

# بررسی و مقایسه‌ی رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه‌ی گروه‌های رس و لای در شهر مشهد

عبدالحسین حداد\* (دانشیار)

علی اولیائی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۱۳۹۸)  
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۱/۴، ص. ۱۱۰-۱۰۱، (یادداشت فنی)

بررسی رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه تحت بارگذاری ثابت در طول زمان از مسائل قابل توجه در روند ارزیابی رفتار آن‌ها و نشست‌های درازمدت پی‌ها و جابه‌جایی‌های جانبی سازه‌های نگهبان مختلف است. خاک‌های دانه‌یی، اغلب خزش قابل توجهی ندارند. در پژوهش حاضر که بر روی نمونه‌های خاک‌های ریزدانه‌ی رس و لای مناطق مختلف شهر مشهد صورت گرفته است، با استفاده از انجام آزمایش‌های تحکیم روی نمونه‌های دست‌نخورده با ادامه دادن بارگذاری ثابت در طول زمان منطبق بر روند مطالعات خزشی تعدادی از پژوهشگران، تغییر مکان‌های خزشی بعد از مرحله‌ی تحکیم اصلی بررسی شده است. همچنین نتایج ضرایب تحکیم ثانویه‌ی نمونه‌ها با مطالعات پیشین کنترل و با استفاده از تحلیل‌های آماری رگرسیون، روابط همبستگی ضرایب خزشی با سایر پارامترهای مشخصات فیزیکی ریزدانه به صورت کاربردی جهت ارزیابی سریع روند جابه‌جایی خزشی خاک‌های ریزدانه‌ی رس و لای ارائه شده است.

واژگان کلیدی: رفتار خزشی، ضریب تحکیم ثانویه، ضریب و شاخص تراکم و تورم، خاک ریزدانه.

## ۱. مقدمه

در پژوهش حاضر، به بررسی میزان رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه‌ی  $CL$  در شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی پرداخته شده است. مطالعه و پژوهش براساس انجام آزمایش‌های تحکیم و بررسی روند تحکیم ثانویه‌ی نمونه‌ها تحت فشار ثابت انجام شده است.

دشت مشهد به صورت دره‌ی وسیع و نسبتاً بزرگ در بین دو منطقه‌ی کپه داغ در شمال و بینالود در جنوب قرار گرفته است. مرزهای شمالی و جنوبی دشت، گسله و فروافتاده است و شهر در بخش جنوبی دشت در پای ارتفاعات بینالود قرار گرفته است. ارتفاعات بینالود در اثر کوه‌زایی سمیرین پیشین شکل گرفته و چند مرحله‌ی گرانبندی و دگرگونی را در طی مراحل کوه‌زایی هر سینین و سمیرین پیشین تحمل کرده است و بیشتر از کنگلومرا، شیل، و ماسه سنگ دگرگون شده به همراه فیلیش، افیولیت، توده‌های گرانبندی و گرانودیوریتی تشکیل شده است. از اواخر دوران سوم و اوایل دوران چهارم هم‌زمان با فازهای پایانی آلپین، دوره‌ی فرسایشی شدید شروع شده است که رسوب‌های آن، مناطق پست و دره‌ها را پر کرده و دشت‌های امروزی منطقه را تشکیل داده است.

بافت محدوده‌ی غربی شهر مشهد، عمدتاً درشت‌دانه و مخلوط شن و ماسه‌یی است. قسمت جنوبی شهر محدود به دامنه‌های سنگی است، ولی به تدریج با حرکت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۶/۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۲، پذیرش ۱۳۹۷/۱/۱۹

DOI:10.24200/J30.2018.2281.2158

از غرب به سمت شرق و شمال شرقی شهر و به خصوص در محدوده‌ی بافت مرکزی اولیه‌ی شهر، بافت خاک ریزدانه وجود دارد که عمدتاً محدوده‌ی تغییرات دامنه‌ی خمیری خاک بین صفر تا ۲۰ و با حساسیت و فعالیت کم دارند. گسترش بافت ریزدانه در مناطق مرکزی و شرقی شهر از یک طرف و از طرفی مرکز سازه‌های مرتفع و مهم شهری، وجود بارگاه امام رضا (ع) و توسعه‌ی سریع شهری در منطقه، توسعه رشد برج‌ها و هتل‌ها، توسعه‌ی ساختمان‌های تجاری و اقامتی و تأسیسات شهری زیرزمینی و بالاخره نیاز به گودبرداری‌های نسبتاً عمیق در خاک‌های مناطق ذکر شده، ضرورت بررسی‌های آثار جابه‌جایی درازمدت، از جمله رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه را فراهم آورده است. با توجه به گزارش‌های مطالعات ریزپهنه‌بندی شهر مشهد، عمدتاً خاک‌های ریزدانه در سطح شهر از نوع  $ML$ ،  $CL$  و همچنین  $ML-CL$  است. در الگوی بررسی میزان رفتار خزشی از آزمایش‌های تحکیم همراه با ارزیابی ضرایب تحکیم ثانویه بر روی نمونه‌های دست‌نخورده‌ی خاک‌های ریزدانه‌ی مناطق مختلف در سطح شهر استفاده شده است.

رفتار خزشی یا تحکیم ثانویه در ریزدانه‌ها، وابستگی مستقیم به ضرایب تراکم ثانویه‌ی آن‌ها (ضریب  $C\alpha$ ) دارد که عمدتاً تابع جنس ریزدانه و خواص فیزیکی آن است. موضوع پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار خزشی به کمک انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های خاک‌های ریزدانه در مناطق عمده‌ی بافت ریزدانه‌ی سطح شهر مشهد و اندازه‌گیری و تعیین ضرایب فشرده‌گی و تراکم ثانویه‌ی نمونه‌ها همراه با انجام آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و خواص خمیری ریزدانه جهت

ارزیابی حالت خمیری آن‌ها و انجام آزمایش‌های تحکیمی بر روی نمونه‌ها جهت بررسی و ارزیابی پارامترهای خواص فیزیکی ریزدانه و پارامترهای خواص مکانیکی آن‌ها از نظر نشست خزشی با تحکیم ثانویه تحت بارگذاری ثابت در طول زمان است و بالاخره ارزیابی و پژوهش در مورد ارتباط و همبستگی پارامترهای تحکیم ثانویه و خزشی با سایر پارامترهای فیزیکی ریزدانه است.

## ۲. ضرورت پژوهش و کاربردهای آن

با توجه به ارزش ساختمان‌های تجاری و اقامتی در محدوده‌ی مرکزی شهر مشهد به‌خصوص در نزدیکی به محدوده‌ی حرم امام رضا (ع) در قسمت مرکزی و شرق شهر، اشتیاق به احداث سازه‌های مرتفع هتل‌ها و سایر مراکز اقامتی به‌همراه ساختمان‌های تجاری در محدوده‌ی مذکور از سطح شهر زیاد است و اغلب در ساختمان‌های اشاره شده با رعایت استفاده‌ی بیشینه از کاربری زمین، تمایل به احداث چند طبقه زیرزمین وجود دارد. از طرفی محدوده‌ی اخیر، منطبق بر مناطق با بیشترین درصد خاک ریزدانه در سطح شهر است و در بیشتر ساختمان‌های مذکور با توجه به مجاورت گودبرداری‌های آن‌ها با ساختمان‌های چندطبقه‌ی موجود، کنترل جابه‌جایی‌های دیواره‌های گودهای با سیستم سازه‌ی نگهبان میج‌کوبی و مهار (نیلینگ و انکراژ) اهمیت خاصی دارد. در کنار آن، نشست‌های درازمدت و خزشی سازه‌های مرتفع، آثار چشمگیری بر اجزاء معماری و مشکلات همجواری‌های سازه‌های مرتفع دارد. همچنین در بسیاری از پروژه‌های ذکر شده ملاحظه شده است که به دلیل مشکلات سرمایه‌گذاری و اجرایی در نوسان‌های اقتصادی، زمان اجرای سازه پس از گودبرداری به‌طول انجامیده است که در این زمینه به‌طور نمونه می‌توان از پروژه‌های مهمی، همچون: پروژه‌ی جهان مال در مجاورت برج طبقاتی - اداری بانک صادرات، پروژه‌ی مشهد مال و برج خیابان دانشگاه نام برد. از این رو در کنار مطالعه و پژوهش تغییرمکان‌ها یا نشست‌های آنی و تحکیمی سازه‌های اخیر، ارزیابی روند خزشی و تحکیم ثانویه آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. با توجه به شرایط کلان‌شهر مشهد به‌عنوان دومین شهر و متروپلیس مذهبی و فرهنگی جهان اسلام و توسعه و رشد ساخت و سازه‌های شهری و احداث و توسعه‌ی برج‌های مرتفع مسکونی، سرعت گرفتن احداث شبکه‌ی قطار شهری و مترو، روند توسعه‌ی شهری و جمعیتی به لحاظ سیاحتی و زیارتی، روند توسعه‌ی تأسیسات زیرزمینی و بالاخره گسترش یافتن و توسعه‌ی شهری در کنار ارزیابی رفتار مقاومتی خاک سطح شهر به‌خصوص با توجه به بافت ریزدانه در محدوده‌ی مرکزی، نیاز به ارزیابی هر چه دقیق‌تر مقادیر جابه‌جایی‌ها و تغییرشکل‌پذیری‌های لایه‌های ریزدانه به‌همراه سایر لایه‌هاست. وجود سطح ایستایی نسبتاً بالا و در عمق حدود ۱۸ تا ۲۰ متر از سطح زمین در مناطق مرکزی شهر که در چند ساله‌ی اخیر همراه با بالا آمدگی تدریجی بوده و مسائل نشست‌های تحکیمی و تحکیم ثانویه یا خزش در آن‌ها را فراهم آورده است، از دیگر نگرانی‌ها در ارزیابی‌های دقیق‌تر تغییرمکان‌ها و نشست‌های تأسیسات شهری و سازه‌ها و برج‌ها و در مسئله‌ی گودبرداری‌ها، تغییرمکان‌های تحکیمی و خزشی المان‌های سازه‌های نگهبان گودها و همچنین دیواره‌های گودها و آثار آن‌ها در سازه‌ها، برج‌ها و ساختمان‌های مجاور سازه‌های مرتفع و یا مجاور گودها و غیره است.

## ۳. پیشینه‌ی پژوهش و مرور منابع

در رابطه با رفتار ریزدانه‌ها، تزازقی و پک<sup>۱</sup> (۱۹۶۷) براساس آزمایش‌های تحکیم،

روابط تجربی همبستگی بین ضرایب فشرددگی ریزدانه‌ها مطابق رابطه‌ی ۱، ضریب فشرددگی و تحکیم ثانویه آن‌ها را براساس مشخصات خمیری ریزدانه در خاک‌های دست‌خورده و سپس اصلاح آن‌ها برای خاک‌های تحکیم عادی یافته‌ی دست‌خورده ارائه کرده‌اند.<sup>[۱]</sup>

$$C_c = 0.7009(LL - 10) \quad (1)$$

در مورد ریزدانه‌ها، مصری (۱۹۷۳)، در مطالعات خود با توجه به انجام آزمایش‌های تحکیمی و شیب ناحیه‌ی خزشی، همبستگی ضریب تحکیم ثانویه یا خزش ریزدانه‌های رسی نسبتاً اشباع را برحسب رطوبت طبیعی آن‌ها به‌صورت رابطه‌ی ۲ ارائه کرده است که در آن رطوبت طبیعی بر حسب درصد است.

$$C_c \alpha \approx 0.70001(w_0) \quad (2)$$

طبق مطالعات مصری و گادلوسکی<sup>۲</sup> (۱۹۷۷)، محدوده‌ی تغییرات نسبت  $C_c \alpha / C_c$  در خاک‌های ریزدانه‌ی غیرارگانیک و ارگانیک از ۰/۲۵ تا کمتر از حدود ۰/۱۰ است و برای انواع ریزدانه‌ی مناسب رس‌ها و لای‌های غیرارگانیک (مطابق رابطه‌ی ۳)، برای رس‌ها و لای‌های ارگانیک (مطابق رابطه‌ی ۴) و برای کودبرگ<sup>۳</sup> (مطابق رابطه‌ی ۵) است.<sup>[۲]</sup>

$$C_c \alpha / C_c \approx 0.04 \pm 0.01 \quad (3)$$

$$C_c \alpha / C_c \approx 0.05 \pm 0.01 \quad (4)$$

$$C_c \alpha / C_c \approx 0.075 \pm 0.01 \quad (5)$$

در پژوهش دیگری که توسط ناکاسی<sup>۴</sup> و همکارانش (۱۹۸۸) انجام شده است، مقدار ضریب تراکم ثانویه بر حسب دامنه‌ی خمیری ریزدانه‌ی غیرآلی به‌صورت رابطه‌ی ۶ ارائه شده است:

$$C_c \alpha = 0.00168 \pm 0.00033PI \quad (6)$$

تراکم ثانویه‌ی خاک‌های نمک‌دار منطقه‌ی ساحلی سیخا<sup>۵</sup> توسط داوتیان (۱۹۹۱)، ارزیابی شده است که بخش عمده‌ی آن از نشست آن را در اثر تحکیم ثانویه معرفی کرده است. رسوبات ساحلی منطقه‌ی سیخا با پیوند بین دانه‌ی سست، شامل: لای ماسه‌دار و رس‌های لای‌دار حاوی مقادیری مواد ارگانیک همراه با تراکم‌پذیری زیاد بوده و مسئله‌ی پیش‌بینی و تمهیدات مقابل نشست در آن‌ها مهم گزارش شده است. در بررسی‌های انجام شده، روش پیش بارگذاری در کاهش نشست‌های تحکیمی و تحکیم ثانویه‌ی خاک‌های نمک‌دار مذکور و همچنین مسائل نشست خزشی در آن‌ها با توجه به حاوی بودن مقدار قابل توجهی مواد آلی، مهم ارزیابی شده است.<sup>[۳]</sup>

در تکمیل مطالعات و پس از انجام تعداد دیگری از آزمایش‌های تحکیم بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و بررسی‌های تجربی وابستگی نتایج به ضریب  $C_c$ ، به‌صورت مشترک توسط تزازقی، پک و مصری (۱۹۹۶) نتیجه‌گیری و به‌صورت تجربی، ثابت بودن نسبت  $C_c \alpha / C_c$  بر حسب جنس خاک ریزدانه ارائه شده است. لذا مقدار نسبت تجربی  $C_c \alpha / C_c$  به‌صورت تقریباً ثابت برای یک جنس ریزدانه و به‌صورت رابطه‌ی ۷ ارائه شده است.<sup>[۴]</sup> نشریه‌ی شماره‌ی ۶۳۴ معاونت نظارت راهبردی امور نظام فنی به‌عنوان دستورالعمل طراحی سازه‌های ساحلی - میحث‌پی‌ها (۱۳۹۲)، نیز همین نسبت را قید کرده است.

$$C_c \alpha = (0.703 - 0.705) C_c \quad (7)$$

OCR وابستگی دارد، به طوری که بیشترین مقدار آن در نسبت بیش تحکیمی برابر ۱ است.<sup>[۸]</sup>

نظریه‌ی وابستگی نسبت ضریب تحکیم ثانویه به ضریب تراکم ریزدانه به صورت تابعی از نرخ کرنش ( $\dot{\epsilon}$ ) توسط واتابه<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در ژاپن و در رابطه با چگونگی وقوع نشست‌های خزشی زمین سایت فرودگاه بین‌المللی کانسای<sup>۱۱</sup> پیشنهاد شد.<sup>[۹]</sup> ولی مصری (۲۰۱۳) نظریه‌ی واتابه را با توجه به مطالعات و آزمایش‌های آزمایشگاهی خود در رابطه با رس و لای غیرارگانیک نپذیرفته و از ثابت بودن ضریب مذکور در یک جنس ریزدانه دفاع و بیان کرده است که تغییرات نسبی و تقریم و رو به بالا در منحنی تغییرات نسبت خلأ بر حسب لگاریتم زمان در قسمت تراکم ثانویه نسبت به رابطه‌ی ۳، فقط مربوط به سن رس و شرایط سخت‌شوندگی و سیمان‌تاسیون بین دانه‌ی است.<sup>[۱۰]</sup>

همچنین سالم و شریینی<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۴)، با مطالعه بر روی مقایسه‌ی نشست تحکیمی و خزشی لایه‌های رسی لای دار ضخیم تحکیم عادی یافته در شرق منطقه‌ی پورت سعید مصر با ضخامت ۳۵ متر با مقادیر حاصل از پیش‌بینی‌ها و برآوردهای محاسباتی و ضمن انطباق و همگرایی نسبی نتایج محاسبات با نشست‌های رخ داده در اثر بارگذاری خاکریز، به حدود همان مقادیر نسبت‌های  $C\alpha/Cc$  پیشنهادی توسط مصری و همکاران رسیده‌اند.<sup>[۱۲]</sup>

در بررسی اثر ضخامت نمونه در نرخ تغییرات کرنش‌های قائم مرتبط با تغییرات نسبت خلأ خاک، دیگاگو<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۴)، با مطالعه بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی با ضخامت‌های کم در مقایسه با نمونه‌های مدل فیزیکی با ضخامت ۵۰۸ میلی‌متر، میزان سطح کرنش قائم را در مقایسه‌ی نتایج، ثابت به دست نیاورده و مقدار تغییرات محدود در آن را به علت تغییر ضخامت نمونه گزارش کرده است. دیگر اینکه زمان انتهای نشست تحکیم اولیه (EOP) در نمونه‌های ضخیم و سطح تنش قائم در مقایسه با نمونه‌های کم ضخامت، طولانی‌تری می‌شود و به تأخیر می‌افتد و دست‌خوردگی در آن تأثیرگذار است.

ژائو<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۵) در بررسی نشست‌های تحکیمی مراحل اصلی و ثانویه و ارزیابی تغییرشکل‌های خزشی در محیط دریایی توسط نرم‌افزار تحلیل عددی المان محدود پلکسیس<sup>۱۳</sup> با به‌کارگیری داده‌های به دست آمده از مطالعات نشست‌های خزشی سایت فرودگاه کانسای ژاپن و با استفاده از مدل خاک نرم خزشی، پس از ۱۰ سال از تعمیر و بهسازی سایت فرودگاه مذکور، نشست حدود ۶۰ سانتی‌متر را در انطباق با شرایط سایت و محل به دست آورده است. همچنین در مطالعه‌ی مذکور، ضمن نمایش تأثیر شرایط بیش تحکیم‌یافتگی، نزدیکی نسبت  $C\alpha/Cc$  به حدود ۰٫۴ و نزدیک به حدود پیشنهادی در رابطه‌ی ۳ نتیجه‌گیری شده است.<sup>[۱۳]</sup>

همچنین دیگاگو و گرمستاد<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۶) در ارزیابی پارامترهای خاک برای محاسبات جابه‌جایی‌های ناشی از خزش منطبق بر شرایط محل، ضمن انجام آزمایش‌های تحکیم تحت فشار ثابت در طول دوره‌ی ۱۶ ساعت تا حتی ۷ شبانه‌روز، نتایج محدودی تغییرات پارامترهای خزشی کنترل و نتایج را منطبق بر مطالعات و پژوهش‌های انجام شده‌ی خود در رابطه با مقادیر توصیه‌ها و همچنین محدودی تغییرات پیشنهادی واترمن و بروئر<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۵) گزارش کرده‌اند.<sup>[۱۴]</sup>

سکستون و همکاران<sup>۱۶</sup> (۲۰۱۶)، نیز در بررسی تأثیر ستون سنگی در خاک‌های خزشی به همراه مطالعه‌ی عددی نتیجه‌گیری کرده‌اند که با افزایش خزش خاک در طول زمان، تنش‌های قائم بیشتری از خاک به ستون سنگی انتقال یافته و لایه‌های ضخیم خاک، مقدار کرنش‌های نظیر زمان انتهای نشست تحکیم اولیه (EOP) بزرگ‌تری را در مقایسه با نمونه‌های نازک‌تر آزمایشگاهی به دست داده‌اند، ضمن آنکه با خزش خاک، تنش‌های برشی جداری بیشتری به ستون سنگی انتقال یافته و

در مطالعات مجدد و تکمیلی مصری و کاسترو<sup>۱۶</sup> (۱۹۸۷) و نیز مصری و فنگ<sup>۱۷</sup> (۱۹۹۱) و همچنین در بررسی‌ها و تحقیقات مشترک مصری و واردهانابوتی<sup>۱۸</sup> (۲۰۰۹) تغییرات بسیار کم و ثابت ماندن ضریب تراکم ثانویه بر حسب زمان در کارهای عملی بدون وابستگی به نرخ تغییرات کرنش نتیجه‌گیری شده است.

براساس پژوهش‌ها و مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های ریزدانه، واترمن و بروئر<sup>۱۹</sup> (۲۰۰۵) یک محدوده‌ی مقدار عددی برای نسبت ارائه شده در رابطه‌ی ۸ را بر حسب پارامترهای نشانه‌ی تحکیم ثانویه و خزش اصلاح شده ( $\mu^*$ )، نشانه‌ی تراکم و فشردگی اولیه‌ی اصلاحی ( $\lambda^*$ ) و پارامتر نشانه‌ی تورم اصلاحی در مرحله‌ی باربرداری ( $\kappa^*$ ) برای ریزدانه‌ی خزشی با خزش زیاد در حدود عدد ۵ و برای خاک‌های کم خزشی در حدود ۲۵ توصیه کرده‌اند.<sup>[۵]</sup>

$$5 \leq \frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*} \leq 25 \quad (8)$$

نسبت مذکور بر حسب ضرایب اصلاح شده‌ی خزش و فشردگی اولیه و ضریب تورم در مرحله‌ی باربرداری از این جهت اهمیت دارد که در رفتار خاک‌های خزشی، میزان نرخ کرنش حجمی آن‌ها با مرتبه‌ی توان کسر ارائه شده به صورت رابطه‌ی ۹ مرتبط است.

$$\dot{\epsilon}_V = \frac{\mu^*}{\tau} (OCR)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \quad (9)$$

که در آن،  $\dot{\epsilon}_V$  نرخ تغییرات کرنش حجمی با زمان،  $OCR$  نسبت بیش تحکیمی خاک و  $\tau$  زمان مرجع مشخص است و ضرایب اصلاحی فشردگی ( $\lambda^*$ )، تورم ( $\kappa^*$ ) و تراکم ثانویه‌ی خاک ( $\mu^*$ ) به صورت روابط ۱۰ الی ۱۲ است و طی پژوهش‌ها، کسر اخیر با زمان ثابت گزارش شده است.<sup>[۶]</sup>

$$\lambda^* = \frac{Cc}{2.3(1 + e_0)} \quad (10)$$

$$\kappa^* = \frac{2Cr}{2.3(1 + e_0)} \quad (11)$$

$$\mu^* = \frac{C\alpha}{2.3(1 + e_0)} \quad (12)$$

در بررسی‌های آذری و همکاران<sup>۲۰</sup> (۲۰۱۱)، در مورد دو نظریه‌ی ثابت ماندن کرنش نقطه‌ی پایان تحکیم اولیه (EOP) که مستقل از تغییر ضخامت لایه‌های رسی است (نظریه‌ی A) و دیگری افزوده شدن تدریجی کرنش خزشی و ثانویه مربوط به نقطه‌ی پایان تحکیم اولیه و افزایش آن بر حسب افزایش ضخامت خاک رسی است (نظریه‌ی B)، مقادیر ضریب فشردگی ثانویه را ثابت در نظر نمی‌گیرند، ولی تغییرات آن را متناسب با تغییرات ضریب تراکم اصلی خاک می‌دانند و نتیجه‌گیری می‌کنند که نسبت تغییرات  $C\alpha/Cc$  ثابت است و از حدود مقادیر توصیه شده توسط مصری در روابط اخیر تبعیت می‌کند.<sup>[۷]</sup>

مطالعات آلیبا<sup>۲۱</sup> (۲۰۱۱)، در مورد کاربرد نرخ خزش در محاسبات نشست خاک‌های رسی نرم همراه با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی تحکیم و بررسی رفتار خزشی نمونه‌هایی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در مقایسه با نمونه‌هایی به ضخامت ۱ سانتی‌متر و بررسی نمودارهای کرنش‌های خزشی نشان داده است که نظریه‌ی ثابت ماندن کرنش پایان مرحله‌ی تحکیم اولیه (EOP) در ضخامت‌های زیاد لایه‌ها برقرار نیست و مقدار آن به ضخامت لایه‌ی رسی وابسته است. در مقایسه‌ی کرنش‌های تحت فشار ثابت  $100 \text{ kpa}$ ، ضمن وابستگی کرنش مذکور به ضخامت لایه و زیادتر شدن آن با ضخامت تحت فشار ثابت یکسان، نرخ خزش با نسبت بیش تحکیمی

جدول ۱. طبقه‌بندی ریزدانه‌ها از نظر ضریب تراکم ثانویه و خاصیت خزشی آن‌ها.

$C\alpha \leq 0.002$	$0.004$	$0.008$	$0.016$	$0.032$	$> 0.032$
فوق‌العاده زیاد		زیاد		متوسط کم	
				خیلی کم رده	

تنش‌های شعاعی در اثر خزش در خاک کمتر شده و در اثر آن، بار کمتری از طریق جداره به ستون سنگی منتقل شده است.<sup>[۱۵]</sup>

در مطالعات انجام شده‌ی کامائو (۲۰۱۶) بر روی ۳ نمونه‌ی مختلف خاک ریزدانه، آثار خزش و همچنین وارفتگی (ریلکسیشن) تنش مطالعه شده است.<sup>[۱۶]</sup> در آزمایش تحکیم، نمونه‌ها ظرف ۲۴ ساعت تحت بار و فشار اولیه‌ی ثابت  $kpa$  ۵۰ تحکیم و سپس افزایش بار اعمال شده است؛ و پس از زمان  $t_p$ ، شروع به حذف و کاهش تدریجی بار شده است، به گونه‌ی که نشست ایجاد شده تحت بار مرحله‌ی قبلی در زمان  $t_p$  در نمونه کاملاً حذف و توسط باربرداری تدریجی حذف کامل نشست انجام شده و در نمودار نشست تحکیمی از پایان زمان  $t_p$  دیگر نمودار نشست کاملاً افقی و بدون نشست بوده است. در آزمایش‌های مذکور، نرخ تغییرات تراکم ثانویه‌ی نمونه‌ها ( $\epsilon_\alpha$ ) بر حسب میزان پیش‌تحکیمی آن‌ها به صورت خطی به دست آورده شده است.  $\epsilon_\alpha = \left( \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \log t} \right)$  پیش‌تحکیمی است که در آن هیچ نشست درازمدت خزشی رخ ندهد. در مجموع وابستگی ضریب تراکم یا تحکیم ثانویه به مقدار ضریب فشردگی و تراکم ریزدانه ( $C_c$ )، تقریباً در کلیه‌ی مطالعات و پژوهش‌ها تأکید شده است. همبستگی‌های فرعی دیگری هم همچون همبستگی با درجه‌ی رطوبت طبیعی معرفی شده است که در بخش نتیجه‌گیری‌ها و تحلیل‌های آماری رگرسیون در مطالعات پژوهش حاضر نیز در قسمت‌های صحت‌سنجی‌ها مدنظر قرار گرفته است. طبقه‌بندی میزان رفتار خزشی ریزدانه‌ها با توجه به مقدار ضریب تراکم ثانویه ( $C\alpha$ ) بر اساس جدول ۱ که توسط مصری (۱۹۷۳) ارائه شده است، طبقه‌بندی ریزدانه‌ها از نظر ضریب تراکم ثانویه و خاصیت خزشی آن‌ها قابل ارزیابی است.<sup>[۱۷]</sup>

#### ۴. اهداف پژوهش

در پژوهش حاضر، اهداف عمده به این صورت مدنظر بوده است:

۱. ارزیابی رفتار خزشی و جابه‌جایی‌های درازمدت ریزدانه‌ها در منطقه که در برآورد رفتار درازمدت پروژه‌های مهم کاربرد دارد.
۲. با توجه به زمان‌بر بودن آزمایش‌های تحکیم به خصوص در رابطه با رفتار خزشی ریزدانه‌ها و مشکلات و محدودیت‌های متعدد زمانی در پروژه‌ها، آیا می‌توان به کمک سایر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ریزدانه، که اندازه‌گیری‌های آن‌ها در زمان کوتاه‌تر قابل انجام است، ارزیابی کرد. روابط همبستگی ذکر شده می‌توانند سرعت چشم‌گیری به روند طراحی و ارزیابی جابه‌جایی‌های خزشی قبل از انجام و تکمیل آزمایش‌های طولانی‌مدت بدهند.
۳. فراهم شدن امکان ارزیابی‌های دقیق‌تر جابه‌جایی‌های خاک و رفتار آن در شرایطی که محدودیت‌های زمانی و عدم امکان انجام آزمایش‌های ارزیابی رفتار خزشی ریزدانه وجود دارد.
۴. ارزیابی میزان دقت همبستگی‌های ضرایب رفتار خزشی با سایر پارامترهای خواص فیزیکی ریزدانه، که برای هر دو نوع ریزدانه‌ی رسی ( $CL$ ) و سیلتی ( $ML$ ) به صورت جداگانه بررسی و تحلیل آماری شده است.

۵. بررسی یکنواختی یا متفاوت بودن روابط همبستگی‌های ضرایب تراکم ثانویه در دو گروه خاک ریزدانه‌ی رسی ( $CL$ ) و سیلتی ( $ML$ ) و تغییرات آن‌ها بر حسب پارامترهای فیزیکی و خواص خمیری آن‌ها.

#### ۵. روش پژوهش و مواد و روش‌ها

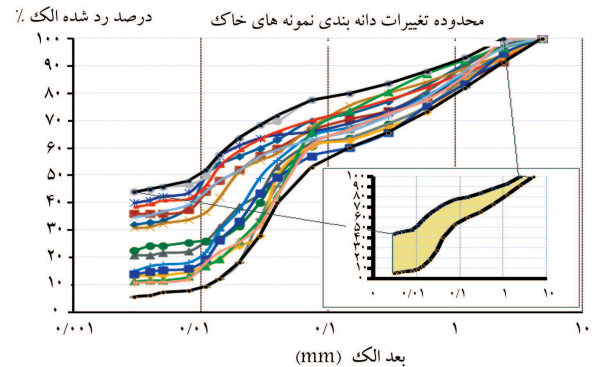
۱. روش پژوهش مبتنی بر انجام آزمایش‌های تحکیم منطبق بر استاندارد ( $ASTM D2435-90$ ) بر روی نمونه‌های دست‌نخورده‌ی خاک‌های دارای بافت ریزدانه از مناطق مختلف شهری است. به جهت ارزیابی پتانسیل خزشی و تحکیم ثانویه‌ی نمونه‌ها، ابتدا نمونه‌ها در فشار  $kpa$  ۵۰ تا پایان ۲۴ ساعت تحکیم یافتند و سپس تحت فشار ثابت  $kpa$  ۱۰۰ تا پایان ۹۶ ساعت، تحکیم (غالباً بعد از آن جابه‌جایی صفر) همراه با اندازه‌گیری و قرائت نشست‌ها ادامه یافته است.
۲. انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری خواص فیزیکی نمونه‌ها که شامل: تعیین رطوبت طبیعی نمونه‌ها مطابق استاندارد  $ASTM D2216-98$ ، حدود اتربرگ شامل تعیین حد روانی و حد خمیری و در نتیجه دامنه‌ی خمیری آن‌ها مطابق استاندارد  $ASTM D4318-87$ ، تعیین چگالی جامد مطابق استاندارد  $ASTM D854-87$ ، وزن مخصوص طبیعی در محل و آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد  $ASTM D422-87$  بوده است.
۳. بررسی و پژوهش در مطالعات پیشین، اعم از مطالعات انجام شده بر روی خاک‌های ریزدانه‌ی مناطق نمونه‌ها و همچنین مطالعات در مورد همبستگی‌های پیشنهادی جهت ضرایب تحکیم ثانویه با پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه انجام شده است.
۴. انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌های تحکیم در رابطه با روند تحکیم ثانویه‌ی نمونه‌ها و ضرایب آن‌ها و بررسی همبستگی و انجام تحلیل رگرسیون ضرایب تحکیم ثانویه و خزشی با متغیرهای فیزیکی و مکانیکی عمده در مطالعات پیشین سایر پژوهشگران در روند کلی همبستگی ضرایب تحکیم ثانویه با پارامترهای فیزیکی خاک‌های ریزدانه بوده است.
۵. روابط برازش شده‌ی همبستگی حاصل از تحلیل رگرسیون با نتایج روابط پیشنهادی سایر پژوهشگران در مقایسه با نتایج آزمایش‌های فیزیکی بر روی نمونه‌های مختلف بررسی شده است.
۶. نتیجه‌گیری‌های لازم در رابطه با میزان رفتار خزشی خاک‌های ریزدانه‌ی سطح شهر مشهد بر اساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات آماری تحلیل رگرسیون در ارزیابی حاصل آزمایش‌ها صورت گرفته است.
۷. در مجموع آزمایش‌ها برای حدود ۴۲ منطقه از مناطق عمده‌ی شهر مشهد با بافت خاک ریزدانه، انجام شده است. با توجه به آزمایش‌ها و نتایج آن‌ها، علاوه بر منحنی‌های  $e - \log \sigma'$  برای کلیه‌ی نمونه‌ها، منحنی‌های تحکیم در مقیاس لگاریتم زمان تحت فشار ثابت  $kpa$  ۱۰۰ ترسیم شده و همچنین نتایج آزمایش‌ها تا پایان زمان‌های ۴۸، ۷۲، و ۹۶ ساعت یعنی تا پایان ۴ شبانه‌روز به جهت اطمینان از وقوع کامل عمده‌ی نشست‌های تحکیم ثانویه‌ی نمونه‌های به ضخامت اولیه‌ی ۲۰ میلی‌متری ثبت شده و ضرایب تحکیم ثانویه و تحکیم ثانویه‌ی اصلاحی نمونه‌ها ( $C\alpha$  و  $C'\alpha$ ) در مرحله‌ی خزش یا تحکیم ثانویه تعیین شده است.

رسی و سیلتی منطقه، تحلیل‌های آماری برای هر دو گروه خاک‌های ریزدانه‌ی رس و خاک‌های ریزدانه‌ی لای به صورت جداگانه انجام شده است که نتایج حاصل از تحلیل آن‌ها و همبستگی‌ها با پارامترها و خواص فیزیکی خاک ریزدانه در ادامه بررسی شده است.

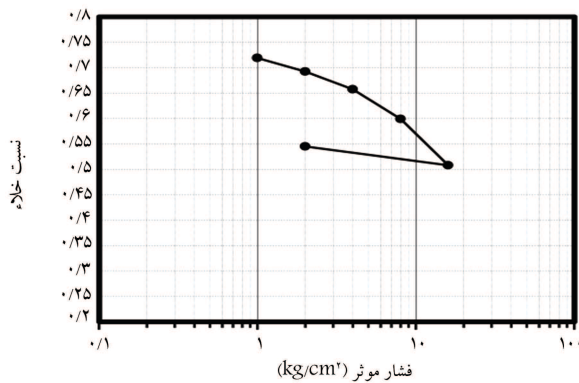
## ۶. نتایج و بحث

بر روی نمونه‌ها در آزمایشگاه، آزمایش تحکیم یک بعدی طبق استاندارد ASTM 2435 D انجام شده است. علاوه بر آن، بر روی نمونه‌ی دست‌نخورده‌ی خاک ریزدانه، که به مدت ۲۴ ساعت اولیه تحت فشار  $50 \text{ kpa}$  تحکیم شده بود، تحت فشار بار ثابت  $100 \text{ kpa}$  به مدت ۲۴ ساعت و سپس ادامه‌ی بار ثابت تا ۴ شبانه‌روز همراه با قرانت نشست‌ها در پایان هر ۲۴ ساعت صورت پذیرفت. آزمایش‌های تعیین پارامترهای فیزیکی و خواص خمیری ریزدانه‌ها نیز صورت گرفت. برای تعداد ۱۲ نمونه‌ی ذکر شده نشان داده شد که ریزدانه، غیرخمیری و لای است؛ از این رو در ادامه‌ی روند پژوهش و بررسی‌ها، نمونه‌های ریزدانه‌ی  $CL$  به صورت جداگانه و نمونه‌های  $ML$  نیز به صورت جدا ارزیابی و تحلیل‌های همبستگی آماری انجام شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. پس از انجام بررسی‌های تحلیل آماری، سازگاری با روابط همبستگی‌های تجربی ارائه شده توسط تعدادی از پژوهشگران نیز بررسی شده است. نمونه‌ی منحنی‌های  $e - \log \sigma'$  و منحنی‌های تحکیم  $(h - \log t)$  در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، که به طور مثال نتایج و

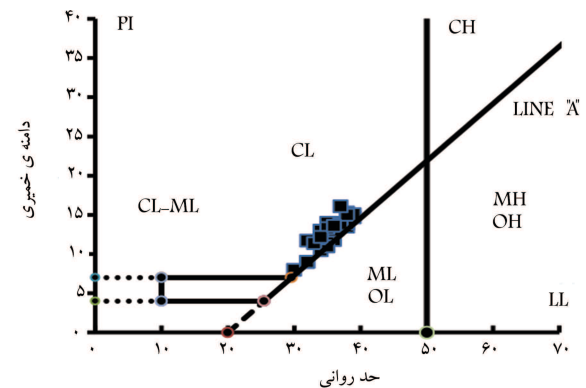
با توجه به نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری پارامترهای خمیری و منحنی‌های حالت خمیری ریزدانه‌ها، تعداد ۱۲ عدد از نمونه‌ها عمدتاً از نوع خاک سیلت و لای مشخص شده‌اند، که با توجه به موضوع پژوهش و به جهت دقت بیشتر در بررسی‌ها و تحلیل‌های آماری، همبستگی‌ها و رگرسیون‌های آن‌ها جدا از نمونه‌های ریزدانه ( $CL$ ) انجام شده است. در شکل ۱، محدوده‌ی تغییرات دانه‌بندی و در شکل ۲، محدوده‌ی تغییرات حالت خمیری مشاهده می‌شود. در کلیه‌ی آزمایش‌ها و نمونه‌ها در نقاط مختلف شهر مشهد به  $CH$  یا  $MH$  برخورد نشده است (مطابق شکل ۳ پلان موقعیت نمونه‌های مورد آزمایش)، جهت تحلیل‌های اختصاصی رگرسیون و مقایسه‌ی نتایج به صورت جداگانه، مشخصات ریزدانه‌های  $ML$  در انتهای جدول ۲ ارائه شده است. برای بررسی یکسانی یا تفاوت عمده‌ی رفتار خزشی ریزدانه‌هایی



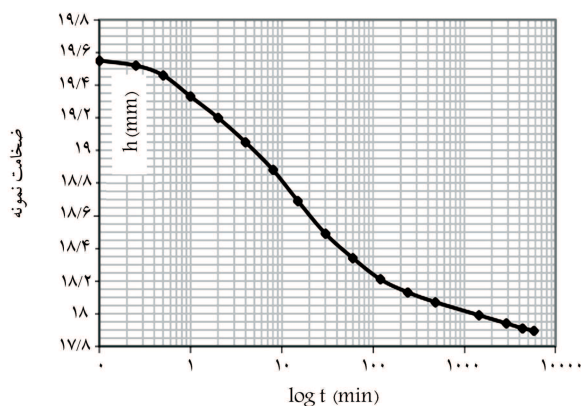
شکل ۱. محدوده تغییرات دانه‌بندی نمونه‌های  $CL$ .



شکل ۴. نمونه‌ی منحنی  $e - \log \sigma'$  (نمونه‌ی ۲- خیابان گلستان).



شکل ۲. محدوده‌ی تغییرات حالت خمیری ( $PI$ ) نمونه‌های  $CL$ .



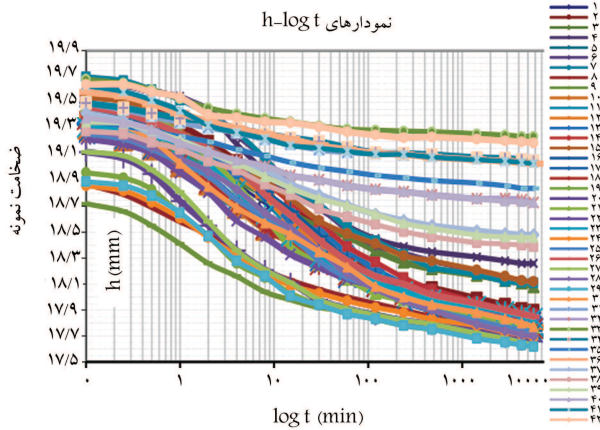
شکل ۵. نمونه‌ی منحنی تحکیم (نمونه‌ی ۲- خیابان گلستان).



شکل ۳. پلان موقعیت نمونه‌های مورد آزمایش.

جدول ۲. نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات فیزیکی، خواص خمیری و ضرایب تراکم نمونه‌ها و محاسبات ضرایب.

$(\lambda^* - \kappa^*)/\mu^*$	$C'\alpha$	$C_r$	$C_c$	$W_0$	$e_0$	$G_s$	طبقه‌بندی	$PI$	$PL$	$LL$	عمق	ردیف
۱۳/۷	۰/۰۰۶۴	۰/۰۲۷	۰/۲۱۷	۱۲/۳۲	۰/۸۶۴	۲/۶۵	CL	۸	۲۲	۳۰	۱/۶	۱
۱۱/۵	۰/۰۰۹۶	۰/۰۴۹	۰/۳۰۸	۱۵/۲۱	۰/۸۹۹	۲/۶۵	CL	۹	۲۳	۳۲	۱/۵	۲
۱۴/۳	۰/۰۰۸۴	۰/۰۵۱	۰/۳۲۶	۱۵/۲۱	۰/۸۷۱	۲/۶۶	CL	۱۲	۲۴	۳۶	۴/۲	۳
۱۵/۹	۰/۰۰۷۶	۰/۰۳۷	۰/۳۰۶	۱۵/۲۱	۰/۹۲۵	۲/۶۶	CL	۱۰/۵	۲۳/۵	۳۴	۲/۸	۴
۱۳/۷	۰/۰۰۶۹	۰/۰۳۸	۰/۲۵۴	۱۵/۲۱	۰/۸۸۵	۲/۶۳	CL	۱۱	۲۴	۳۵	۳/۸	۵
۱۳/۳	۰/۰۰۷۸	۰/۰۳۹	۰/۲۵۸	۱۷/۳۶	۰/۷۳۵	۲/۶۵	CL	۹	۲۳	۳۲	۱۰/۱	۶
۲۱/۲	۰/۰۰۵۹	۰/۰۴۰	۰/۳۱۲	۱۳/۰۶	۰/۸۵۷	۲/۶۴	CL	۱۱/۸	۲۴/۲	۳۶	۸/۸	۷
۲۰/۰	۰/۰۰۶۲	۰/۰۳۷	۰/۳۰۹	۲۴/۵۲	۰/۸۹۲	۲/۶۴	CL	۱۱	۲۴	۳۵	۸/۲	۸
۱۸/۴	۰/۰۰۵۳	۰/۰۲۹	۰/۲۴۱	۱۳/۰۶	۰/۸۷۸	۲/۶۷	CL	۱۳/۵	۲۴/۵	۳۸	۹/۶	۹
۲۳/۹	۰/۰۰۵۸	۰/۰۳۸	۰/۳۳۲	۱۲/۳۲	۰/۸۵	۲/۶۳	CL	۹	۲۳	۳۲	۶/۲	۱۰
۱۲/۶	۰/۰۰۸۳	۰/۰۳۴	۰/۲۶۳	۱۶/۳۶	۰/۸۶۷	۲/۶۷	CL	۱۴/۵	۲۳/۵	۳۸	۴	۱۱
۱۱/۰	۰/۰۰۷۴	۰/۰۲۹	۰/۱۹۲	۱۷/۲۳	۰/۶۵۴	۲/۶۶	CL	۱۲	۲۲	۳۴	۶	۱۲
۱۱/۵	۰/۰۰۷۳	۰/۰۲۵	۰/۲۰۴	۱۴/۹۲	۰/۸۵۲	۲/۶۴	CL	۱۲/۵	۲۲/۵	۳۵	۴/۵	۱۳
۱۱/۶	۰/۰۰۸۱	۰/۰۳۱	۰/۲۳۶	۱۸/۵	۰/۸۶۳	۲/۶۷	CL	۱۳	۲۳	۳۶	۸	۱۴
۹/۹	۰/۰۰۷۷	۰/۰۳۴	۰/۲۱۰	۱۷/۷	۰/۸۵	۲/۶۶	CL	۱۳	۲۱	۳۴	۵	۱۵
۱۰/۷	۰/۰۰۹	۰/۰۳۶	۰/۲۵۳	۲۳/۲	۰/۸۸	۲/۶۷	CL	۱۴	۲۱	۳۵	۴	۱۶
۱۲/۵	۰/۰۰۸۷	۰/۰۳۲	۰/۲۷۰	۱۸/۸	۰/۸۹۲	۲/۶۹	CL	۱۴/۷	۲۴/۳	۳۹	۴/۵	۱۷
۱۱/۹	۰/۰۰۸۵	۰/۰۳۳	۰/۲۵۴	۱۹/۴	۰/۸۶۳	۲/۶۷	CL	۱۳/۹	۲۴/۱	۳۸	۴	۱۸
۱۱/۷	۰/۰۰۷۵	۰/۰۲۹	۰/۲۱۸	۱۶/۷	۰/۸۳۳	۲/۶۶	CL	۱۱/۷	۲۰/۳	۳۲	۶/۴	۱۹
۱۲/۷	۰/۰۰۷۹	۰/۰۲۴	۰/۲۳۲	۱۹/۱	۰/۸۴۱	۲/۶۳	CL	۱۱/۴	۲۱/۶	۳۳	۵/۲	۲۰
۱۱/۵	۰/۰۰۸۵	۰/۰۳۱	۰/۲۴۶	۱۸/۷۶	۰/۸۷۳	۲/۶۹	CL	۱۵/۳	۲۲/۷	۳۸	۶/۵	۲۱
۱۲/۰	۰/۰۰۷۸	۰/۰۳۲	۰/۲۳۸	۱۴/۹	۰/۸۶۸	۲/۶۸	CL	۱۴	۲۳	۳۷	۴	۲۲
۱۲/۴	۰/۰۰۰۸	۰/۰۲۸	۰/۲۴۰	۱۷/۴	۰/۸۵۴	۲/۶۶	CL	۱۳	۲۱	۳۴	۷	۲۳
۱۲/۶	۰/۰۰۷۹	۰/۰۲۶	۰/۲۳۵	۱۶/۹۷	۰/۸۳۱	۲/۶۶	CL	۱۳/۳	۲۱/۷	۳۵	۴	۲۴
۱۳/۸	۰/۰۰۷۹	۰/۰۲۸	۰/۲۵۵	۱۴/۸۷	۰/۸۲۹	۲/۶۷	CL	۱۳/۸	۲۳/۲	۳۷	۳/۸	۲۵
۱۲/۴	۰/۰۰۹۱	۰/۰۳۱	۰/۲۷۵	۲۱/۳۶	۰/۸۸۴	۲/۶۸	CL	۱۵/۱	۲۳/۹	۳۹	۲/۵	۲۶
۱۲/۲	۰/۰۰۸۷	۰/۰۳۰	۰/۲۶۰	۱۹/۴۶	۰/۸۷۹	۲/۶۹	CL	۱۵	۲۳	۳۸	۳/۴	۲۷
۱۱/۴	۰/۰۰۷۱	۰/۰۲۸	۰/۲۰۵	۱۳/۶۸	۰/۸۵۱	۲/۶۳	CL	۱۲/۲	۲۱/۸	۳۴	۴/۸	۲۸
۱۱/۶	۰/۰۰۷۷	۰/۰۲۹	۰/۲۲۳	۱۵/۷۷	۰/۸۵۰	۲/۶۵	CL	۱۳/۶	۲۲/۴	۳۶	۳/۶	۲۹
۱۴/۲	۰/۰۰۹۷	۰/۰۳۲	۰/۳۲۶	۲۱/۱۶	۰/۹۰۴	۲/۶۹	CL	۱۶/۱	۲۰/۹	۳۷	۸	۳۰
۲۴/۵	۰/۰۰۱۶	۰/۰۳۶	۰/۱۴۳	۸/۹۹	۰/۸۱۱	۲/۶۷	ML	۰	-	۰	۱/۲	۳۱
۱۸/۶	۰/۰۰۲۹	۰/۰۲۷	۰/۱۴۹	۶/۱۸	۰/۷۶۵	۲/۶۵	ML	۲/۲	۱۲/۶	۱۴/۸	۱	۳۲
۲۰/۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۱۹	۰/۱۱۴	۱۰/۱	۰/۸۷۵	۲/۶۶	ML	۰	-	۰	۱/۵	۳۳
۱۹/۸	۰/۰۰۱۹	۰/۰۲۴	۰/۱۲۱	۱۰/۳۵	۰/۹۳۶	۲/۶۸	ML	۰	-	۰	۱/۴	۳۴
۲۰/۵	۰/۰۰۳۲	۰/۰۲۶	۰/۱۶۹	۶/۳۶	۰/۷۸۵	۲/۶۸	ML	۰	-	۰	۱/۲	۳۵
۱۹/۵	۰/۰۰۲۸	۰/۰۲۸	۰/۱۵۶	۱۱/۲	۰/۸۳۲	۲/۶۷	ML	۰	-	۰	۲/۳	۳۶
۱۹/۰	۰/۰۰۲۷	۰/۰۲۳	۰/۱۳۸	۸/۵	۰/۷۹۵	۲/۶۶	ML	۰	-	۰	۲/۸	۳۷
۲۳/۲	۰/۰۰۲۲	۰/۰۴۱	۰/۱۷۲	۹/۳	۰/۷۶۳	۲/۶۳	ML	۰	-	۰	۲/۵	۳۸
۲۲/۳	۰/۰۰۲۲	۰/۰۲۷	۰/۱۳۷	۷/۸	۰/۶۹۵	۲/۶۵	ML	۰	-	۰	۳	۳۹
۲۰/۸	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۸	۰/۱۲۷	۹/۸۴	۰/۷۵۴	۲/۶۷	ML	۰	-	۰	۲/۲	۴۰
۲۲/۰	۰/۰۰۲۳	۰/۰۳۲	۰/۱۵۲	۸/۸۷	۰/۷۴۲	۲/۶۶	ML	۰	-	۰	۲/۷	۴۱
۲۰/۷	۰/۰۰۲۶	۰/۰۲۳	۰/۱۴۳	۷/۲۳	۰/۸۰۵	۲/۶۵	ML	۰	-	۰	۳	۴۲



شکل ۷. منحنی‌های تحکیم نمونه‌های ریزدانه.

جدول ۳. نتایج تحلیل رگرسیون ضریب تحکیم ثانویه بر حسب  $Cc$  در نمونه‌های ریزدانه‌ی  $CL$ .

شماره‌ی رگرسیون			
$R$	۰/۹۴۳۵۲۳	Lower/۹۵	۰/۰۲۷۳۹۵
$R^2$	۰/۸۹۰۲۳۵	Upper/۹۵	۰/۰۳۶۰۱۴
تعدیل شده $R^2$	۰/۸۸۶۳۱۵	$P - Value$	۵/۸۱E - ۱۵
خطای استاندارد	۰/۰۰۰۳۶۳	tStat.	۱۵/۰۶۹۵
تعداد مشاهدات	۳۰		
باقیمانده	۰/۰۰۰۰۲		
ضریب عامل $Cc$	۰/۰۳۱۷		

توجه به پژوهش‌ها و مطالعات پیشین و با در نظر داشتن موضوع عدم قطعیت و همبستگی‌های نسبی از رگرسیون خطی ضرایب خزشی با پارامترهای مختلف فیزیکی نمونه‌ها، از جمله: نشانه و ضریب تراکم اولیه نمونه‌ها ( $Cc$ ), رطوبت اولیه و طبیعی نمونه‌ها ( $W^0$ ), دامنه‌ی خمیری نمونه‌ها ( $PI$ ), نسبت خلأ اولیه ( $e^0$ ) و چگالی ویژه سنگ دانه ( $G_s$ ) به روش تحلیل رگرسیون خطی توسط Add-in اضافی در نرم‌افزار صفحات گسترده‌ی اکسل<sup>۱۵</sup> (ویرایش ۲۰۱۰) انجام شد. در عملیات ذکر شده، تحلیل آماری رگرسیون چندمتغیره<sup>۱۶</sup> به روش کمینه‌ی مربعات جزئی<sup>۱۷</sup> صورت گرفته و خطاهای پیش‌بینی به میزان کمینه رسانده شده است. از موارد مهم در تحلیل رگرسیون و همبستگی کنترل ضریب همبستگی  $r$  است. نزدیک بودن ضریب  $r$  به عدد  $\pm 1$  معرف دقت رگرسیون است. همچنین برای پیشگیری از شانس بودن نتایج رگرسیون، کنترل مقادیر  $P - Value$  برای پارامترهای ذکر شده صورت گرفته است که همبستگی مناسبی به دست آمده است.

نتایج و روابط همبستگی به ترتیب برای ریزدانه‌ی رسی ( $CL$ ) و لای ( $ML$ ) در جدول‌های ۳ الی ۵ ارائه شده‌اند. همچنین نتایج تحلیل رگرسیون به صورت نمودارهای تغییرات ضریب تراکم ثانویه بر حسب تغییرات ضریب فشردگی و تراکم، رطوبت و دامنه‌ی خمیری ریزدانه‌های  $CL$  به ترتیب در شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشاهده می‌شود. سپس نتایج تحلیل آماری برای خاک‌های  $ML$  نیز در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود. در ادامه‌ی تحلیل‌های آماری رگرسیون، همبستگی‌های با ضریب تراکم اولیه  $Cc$ ، رطوبت اولیه و طبیعی نمونه‌ها  $W^0$  و دامنه‌ی خمیری آن‌ها  $PI$  بیش از



شکل ۶. تصویر دستگاه‌های انجام آزمایش‌های تحکیم.

نمودارهای مربوط به نمونه‌ی خیابان گلستان در شکل‌های مرتبط ارائه شده است. آزمایش‌های آزمایشگاهی توسط ۴ دستگاه آزمایش تحکیم انجام شده است (شکل ۶).

در بخش صحت‌سنجی‌ها و مقایسه‌ی نتایج، تعدادی از روابط همبستگی تجربی پژوهشگران مختلف مرتبط با پارامترهای خمیری و فیزیکی خاک‌های ریزدانه برای انجام بارزش‌ها و مقایسه‌ی نتایج استفاده شدند و روابط جدیدی منطبق بر جنس خاک  $CL$  و  $ML$  در منطقه پیشنهاد شده است. در ارزیابی‌ها و تعیین ضرایب تراکم ثانویه نمونه‌ها، متوسط شیب ناحیه‌ی خزشی بین محدودده‌ی ۲۴ ساعت تا ۹۶ ساعت و بین زمان پایان تحکیم اولیه‌ی  $t_1$  تا ۹۶ ساعت از منحنی تحکیمی تحت بار ثابت در نظر گرفته شده است. هر چند در نمونه‌های آزمایشگاهی در پژوهش و آزمایش‌های دیگاکو (۲۰۱۴) در بخش ۳، کنترل خزش‌ها تا ۷ روز نیز بر روی نمونه‌های کم‌ضخامت و ضخیم‌تر ادامه یافته است، ولی در نمونه‌های مورد آزمایش با توجه به ضخامت کم، عملاً بیش از ۹۶ ساعت، تغییر مکان بسیار ناچیز بود. میزان نشست تحکیم ثانویه در اثر پدیده‌ی خزش در ریزدانه‌ها تحت بار ثابت در طول زمان از رابطه‌ی ۱۳ به دست می‌آید:

$$Ss = C' \alpha^* H \lambda^* \log \left( \frac{t}{t_1} \right) \quad (13)$$

که در آن،  $H \lambda$  ضخامت لایه‌ی خاک یا نمونه در پایان تحکیم اولیه،  $t$  زمان سپری شده از شروع بارگذاری،  $t_1$  زمان پایان تحکیم اولیه و  $C' \alpha$  ضریب تراکم ثانویه اصلاحی است که رابطه و مقادیر تغییرات آن بر حسب ضریب تراکم ثانویه خاک ریزدانه به صورت رابطه‌ی ۱۴ است. در بیشتر کارهای عملی علی‌رغم تغییرات جزئی ضرایب تراکم ثانویه در طول زمان، می‌توان مقدار متوسط ثابتی را بر حسب جنس و نوع ریزدانه و به خصوص پارامترهای مشخصات فیزیکی آن مثل ضریب فشردگی و تراکم و همچنین رطوبت اولیه و طبیعی خاک ریزدانه در نظر گرفت:

$$C' \alpha = \frac{C \alpha}{1 + e \lambda} = \frac{\Delta h / h \lambda}{\Delta \log t} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \log t} \quad (14)$$

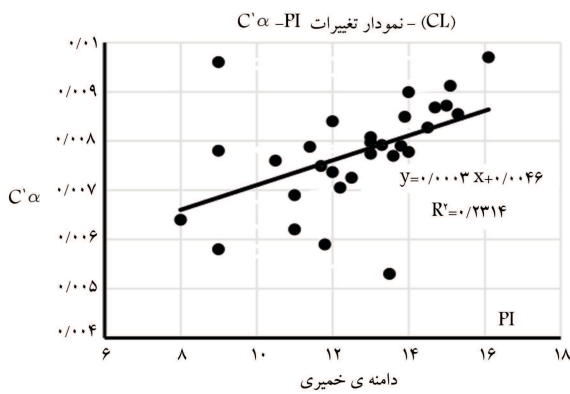
در انتخاب محل نمونه‌ها سعی بر آن بوده است که از مناطق عمده‌ی دارای بافت خاک‌های ریزدانه در سطح شهر آزمایش به عمل آید و در شکل ۷، منحنی‌های تحکیم مربوط به نمونه‌های ریزدانه ارائه شده است.

## ۷. بررسی‌ها و تحلیل‌های آماری

برای پژوهش در همبستگی و ارتباط ضرایب تحکیم ثانویه و خزشی نمونه‌ها با

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج رگرسیون‌های مختلف ضریب خزش و تحکیم ثانویه بر حسب پارامترهای نمونه‌های ریزدانه‌ی  $CL$ .

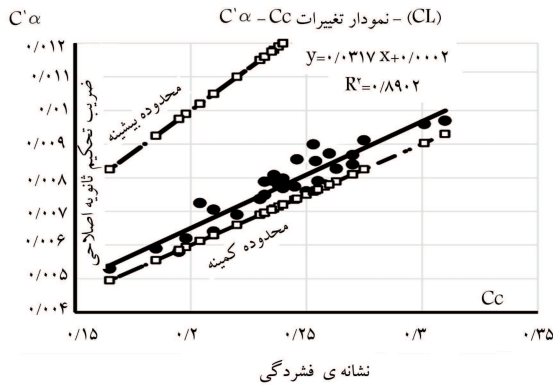
انواع رگرسیون‌ها	اول	دوم	سوم	
ضریب عامل $Cc$	۰٫۰۳۱۷	-	۰٫۰۲۳۵	$CL$
ضریب $W^{\circ}$	-	۰٫۰۰۰۳	۰٫۰۰۰۱	
ضریب $PI$	-	-	-	
همبستگی $R$	۰٫۹۴۳۵	۰٫۸۴۵	۰٫۸۵۳	
ارزش پی - $P$	۶E-۱۵	۰٫۰۱۳۴	۰٫۰۰۰۴۷	
باقیمانده	۰٫۰۰۰۰۲	۰٫۰۰۰۲۱	۰٫۰۰۰۰۰۱	



شکل ۹. نتایج رگرسیون برای خاک‌های ریزدانه‌ی  $CL$  (نمودار تغییرات  $C'α - PI$ ).

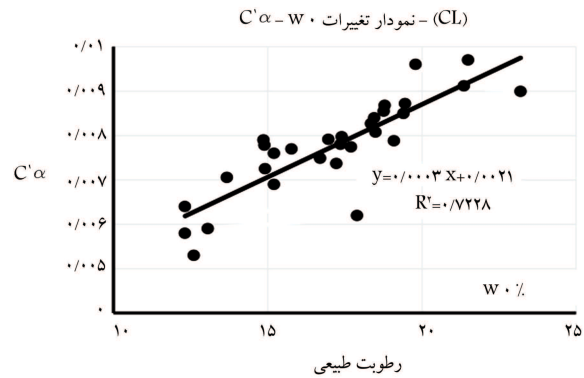
جدول ۵. خلاصه‌ی نتایج رگرسیون‌های مختلف ضریب تحکیم ثانویه بر حسب پارامترهای نمونه‌های خاک‌های ریزدانه‌ی  $ML$ .

انواع رگرسیون‌ها	اول	دوم	
ضریب عامل $Cc$	۰٫۰۲۶۹۳	-	$ML$
ضریب $W^{\circ}$	-	۰٫۰۰۰۲۲	
ضریب $PI$	-	-	
همبستگی $R$	۰٫۸۴۳۲	۰٫۶۸۲۳	
ارزش پی - $P$	۰٫۰۰۰۵۷	۰٫۰۱۴۵	
باقیمانده	-۰٫۰۰۰۱۳	۰٫۰۰۰۰۳	



شکل ۱۰. نتایج رگرسیون برای خاک‌های ریزدانه‌ی  $CL$  (نمودار تغییرات  $C'α - Cc$ ).

شکل ۸. نتایج رگرسیون برای خاک‌های ریزدانه‌ی  $CL$  (نمودار تغییرات  $C'α - w^{\circ}$ ).

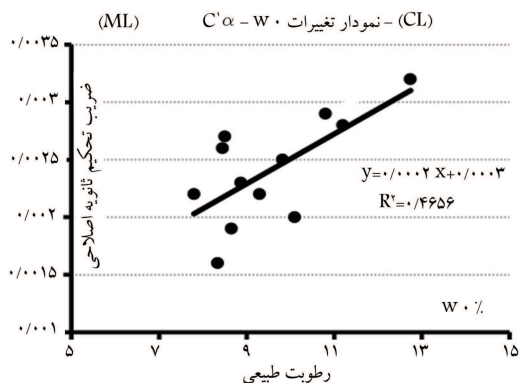


شکل ۸. نتایج رگرسیون برای خاک‌های ریزدانه‌ی  $CL$  (نمودار تغییرات  $C'α - w^{\circ}$ ).

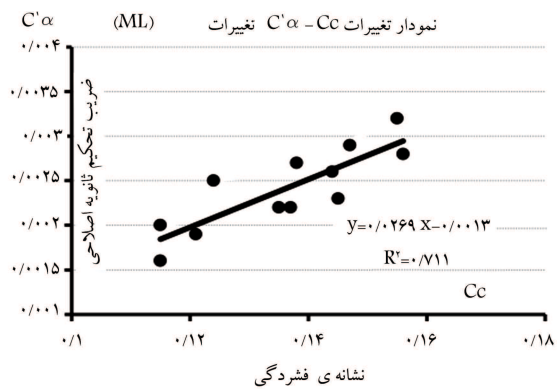
سایر پارامترها بود که نتایج آن در رابطه با ۳ متغیر مذکور در جدول ۴ ارائه شده است. مقادیر ضرایب همبستگی با سایر پارامترها، همبستگی‌های غیرمعنادار و ضعیف بود که حذف شده است.

مطابق شکل‌های ۸ الی ۱۰، در نتایج رگرسیون برای خاک‌های ریزدانه‌ی  $CL$ ، نمودار تغییرات ضرایب  $C'α$  بر حسب ضریب  $Cc$  در نمونه‌های  $CL$  همراه با بارزش خطی و نمایش محدوده‌های پیشنهادی مصری است. اما در تحلیل همبستگی بر حسب  $PI$  دامنه‌ی خمیری نمونه‌های ریزدانه‌ی  $CL$ ، نتایج رگرسیون جهت  $CL$  به صورت مناسب به دست نیامده است. همچنین مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲، در مورد ریزدانه‌های سیلتی  $ML$ ، مقدار همبستگی ضعیف‌تر از نمونه‌های  $CL$  به دست آمده است که در نمودار تغییرات ضرایب  $C'α$  بر حسب ضریب  $Cc$  و  $w^{\circ}$  در نمونه‌های  $ML$  مشاهده می‌شود.

رابطه‌های بارزش شده‌ی همبستگی در نوشتار حاضر براساس بررسی‌های نتایج



شکل ۱۱. نمودار تغییرات ضرایب  $C'α$  بر حسب  $w^{\circ}$  در نمونه‌های  $ML$ .



شکل ۱۲. نمودار تغییرات ضرایب  $C'α$  بر حسب  $Cc$  در نمونه‌های  $ML$ .



همچنین نتایج با مقادیر مطالعات پیشین در سایر مناطق و محدوده‌ها و روابط تجربی ارائه شده توسط سایر پژوهشگران از جمله نتایج و محدوده‌ی پیشنهادی مصری و همکارانش انطباق دارد. نتایج به‌دست آمده با مقادیر توصیه‌شده توسط نشریه ۶۳۴ امور نظام فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی نیز انطباق دارد.

## ۹. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی خاک‌های ریزدانه و ارزیابی‌های نتایج و محاسبات آماری رگرسیون در برآورد همبستگی‌های عمده‌ترین شاخص رفتار خزشی، ضریب تراکم ثانویه خاک‌های ریزدانه‌ی منطقه با سایر پارامترهای خواص فیزیکی آن‌ها، این موارد نتیجه‌گیری شده است:

۱. نظر به مطالعات و پژوهش‌های انجام شده توسط سایر پژوهشگران در همبستگی ضرایب رفتار تحکیم ثانویه و خزش ریزدانه‌ها با مشخصات ضریب تراکم ( $C_c$ )، رطوبت طبیعی ( $w^0$  یا همان  $w_n$ )، دامنه‌ی خمیری خاک ( $PI$ )، حد روانی ( $LL$ ) و نسبت خلأ ( $e^0$ ) و براساس مطالعات و آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر، بهترین رگرسیون با ضریب تراکم  $C_c$  به‌دست آمده است. همبستگی با رطوبت طبیعی نمونه‌ها به میزان ضعیف‌تر و در دو نوع ریزدانه‌ی رسی و سیلتی با پارامترهای فیزیکی خاک متفاوت بوده است.

۲. در خاک‌های ریزدانه‌ی رسی ( $CL$ )، ضرایب همبستگی برآزش شده‌ی به‌دست آمده، سازگاری و دقت بالاتری در ارتباط با خاک‌های ریزدانه‌ی مرتبط در سطح شهر مشهد دارد و با توجه به بافت جنس خاک منطقه، مقادیر نتایج به‌دست آمده نسبت به دامنه‌های توصیه شده و ارائه شده توسط مصری و سایر پژوهشگران، به محدوده‌ی پایین‌تر آن متمایل است که این مسئله ناشی از وجود درصد قابل ملاحظه‌ی بافت سیلت همراه با خاک‌های رسی مورد آزمایش ارزیابی می‌شود.

۳. از نظر ارزیابی پتانسیل خزشی با توجه به نتایج مطالعات و مقایسه با مقادیر جدول ۱، طبقه‌بندی ریزدانه‌ها از نظر ضریب تراکم ثانویه و خاصیت خزشی آن‌ها، عمدتاً با پتانسیل خزشی متوسط برآورد می‌شود.

۴. روابط پیشنهادی جهت ریزدانه‌ها توسط پژوهشگران مختلف بیشتر در رابطه با خاک‌های ریزدانه‌ی رسی قابل استفاده است، ولی در مورد ریزدانه‌های سیلتی و لای، اثر خزشی به مراتب کمتر است که ضرایب پیشنهادی برای منطقه‌ی مشهد نیز معرف این موضوع است و همبستگی مطابق تحلیل‌های رگرسیون و روابط ارائه شده تا حدودی برای لای‌ها با ضریب همبستگی ضعیف وجود دارد.

۵. رابطه‌ی همبستگی ضریب فشردگی و تراکم ثانویه با ضریب فشردگی و تراکم اولیه‌ی خاک در خاک‌های رسی منطقه به‌صورت رابطه‌ی خطی و با دقت مناسب به‌دست آمده است، ولی در ریزدانه‌های سیلتی منطقه، دقت آماری همبستگی بسیار ضعیف‌تر است و در دو نوع ریزدانه‌ی رسی و سیلتی با پارامترهای فیزیکی خاک متفاوت است.

۶. کاربرد اثر خزشی در نشست ساختمان‌های مرتفع و یا مجاورت گودبرداری‌های نسبتاً عمیق واقع در بستر رسی و تأثیر در کنترل جابه‌جایی‌های دیواره‌های گود و جابه‌جایی‌های سازه‌های مجاور گودهای با سیستم‌های سازه‌ی نگهدارنده میخ کوبی (نیلینگ) [۱۸] و مهار (انکرژ) [۱۹] اهمیت خاصی دارد، که ایجاد نشست‌های خزشی این گونه سازه‌های مرتفع و جابه‌جایی‌های افقی درازمدت و خزشی سازه‌های نگهدارنده، آثار چشم‌گیری بر اجزاء داخلی آن‌ها دارد.

حاصل از آزمایش‌های تحکیم ثانویه‌ی نمونه‌های مختلف ریزدانه در منطقه و تفاوت آشکار نسبت‌های همبستگی برای دو گروه خاک‌های  $CL$  و  $ML$  به صورت روابط همبستگی جداگانه به‌دست آمده است که در شکل‌های ۸ الی ۱۰، میزان نزدیکی هر چه بیشتر آن‌ها با نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های خاک محل در مقایسه با محدوده‌ی روابط همبستگی پیشنهادی مشهود است. روابط همبستگی مذکور از تحلیل آماری رگرسیون برای خاک‌های ریزدانه‌ی رسی  $CL$  به صورت روابط ۱۵ الی ۱۷ به‌دست آمده است، در حالی که همبستگی با سایر پارامترهای نمونه‌های ریزدانه، نتایج معنادار و مناسب نداشته است.

$$C'\alpha = 0.70317Cc + 0.70002 \cong (0.7032Cc + 0.70002) \quad (15)$$

$$C'\alpha = 0.70003w^0 + 0.7002 \quad (16)$$

$$C'\alpha = 0.70235Cc + 0.70001w^0 - 0.700001 \cong (0.7023Cc + 0.70001w^0) \quad (17)$$

برای خاک‌های ریزدانه‌ی سیلت یا لای ( $ML$ ) از تحلیل رگرسیون، رابطه‌ی ۱۸ با ضریب همبستگی ضعیف مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به‌دست آمده و معرف آن است که برای ریزدانه‌ی سیلت یا لای با تغییرات درصد رطوبت، همبستگی معتبر و معناداری وجود ندارد.

$$C'\alpha = 0.7027Cc - 0.7001 \cong (0.70275Cc) \quad (18)$$

مقایسه‌ی روابط همبستگی برای خاک‌های ریزدانه‌ی رسی  $CL$  و سیلتی  $ML$  نشان می‌دهد که این همبستگی در ریزدانه‌های رسی به مراتب بیشتر و قوی‌تر و در خاک‌های سیلتی، ضعیف‌تر است و ضرایب همبستگی‌ها در نوع سیلت‌های منطقه نسبت به رس‌ها، مطابق رابطه‌ی اخیر، بسیار کوچک‌تر است.

## ۸. صحت‌سنجی

مطابق رابطه‌ی ۸ در قسمت پیشینه‌ی پژوهش و مرور منابع در زمینه‌ی مطالعات واترمن و بروئر (۲۰۰۵) برای ریزدانه‌ها، مقدار نسبت  $25 \leq \frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*} \leq 5$  بر حسب پارامترهای نشانه‌ی تحکیم ثانویه و خزش اصلاح شده ( $\mu^*$ ) و نشانه‌ی تراکم و فشردگی اولیه‌ی اصلاحی ( $\lambda^*$ ) و پارامتر نشانه‌ی تورم اصلاحی در مرحله‌ی باربرداری ( $\kappa^*$ ) برای کلیه‌ی نمونه‌ها با توجه به نتایج آزمایش‌ها تعیین شد و نتایج نسبت  $25 \leq \frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*} \leq 5$  در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج با حدود پیشنهادی انطباق داشته و برای نمونه‌های ریزدانه‌ی  $CL$ ، نسبت‌ها به مراتب کوچک‌تر است؛ در حالی که برای ریزدانه‌های  $ML$ ، غالباً نسبت مذکور بیش از عدد ۲۰ به‌دست آمده است که نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین شرایط و رفتار خزشی خاک ریزدانه‌ی رسی و سیلتی وجود دارد.

در حالت کلی از محدوده‌ی نسبت پیشنهادی  $(\lambda^* - \kappa^*)/\mu^*$  (رابطه‌ی ۸)، محدوده‌های نسبت‌های تقریبی مطابق روابط ۱۹ و ۲۰ را می‌توان به‌دست آورد که با نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌ها، انطباق مناسبی دارند.

$$0.703 < \frac{C\alpha}{Cc} < 0.718 \quad (19)$$

$$0.706 < \frac{C'\alpha}{Cc} < 0.710 \quad (20)$$

پانوشتها

1. Terzaghi & Peck
2. Mesri and Godlewski
3. peat
4. Nakase
5. Sabkha
6. Mesri and Castro
7. Mesri and Feng
8. Mesri and Vardhanabhuti
9. Waterman and Broere
10. Watabe
11. Kansai
12. Salem & Sherbiny
13. plaxis
14. Degago & Grimstad
15. Excel
16. multiple linear regression
17. partial least square

منابع (References)

1. Bowles, J.E. "Foundation analysis and design", The McGraw-Hill Companies Inc., New York, pp. 57-84 (1999).
2. Das, B.M. "Advanced soil mechanics", The McGraw-Hill Companies Inc., New York, pp. 253-331 (1987).
3. Dhoeian, A.W. "Secondary compression of sabkha "So-line" soils", *Engineering Geology*, **30**(2), pp. 155-169 (Apr., 1991).
4. Mesri, Gh. "Coefficient of secondary compression", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, **99**(1), pp. 123-137 (1973).
5. Waterman, D. and Broere, W. "Practical application of the soft soil creep-part III", *Plaxis Benchmarking*, **17**, p. 22 (2005).
6. Degago, S.A. "Primary consolidation and creep of clays", Norwegian University of Science and Technology, Norway, Norwegian Public Roads Administration (SW), (Jan., 2014).
7. Azari, B., Fatahi, B. and Khabbaz, H. "Application of creep ratio concept for estimating post constriction settlement of deep soft clay deposits", *International Conference On Advances in Geotechnical Engineering*, Perth, Australia (Nov.7-9, 2011).
8. Albaba, A. "Modelling creep and rate effects in soils", Department of Civil Eng., University of Strathclyde (Aug., 2012).
9. Watabe, Y., Udaka, K., Nakatani, Y. and et al. "Long-term consolidation behavior interpreted with isotache concept fo worldwide clays", *Soils and Foundation*, **52**(3), pp. 449-464 (June, 2012).
10. Mesri, G.H. "Discussion on long term consolidation behavior interpreted with isotache concept for worldwide clays", *Journal of Japanese Geotechnical Society, Solis, and Foundations*, **53**(2), pp.357-359 (2013).
11. Mesri, Gh. and Funk, J.R. "Settlement of the Kansai international airport Islands", *Journal of Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, **141**(2), (2015).
12. Salem, M. and El-Sherbiny, R. "Comparison of measured and calculated consolidation settlements of thick underconsolidated clay", *Alexandria Engineering Journal*, **53**(1), pp. 107-117 (2014).
13. Jie, Zh., Tongling, Zh. and Gui-xuan, W. "Numerical analysis of consolidation settlement and creep deformation of artificial Island Revetment Structure in a Large Scale Mariane Reclamation Land Project", *Polish Maritime Research Special Issue*, **22**, pp. 35-42 (2015).
14. Degago, S.A. "Evaluation of soil parameters for creep calculation of filed cases", Grimstad, Norwegian University of Science and Technology, Norway NGM2016 Reykjavik, Proceeding of the 17 th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic (25- 28 May, 2016).
15. Sexton, B.G. and McCabe, B.A. "Stone column effectiveness in soils with creep: A numerical study", *Geomechanics and Geoengineering*, **11**(4), pp. 252-269 (2016).
16. Kamao, Sh. "Creep and relaxation behavior of highly organic soil", *International Journal of GEOMATE, Department of Civil Engineering*, Nihon University, **11**(3), pp. 2506-2511 (2016).
17. Bowles, J.E. "Physical and geotechnical properties of sands", The McGraw-Hill Companies Inc., New York, pp. 299-317 (1989).
18. Lazarte, C.A., Elias, V., Espinoza R.D. and et al. "Anchors and anchored systems", FHWA (Federal Highway Administration), 4th Edition (2014).
19. Lazarte, C.A., Elias, V., Espinoza, R.D. and et al. "Soil nail walls", FHWA (Federal Highway Administration), 7th Edition (2014).