است.

ب- با افزایش وزن مخصوص خشک خاک از تأثیر تغییر چپش لایه‌ها بر مقدار شاخص رمبندگی کاسته می‌شود. به شکلی که در نمونه‌های ساخته شده با دانسیته $1/7$ گرم بر سانتی‌مترمکعب شاخص رمبندگی کلیه نمونه‌ها بر یکدیگر هماهنگ شده است. در این راستا محاسبه انحراف معیار مقادیر شاخص رمبندگی در وزن مخصوص مختلف و برای چپش‌های مختلف نمونه در قالب تحکیم حاکی از آن است که در نمونه‌های ساخته شده با وزن مخصوص $1/3$ ، $1/5$ و $1/7$ گرم بر سانتی‌مترمکعب انحراف معیار مقادیر شاخص رمبندگی به ترتیب $1/64$ ، $0/94$ و $0/39$ بوده است. مقادیر مقایسه‌ای اخیر نیز بیانگر این موضوع است که خطای نمونه‌سازی و آزمایش برای نمونه‌هایی با دانسیته بیشتر در مقایسه با دیگر نمونه‌ها کمتر بوده است. این موضوع را

بزرگ‌تر بودن مقادیر شاخص رمبندگی در سیستم‌های سه لایه‌ای در مقایسه با سیستم دولایه‌ای (قرارگیری لایه ماسه بر لایه رسی) نیز با همین استدلال قابل تفسیر است. به شکلی که در سیستم ۳ لایه‌ای نیز به علت قرارگیری لایه رسی بر لایه ماسه‌ای، شاخص رمبندگی بزرگتری در مقایسه با سیستم تک لایه و یا سیستم دو لایه شامل لایه فوقانی ماسه مشاهده شده است (جدول ۲). این در حالی است که در مقایسه شاخص رمبندگی سیستم‌های سه لایه‌ای نیز نمونه دارای دو لایه ماسه رمبند، شاخص رمبندگی بزرگتری نشان داده است.

۳-۳- تأثیر افزایش وزن مخصوص خشک خاک

در لایه‌های ترکیبی بر شاخص رمبندگی

تغییرات وزن مخصوص خشک خاک شکل (۵) در مقابل شاخص رمبندگی کلیه لایه‌های ترکیبی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵) دو نکته زیر قابل بحث است.

- Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [4] Lommler, J. C., & Bandini, P., 2015. Characterization of collapsible soils. In IFCEE, 1834-1841.
- [5] Lawton, E. C., Fragaszy, R. J., & Hardcastle, J. H. 1989. Collapse of compacted clayey sand. Jour. of Geotechnical Eng., 115(9), 1252-1267.
- [6] Tadeballi, R., Rahardjo, H., & Fredlund, D. G., 1992. Measurements of matric suction and volume changes during inundation of collapsible soil. Geotechnical Testing Journal, 15(2), 115-122.
- [7] Rollins, K. M., Rollins, R. L., Smith, T. D., & Beckwith, G. H., 1994. Identification and characterization of collapsible gravels. Journal of geotechnical engineering, 120(3), 528-542.
- [8] Ouhadi, V.R., Amiri, M., Hamidi, S., 2014. "Dispersive soil improvement with lime, special attention to the reduction of peak intensity of clay minerals in XRD analysis". Modares Civil Eng. Journal, 14, pp. 13-25.
- [9] Clemence, S. P., & Finbarr, A. O., 1981. Design considerations for collapsible soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng. 107.
- [10] Houston, S. L., Houston, W. N., Zapata, C. E., & Lawrence, C., 2001. Geotechnical engineering practice for collapsible soils. In Unsaturated soil concepts and their application in geotechnical practice, 333-355. Springer, Dordrecht.
- [11] Cerato, A. B., Miller, G. A., & Hajjat, J. A., 2009. Influence of clod-size and structure on wetting-induced volume change of compacted soil. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 135(11), 1620-1628.
- [12] Phien-Wej, N., Pientong, T., & Balasubramaniam, A. S., 1992. Collapse and strength characteristics of loess in Thailand. Engineering Geology, 32(1-2), 59-72.
- [13] Ouhadi V.R., Goodarzi A.R., 2003. Pore fluid characteristics effect on the dispersivity behaviour of soils from macro and micro structure aspects, Proc. of the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments, pp. 200-206.
- [14] Derbyshire, E., 2012. Genesis and properties of collapsible soils. Journal of Springer Science & Business Media, Vol. 468.
- [15] Ryashchenko, T. G., Akulova, V. V., & Erbaeva, M. A., 2008. Loessial soils of

می‌توان به تماس بیشتر دانه‌ها در نمونه‌هایی با دانسیته بیشتر نسبت داد که سبب همگن‌تر شدن در انتقال تنش بین دانه‌ها و در نتیجه پراکندگی کمتر در نتیجه‌های تعیین شاخص رمبندگی شده است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر نمونه خاک ماسه‌ای نشان دهنده آن است که نمونه تک لایه ماسه‌ای به هنگام اشباع شدن، شاخص رمبندگی کوچکی دارد. در نمونه ماسه‌ای در وزن مخصوص ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب شاخص رمبندگی برابر ۳/۸٪ است. ولی در سیستم‌های دو یا سه لایه‌ای حاوی لایه رسی ساخته شده با وزن مخصوص ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب شاخص رمبندگی در محدوده ۴/۹٪ تا ۸/۷٪ تغییر کرده است. به طوری‌که در سیستم دو لایه‌ای (لایه‌ی تحتانی ماسه و لایه‌ی فوقانی رس)، طبقه‌بندی خاک از شاخص رمبندگی متوسط در سیستم تک لایه (لایه ماسه‌ای) به شاخص رمبندگی به‌مقدار نسبی شدید تغییر کرده است.

۲- حضور رس سبب افزایش شاخص رمبندگی خاک شده به طوری‌که تغییرات ایجاد شده تابعی از تغییر ترتیب لایه‌های رسی و ماسه‌ای است.

۳- با افزایش وزن مخصوص خشک خاک از تأثیر تغییر چینش لایه‌ها بر مقدار شاخص رمبندگی کاسته می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش وزن مخصوص، تغییر چینش لایه‌های ترکیبی اثری بر شاخص رمبندگی نداشته‌است.

۵- مراجع

- [1] Feda, J., 1988. Collapse of loess upon wetting. Engineering geology, 25(2-4), 263-269.
- [2] Houston, S. L., Houston, W. N., & Spadola, D. J., 1988. Prediction of field collapse of soils due to wetting. Journal of Geotechnical Engineering, 114(1), 40-58.
- [3] Hormdee, D., 2008. Investigation on collapse potential of loess soil. In The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering

- [25] Pells, P., Robertson, A., Jennings, J. E., & Knight, K., 1975. A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to Collapse of grain structure.
- [26] ASTM, 2017. Annual book of ASTM Standard, Vol. 04.09, Soil and Rock (II); Geosynthetics, Philadelphia, USA, P.A., pp. 515.
- [27] Benchouk, A., Abou-Bekr, N., & Taibi, S., 2013. Potential collapse for a clay soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Eng.*, 3, 43-47.
- [28] Ouhadi, V. R., Zareie, N., and Bava Pouri, H., 2013. Geotechnical evaluation of impact of Illite mineral on the behaviour of collapsible soils. *The Seventh Congress on Civil Engineering, Zahedan, Sistan and Baloochestan University.*
- [29] Ali, N. A., 2015. Performance of partially replaced collapsible soil, Field study, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 54, 527-532.
- [30] Houston, S.L., Mahmoud, H., and Houston, W.N., 1995. Down-hole Collapse Test System. *Journal of Geotech. Engr., ASCE*, Vol. 121, No. 4.
- [31] Thorel, L., Ferber, V., Caicedo, B., and Khokhar, I.M., 2011. Physical modeling of wetting-induced collapse in embankment base. *Geotechnique*, Vol. 61, No. 5, 409-420.
- [32] Cui, Z. D., and Jia, Y.J., 2018. Physical model test of layered soil subsidence considering dual effects of building load and groundwater withdrawal. *Arabian Jour. of Sci. and Eng.*, Vol. 43, 1721-1734.
- [33] Sartkaew, S., Khamrat, S., and Fuenkajorn, K., 2019. Physical model simulation of surface subsidence under sub-critical condition. Vol. 19 (5), 234-246.
- [34] Mortazavi, A.H., 2019. Impact of clay layers on the behaviour of collapsible soil, Master Thesis, University College of Omran_Tosseeh, p.97.
- priangaria, transbaikalia, Mongolia, and northwestern China. *Quaternary International*, 179(1), 90-95.
- [16] Annual Book of ASTM Standards Designation: D5333-03, 2003. Standard test methods for measurement of collapse potential of soils, Vol. 04.09.
- [17] Ouhadi, V. R., & Bakhshalipour, H., 2010. Impact of nanoclays on the behavior properties of collapsible soils. In 9th International Congress on Advances in Civil Engineering. Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.
- [18] Song, L. H., 1986. Pumping subsidence of ground surface in Karst areas. *Academia Sinica, Beijing*, 15pp.
- [19] Lawton, E. C., Frigaszy, R. J., & Hetherington, M. D., 1992. Review of wetting-induced collapse in compacted soil. *Journal of geotechnical engineering*, 118(9), 1376-1394.
- [20] Abbeche, K., Hammoud, F., & Ayadat, T., 2007. Influence of relative density and clay fraction on soils collapse. In *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, 3-9, Springer, Berlin.
- [21] Basma, A. A., & Tuncer, E. R., 1992. Evaluation and control of collapsible soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(10), 1491-1504.
- [22] Alwail, T. A., Ho, C. L., & Fragaszy, R. J., 1994. Collapse mechanism of compacted clayey and silty sands. In *Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments* (1435-1446). ASCE.
- [23] Ouhadi, V.R., & Goodarzi, A.R., 2005. Impact of solubility of carbonate or sulfate salts and collapsible potential on the formation of sinkholes. *Engineering Journal of Tabriz University*, Vol. 34, No.3, 1-10.
- [24] Sheeler, J. B., 1968. Summarization and comparison of engineering properties of loess in the United States. *Highway Research Record*, 212, 1-9.

Impact of Change in the Layers Order of Clay and Sand at Different Densities on the Collapse Index of Soil

V. R. Ouhadi ^{1*} and A. H. Mortazavi²

*1 Prof., Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University; Adjunct Prof., School of Civil Engineering, University of Tehran,

2 Master Student, University College of Omran _Tosseeh, Hamedan, Iran.

vahidouhadi@yahoo.ca

Abstract

Soils, which show a large amount of volume reduction and cause a series of sudden settlements on the surface of the earth, due to the increase of moisture, are referred to as collapsible soils. In many different countries, the immediate settlements of these soils, have caused the formation of subsidence and sinkhole. These soils always create inappropriate conditions for the construction of structures such as buildings, road projects, foundations, water channels and other civil engineering projects. The occurrence of such sinkholes in parts of Iran and other parts of the world is one of the geotechnical problems of the above problematic soils. Several sink holes have formed in the northern sector of Hamedan. The soil types in this area include sandy and clayey soils which have low dry density.

Generally, collapsible behaviour of soils can be evaluated by the use of odometer test. According to the ASTM standard (D5333-03), the collapse index (I_c) is used to determine the magnitude of collapsible possibility during saturation at 200 kPa in a simple odometer device. The purpose of this study was to investigate the effect of changing the order of clay and sand layers on the collapsible behavior mechanism of collapsible soils and on the changes in the collapse index.

To achieve the above mentioned objective, the sandy soil was used from the northern areas of Hamadan and kaolinite clay (Super Zenouz of Tabriz) used to make the samples in three single-layer, two-layer and three-layer systems in specific molds made to a height and diameter of 5 cm in the odometer apparatus. Accordingly, in the present laboratory study, considering the different arrangements of clay and sandy layers, at each stage of the specimen preparation, specimens were prepared in three different series with a dry unit weight of 1.3, 1.5 and 1.7 g per cubic centimeter in a odometer metal molds.

By carrying out a series of odometer experiments, it was found that the sandy soils of the study area alone did not have a high percentage of the collapse index. However, with the presence of clay layers in such soils, the collapse index increases, so that collapse index at a unit weight of 1.3 g per cubic centimeter in the sample made in a single-layer system (fine-grained sand sample) reached from 3.8% to 8.7% in the sample made in the presence of a clay in the two-layer system, (the lower layer of the fine-grained sand and the upper layer of clay). Based on the results obtained from this study, the mechanism of collapse can significantly be influenced by the order of layering. However, by increasing the dry unit weight, the effect of the ordering of the layers on the value of the collapse index decreases. The results of this paper shows that in specimens made with a density of 1.7 g per cubic centimeter, the collapse index of all samples are almost similar values. In other words, the collapsible behaviour of soils is a function of soil dry density.

Keywords: Layered Soils; Collapse Index, Layered Soil; Dry Unit Weight; Clay; Sand.