

ارائه رابطه تجربی جدید برای برآورد قابلیت فشردگی خاک‌های رسی تحکیم نیافته*

نادر عباسی^(۱)

چکیده نشست ناشی از تحکیم خاک‌های ریزدانه یکی از مسائل مهم در طراحی‌های مربوط به سازه‌های مختلف عمرانی است. پتانسیل نشست تحکیمی خاک با ضریبی به نام شاخص فشردگی بیان می‌گردد. این تحقیق با هدف بررسی ارتباط مشخصات فیزیکی مختلف خاک با پتانسیل فشردگی آن و ارائه‌ی رابطه‌ی جدیدی برای تخمین منحنی فشردگی و شاخص فشردگی بر اساس مؤثرترین مشخصه‌ی فیزیکی انجام گرفته است. بدین منظور ابتدا نمونه‌های متعددی از مناطق مختلف کشور تهیه و آزمایش‌های مختلف شناسایی و آزمایش تحکیم یک بعدی بر روی آن‌ها با رطوبت‌های اولیه متفاوت انجام گرفت. سپس مقدار شاخص فشردگی برای هر یک از نمونه‌های آزمایشی، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و نیز با استفاده از روابط تجربی موجود تعیین گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS آنالیز همبستگی و رگرسیون بر روی داده‌های به دست آمده صورت گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص گردید که روابط تجربی مبتنی بر مشخصه‌های مبین وضعیت ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ی نظیر، نسبت پوکی، وزن واحد حجم و رطوبت اولیه از دقت و کارایی بیشتری نسبت به سایر روش‌های موجود در تعیین شاخص فشردگی برخوردار است. همچنین در این پژوهش یک رابطه‌ی تجربی یک متغیره بر اساس وزن واحد حجم خشک خاک برای برآورد منحنی فشردگی و شاخص فشردگی خاک پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی شاخص فشردگی، تحکیم، نشست، منحنی فشردگی، وزن واحد حجم خشک.

A New Empirical Equation for Compression Behavior of Unconsolidated Clayey Soils

N. Abasi

Abstract Compressibility characteristics of fine-grained soils are often the most important parameters for settlement evaluation of the founded layers. The compression index which is the slope of virgin curve is usually for determination of settlement potential of fine grained soils. In this research, the effects of different physical and index properties of soil samples were investigated on compression index in order to find the most compatible properties and reliable equation based for a wide range of soil samples collected from different sites of Iran. For this purpose, one-dimensional consolidation tests were conducted utilizing conventional oedometer test on 26 soil samples at three different levels of void ratio. The compression index of each specimen was determined using data obtained from test results and correlation analysis was made using statistical software, SPSS. The results showed that the compression index, C_c , has a significant correlation with the most of index properties where its coefficient of correlation with structural properties was strongly greater than those related to inherent properties. Therefore the empirical equations which do not consider at least one structural parameter and use only intrinsic properties could not estimate the compression index properly. Furthermore a very simple and reliable equation was developed for estimation of the compression index and virgin curve of unconsolidated and normally consolidated fine-grained soils. Statistical analysis demonstrated that the proposed relationship predicts the compression index accurately in comparison with the existing relationships.

Key Words Consolidation, Compression index, Settlement, Compression line, Empirical Equation

*تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۹/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۸/۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: استادیار مؤسسه‌ی تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

مقدمه

به طوری که به ازای یک تنش معین مقدار نسبت پوکی برای خاک‌ها متفاوت است و با افزایش حد روانی افزایش می‌یابد. هم‌چنین برای دو نوع خاک که دارای حد روانی تقریباً یکسان ولی مقدار نسبت پوکی در حد روانی متفاوت بوده‌اند (به علت تفاوت در مقدار توده‌ی ویژه)، تفاوت محسوسی در رفتار فشردگی آن‌ها وجود دارد. سوشیدا [3] نشان داد تغییرات نسبت پوکی نسبت به تنش مؤثر به ازای رطوبت دو برابر حد روانی به صورت یک خط مستقیم است و در رطوبت‌های بیش‌تر و کم‌تر از آن حالت تقعر و تحدب دارد. شریدهاران و ناگارج [4]، تحقیقات جامعی برای یافتن رابطه‌ای مناسب برای شاخص فشردگی انجام داده‌اند. آن‌ها ۱۰ نمونه خاک رسی طبیعی با محدوده‌ی وسیعی از حد روانی تهیه و آزمایش‌های مقدماتی نظیر دانه‌بندی، حدود آتربرگ و کانی‌شناسی بر روی آن‌ها انجام دادند و نشان دادند که شاخص فشردگی خاک‌ها رابطه‌ی خوبی با شاخص انقباض دارد.

شریدهاران و پراکاش [5] بیان کردند که منحنی تغییرات نسبت پوکی نسبت به لگاریتم تنش مؤثر خاک‌های رسی تابع مقدار رطوبت اولیه‌ی نمونه می‌باشد. بدین ترتیب که بسته به مقدار رطوبت اولیه منحنی‌های متعددی برای یک نمونه خاک وجود دارند که این منحنی‌ها در محدوده‌ی دو منحنی حدی بالائی و پایینی قرار دارند. بو و همکاران [6] بیان کردند که رفتار فشردگی خاک‌های رسی خیلی نرم، قابل ارزیابی با تئوری‌های مرسوم که شیب یکتایی برای تغییرات نشست نسبت به تنش مؤثر در نظر می‌گیرند، نبوده‌است و نشان دادند که منحنی تغییرات نسبت پوکی نسبت به تنش مؤثر دارای سه شیب متفاوت است. به عبارت دیگر برای یک خاک رسی خیلی نرم، بسته به محدوده‌ی تنش سه نوع ضریب فشردگی وجود دارد. در تحقیقات متعدد دیگری نیز از رابطه‌ی خطی برای بیان رابطه‌ی بین نسبت پوکی و شاخص فشردگی استفاده شده است [8، 7]. یون [9] رابطه‌ی بین شاخص فشردگی و مشخصات فیزیکی خاک‌های

ارزیابی رفتار فشردگی خاک‌های ریزدانه و تعیین مقدار فشردگی ایجاد شده در خاک‌های ریزدانه در اثر افزایش تنش ناشی از بارگذاری، و به عبارت دیگر تعیین مقدار نشست حاصل از تحکیم اولیه یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. پتانسیل نشست تحکیمی یک خاک بستگی به خصوصیات خاک و تاریخچه‌ی تنش آن دارد و برای یک خاک معین با ضریبی به نام شاخص فشردگی (C_c) بیان می‌گردد. این ضریب که همان شیب منحنی تغییرات نسبت پوکی (e) نسبت به لگاریتم تنش مؤثر (منحنی فشردگی) است، معمولاً با انجام آزمایش تحکیم و تحلیل نتایج حاصل از آن به دست می‌آید. با توجه به این‌که آزمایش تحکیم بسیار وقت‌گیر و پرهزینه است و شرایط تهیه‌ی نمونه‌ی آزمایشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج به دست آمده دارد، محققان در طول سال‌های اخیر سعی نموده‌اند تا تأثیر عوامل مختلف بر منحنی تنش مؤثر- نسبت پوکی را شناسایی و آن را به نحوی با استفاده از مشخصات فیزیکی خاک و بدون انجام آزمایش برآورد نمایند. در این راستا روابط متعددی براساس خواص فیزیکی خاک‌ها نظیر حد روانی، رطوبت طبیعی نمونه، نسبت پوکی اولیه در محل، وزن واحد حجم خشک، دامنه‌ی خمیری و نسبت پوکی در حد روانی برای تخمین شاخص فشردگی ارائه گردیده است.

لمب و ویتمن [1] نشان دادند که تغییرات نسبت پوکی نسبت به تنش مؤثر در خاک‌های عادی تحکیم یافته الزاماً خطی است. به طوری که خاک‌های با خاصیت خمیری بیش‌تر دارای شاخص فشردگی بیش‌تر هستند و به ازای یک تنش معین از نسبت پوکی بیش‌تری برخوردارند. برلند [2] رفتار تحکیمی چند خاک رسی با خاصیت خمیری‌های مختلف را در شرایط بازسازی شده بررسی کرد و نشان داد که شکل عمومی تغییرات نسبت پوکی با تنش مؤثر برای همه‌ی خاک‌ها به صورت خطی با اندکی تحدب به بالا است.

روابط پیشنهادی خود را برای خاک‌های مناطق خاصی توصیه نموده‌اند. در این پژوهش ابتدا چگونگی تأثیر مشخصات فیزیکی مختلف خاک‌ها در منحنی فشردگی و مقدار شاخص فشردگی مورد مطالعه قرار گرفته و کارایی روابط تجربی موجود ارزیابی گردیده است. هم‌چنین به منظور ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی جدید متناسب با خاک‌های ایران، بررسی‌های تحلیلی و آماری انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

تهیه‌ی نمونه‌های خاک. به منظور بررسی و ارزیابی نقش مشخصات فیزیکی خاک‌های ریزدانه بر مشخصات و رفتار تحکیمی آن‌ها، اقدام به تهیه‌ی ۲۶ نمونه خاک طبیعی از مناطق مختلف کشور شامل استان البرز (نظرآباد، هشتگرد، کرج)، استان قزوین (آبیک، تاکستان، اقبالیه) استان اردبیل (مسیر کانال اصلی خدا آفرین)، استان خوزستان (آبادان، شادگان، شوشتر، بهبهان) و اصفهان، با مشخصات فیزیکی و شیمیایی متفاوت گردید. در انتخاب آن‌ها سعی گردید که نمونه‌های انتخاب‌شده دارای خواص خمیری متفاوتی باشند. بدین منظور از مقدار حد روانی که متأثر از خصوصیات مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک می‌باشد، به‌عنوان معیار انتخاب استفاده گردید. به‌طوری‌که نمونه‌های انتخاب‌شده دارای حد روانی متنوعی از ۲۳ درصد الی ۷۴ درصد بوده‌اند. نمونه‌ها پس از انتخاب به آزمایشگاه منتقل و مورد آزمایش‌های شناسائی شامل دانه‌بندی، تعیین حدود آتربرگ، تراکم و طبقه‌بندی مطابق استاندارد [16] قرار گرفتند. جدول شماره‌ی (۱) مشخصات فیزیکی نمونه خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

آزمایش تحکیم یک‌بعدی

در این تحقیق مشخصات تحکیمی نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از روش B آزمایش تحکیم استاندارد (ASTM D 2435-96) که طی آن نمونه در جهت جانبی محصور شده و تغییر شکل و زه‌کشی نمونه فقط

رسی سواحل کره را مورد بررسی قرار داده و بیان کردند که روابط تجربی ارائه‌شده در مراجع قابل استفاده برای خاک‌های رسی سواحل کره نمی‌باشند و تنها روابطی که متکی بر درصد رطوبت طبیعی خاک هستند می‌توانند شاخص فشردگی را با دقت مناسب پیش‌بینی نمایند. هم‌چنین در این تحقیق سه نوع رابطه‌ی تجربی مختلف و سه متغیره (با استفاده از سه فاکتور رطوبت اولیه، نسبت پوکی و حد روانی) برای خاک‌های رسی شرق، جنوب و غرب شبه‌جزیره کره ارائه داده‌اند. سراتو و لوتنگر [10] نشان دادند که منحنی فشردگی برای یک خاک منحصر به فرد نیست و با توجه به مقدار رطوبت اولیه‌ی نمونه‌ی آزمایشی، متفاوت است. پارک و کوموتو [11] کمیت فیزیکی تخلخل اولیه‌ی خاک (n_0) را مناسب‌ترین کمیت فیزیکی برای تخمین شاخص فشردگی معرفی نمودند. نث و دیدلال [12] با استفاده از رگرسیون خطی رابطه‌ی بین مشخصات فیزیکی خاک را شامل نسبت پوکی، حد روانی و دامنه‌ی خمیری با شاخص فشردگی بررسی و نتیجه‌گیری نمودند که رابطه‌ی خطی شاخص فشردگی با دامنه‌ی خمیری از دقت بیش‌تری برخوردار است. راتو و همکاران [13] با بررسی تأثیر مشخصات مختلف فیزیکی بر مقدار شاخص فشردگی بیان کردند که وزن مخصوص خشک و حد روانی بیش‌ترین تأثیر را بر مقدار شاخص فشردگی دارند. اوزر و همکاران [14] ضمن بررسی کارایی روش‌های تجربی موجود، رابطه‌ی یک متغیره (بر اساس نسبت پوکی اولیه) ارائه‌شده توسط آروز و همکاران [15] را مناسب‌ترین روش برای تخمین شاخص فشردگی خاک‌ها معرفی نمودند. آن‌ها هم‌چنین با استفاده از داده‌های مربوط به ۱۳۵ نمونه خاک مدلی را بر اساس شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تعیین شاخص فشردگی ارائه دادند.

تنوع روابط تجربی ارائه شده بیانگر این حقیقت است که هنوز این روابط از دقت و قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار نیستند و هر کدام برای شرایط خاصی قابل کاربرد هستند. به‌طوری‌که برخی محققان

(شامل نوع و مقدار کانی‌های تشکیل‌دهنده، شکل، اندازه و نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی ذرات و هم‌چنین مشخصات شیمیایی آب منفذی) و عوامل محیطی (میزان رطوبت، وزن واحد حجم، نسبت پوکی و ساختمان خاک) است، در انجام آزمایش تحکیم سعی گردید تأثیر هر دو گروه از عوامل ذکرشده مورد توجه قرار گیرد. بدین صورت که هر یک از خاک‌های مورد بررسی در سه مقدار نسبت پوکی اولیه متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند.

در امتداد قائم صورت می‌گیرد، تعیین گردیدند. در این آزمایش مقدار تغییرشکل نمونه که معمولاً با نسبت پوکی ارزیابی می‌گردد، نسبت به تنش‌های اعمال شده و هم‌چنین نسبت به زمان به‌ازای هر افزایش تنش قرائت و یادداشت می‌گردد. سپس با ترسیم منحنی تغییرات نسبت پوکی در مقابل لگاریتم تنش مؤثر (منحنی فشرده‌گی)، مقدار شاخص فشرده‌گی که همان شیب این منحنی می‌باشد، تعیین می‌گردد. با توجه به این‌که خواص مهندسی خاک‌ها از جمله شاخص فشرده‌گی تابع دو گروه از عوامل شامل؛ عوامل ترکیبی

جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد بررسی

شماره‌ی نمونه	بافت (%)			مشخصات تراکمی		حدود آتبرگ	
	رس	سیلت	ماسه	رطوبت بهینه %	دانسیته خشک ماکزیمم gr/cm ³	حد روانی %	حد خمیری %
۱	۲۸	۴۸	۲۴	۱۷	۱/۷۵	۳۱	۲۴
۲	۲۵	۴۷	۲۸	۱۷/۵	۱/۸۱	۲۹	۲۰
۳	۳۵	۳۹	۲۶	۱۹/۵	۱/۷۲	۳۴/۵	۲۰
۴	۳۰	۳۸	۳۲	۱۹/۶	۱/۷۴	۳۶	۲۳/۵
۵	۱۶	۵۴	۳۰	۱۵	۱/۸۴	۲۲/۵	۲۱
۶	۲۸	۴۸	۲۴	۱۸/۵	۱/۷۵	۳۲/۵	۲۲
۷	۱۸	۶۷	۱۵	۱۹/۷۵	۱/۷۴	۳۱	۱۹/۷
۸	۴۹	۳۵	۱۶	۲۵/۵	۱/۵۵	۷۰	۲۸
۹	۳۳	۶۱	۶	۲۱/۲	۱/۶۶	۴۶	۲۵
۱۰	۵۰	۴۲	۸	۲۴	۱/۶	۵۴	۲۳
۱۱	۴۶	۴۳	۱۱	۲۵/۵	۱/۴۸	۶۴	۳۱
۱۲	۴۸	۴۵	۷	۲۵/۷	۱/۵۳	۵۷	۲۶
۱۳	۳۸	۵۰	۱۲	۲۱/۴	۱/۶۷	۳۸	۲۶
۱۴	۳۴	۴۱	۲۵	۱۹	۱/۷۱	۳۵	۲۲/۵
۱۵	۴۹	۴۹	۲	۲۲	۱/۶۴	۵۶	۲۷
۱۶	۳۶	۶۳	۱	۱۸	۱/۷۶	۳۴	۲۰/۲
۱۷	۲۶	۶۲	۱۲	۲۰	۱/۶۸	۳۷	۲۵
۱۸	۳۲	۵۲	۱۶	۱۷/۵	۱/۸۱	۳۰	۱۸
۱۹	۴۴	۵۶	۰	۲۲/۲۵	۱/۶۴	۴۰	۲۳
۲۰	۲۴	۷۲	۴	۱۹	۱/۷	۳۱	۲۲
۲۱	۲۳	۶۶	۱۱	۲۲/۲	۱/۶۲	۴۱/۵	۲۶/۵
۲۲	۱۷	۷۶	۷	۱۵	۱/۸۲	۲۴/۵	۲۳
۲۳	۴۸	۵۲	۰	۱۹	۱/۶۷	۴۰	۲۲
۲۴	۲۶	۶۷	۷	۱۷	۱/۷۳	۳۱	۲۰
۲۵	۲۵	۶۲	۱۳	۱۷	۱/۷۹	۳۰	۲۰/۲
۲۶	۲۸	۵۷	۱۵	۲۰	۱/۶۷	۳۴	۲۳

ساخت نمونه‌های آزمایشی

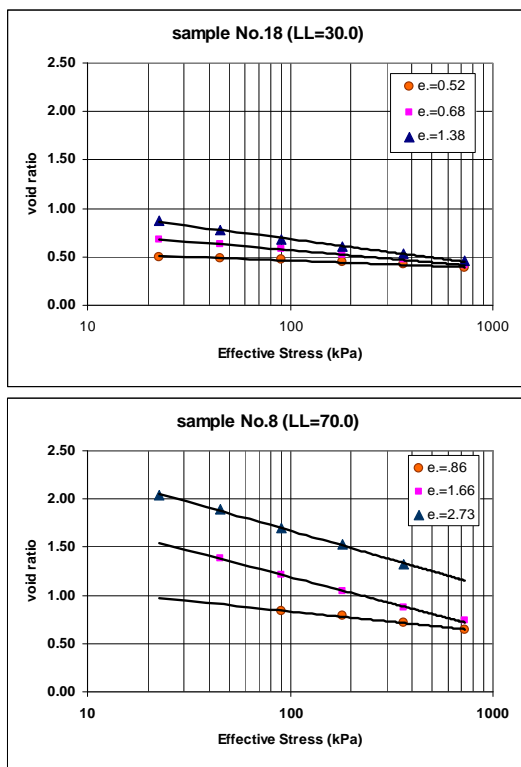
فشاری قرار داده شدند. لذا در هر دو حالت مذکور، نمونه‌ها هیچ‌گونه تنش را تجربه نمی‌کنند و کاملاً تحکیم نیافته محسوب می‌گردند. نمونه‌های گروه سوم نیز پس از محاسبه‌ی وزن نمونه‌ی مرطوب مورد نیاز (به‌ازای حجم رینگ تحکیم) جهت حصول نسبت پوکی معین با رطوبت معادل ۵۰ درصد حد روانی ($\frac{\omega}{LL} = 0.5$) در داخل رینگ با استفاده از نیروی تراکمی قالب‌گیری شدند. با این وجود، فشار مورد استفاده در ساخت این نمونه‌ها به‌مراتب کم‌تر از تنش‌های اعمال شده در آزمایش تحکیم بوده‌اند به‌طوری‌که می‌توان این نمونه‌ها را نیز عادی تحکیم یافته محسوب کرد. شکل شماره‌ی (۱) دستگاه‌های تحکیم مورد استفاده در این پژوهش و حالت نمونه‌ی آزمایشی تهیه‌شده با رطوبت اولیه‌ی حدود ۱/۲ برابر حد روانی را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که خاک‌ها بسته به مقدار حد روانیشان با رطوبت‌های متفاوتی به یک حد معینی از نسبت پوکی و یا وضعیت مقاومتی می‌رسند، لذا در این پژوهش برای ایجاد مقادیر مختلف نسبت پوکی اولیه از نسبت رطوبت اولیه به حد روانی ($\frac{\omega}{LL}$) استفاده گردید. به طوری‌که هر یک از خاک‌ها با سه وضعیت اولیه‌ی متفاوت شامل رطوبت‌های اولیه ۱/۲، ۰/۸ و ۰/۵ برابر حد روانی آن‌ها تهیه گردیدند. در هر یک از نسبت‌های مذکور مقادیر رطوبت و نسبت پوکی اولیه‌ی نمونه‌ها محاسبه و مورد استفاده قرار گرفتند. نمونه‌های گروه اول با رطوبت اولیه حدود ۱/۲ برابر حد روانی آن‌ها به صورت دوغاب بودند و به راحتی داخل سلول نمونه روی دستگاه ریخته شدند. های گروه دوم که دارای رطوبتی بیش از حد خمیری (و کم‌تر از حد روانی) بودند، داخل رینگ نمونه بدون اعمال هرگونه



شکل ۱ دستگاه‌های تحکیم مورد استفاده و نمونه‌ی آزمایشی با رطوبت اولیه‌ی بیش از حد روانی

مشخصات خمیری معین، ضرایب e_1 و C_c با افزایش مقدار رطوبت اولیه و یا نسبت پوکی افزایش می‌یابند. هم‌چنین خاصیت خمیری خاک نیز در این ضرایب مؤثر است. به‌طوری‌که با افزایش حد روانی خاک، مقادیر این ضرایب افزایش می‌یابند.



شکل ۲ نمونه‌ای از منحنی‌های نسبت پوکی - تنش مؤثر با سه مقدار نسبت پوکی اولیه متفاوت

تعیین تأثیر مشخصات فیزیکی نمونه‌ها بر رفتار

فشردگی خاک‌ها

در این پژوهش به منظور تعیین مقدار تأثیر پارامترهای مختلف خاک بر رفتار فشردگی خاک، آنالیز همبستگی بین مقدار ضرایب منحنی فشردگی (شاخص فشردگی و عرض از مبدأ) و مشخصات فیزیکی مختلف خاک‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. بسته‌ی نرم‌افزاری SPSS یکی از برنامه‌های کاربردی در زمینه‌ی تجزیه و تحلیل‌های آماری نظیر محاسبه‌ی شاخص‌های آماری، انجام آنالیز واریانس‌های مختلف،

نتایج و بحث

تعیین مشخصات منحنی فشردگی نمونه‌ها. با استفاده از نتایج به‌دست آمده از آزمایش تحکیم، منحنی‌های تغییرات نسبت پوکی در مقابل تنش مؤثر (منحنی فشردگی) برای هر یک از نمونه‌های آزمایشی ترسیم گردیدند. شکل شماره‌ی (۲) نمونه‌ای از این منحنی‌ها را برای خاک شماره‌ی (۸) (با حد روانی ۷۰ درصد) و خاک شماره‌ی (۱۸) (با حد روانی ۳۰ درصد) با سه وضعیت نسبت پوکی اولیه‌ی متفاوت نشان می‌دهد. همان طوری که از شکل ۲ قابل ملاحظه است با توجه به این‌که نمونه‌های آزمایشی مورد استفاده به‌صورت دست‌خورده و بدون ایجاد شرایط پیش‌تحکیمی تهیه گردیده بودند، منحنی‌های فشردگی به‌دست آمده در اغلب موارد با ضریب تبیین (R^2) بزرگ‌تر از ۰/۹۵ خطی بودند. تنها ضرایب این خطوط یعنی شیب و عرض از مبدأ آن‌ها بسته به نوع خاک و نسبت پوکی اولیه‌ی آن‌ها متفاوت بود. بدین ترتیب که با افزایش مقادیر حد روانی و نسبت پوکی اولیه، شیب و عرض از مبدأ خط نیز افزایش می‌یابند. به‌طوری‌که برای کلیه‌ی نمونه‌های آزمایشی، برای بیان چگونگی تغییرات نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر می‌توان معادله‌ی عمومی زیر را ارائه نمود:

$$e = e_1 - C_c \log p \quad (1)$$

که در آن C_c شیب منحنی فشردگی است که شاخص فشردگی نامیده می‌شود و e_1 مقدار عرض از مبدأ خط بوده و از نظر فیزیکی مقدار نسبت پوکی به‌ازای تنش واحد ($P=1 \text{ kPa}$) است. پس از ترسیم تغییرات نسبت پوکی به‌ازای لگاریتم تنش ($e-\log P$)، به‌ازای هر یک از نمونه‌های آزمایشی، مشخصات خطوط به‌دست آمده یعنی مقادیر شیب (C_c) و عرض از مبدأ (e_1) آن‌ها تعیین گردیدند که نتایج به‌دست آمده در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند. با توجه به جدول مذکور می‌توان دریافت که برای یک نمونه خاک با

تقسیم‌بندی شوند، می‌توان نتیجه گرفت که اولاً شاخص فشردگی خاک‌ها با هر دو گروه همبستگی معنی‌داری دارد و ثانیاً مقدار همبستگی با مشخصه‌های مرتبط با ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ها به مراتب بیش‌تر است.

ارائه‌ی رابطه‌ی تجربی جدید برای برآورد

منحنی فشردگی و تعیین شاخص فشردگی

همان‌طوری که از جدول (۳) قابل ملاحظه است، در این پژوهش بررسی‌های گسترده‌ای در خصوص تعیین مقدار تأثیر مشخصات فیزیکی نمونه‌ها بر مقدار شاخص فشردگی و نهایتاً تعیین رابطه‌ای که مقدار شاخص فشردگی را با دقت بیش‌تری پیش‌بینی کند، صورت گرفته است. با توجه به مقادیر جدول مذکور ملاحظه می‌گردد مقدار همبستگی عوامل ترکیبی یعنی مشخصات مرتبط با جنس خاک کم‌تر از ۰/۶ است و از بین آن‌ها حد روانی با ضریب همبستگی معادل ۰/۵۹۳ بیش‌ترین تأثیر را در شاخص فشردگی دارد. در حالی که عوامل محیطی و یا مشخصه‌های مرتبط با ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ها شامل رطوبت اولیه‌ی نمونه (ω_0) ، نسبت پوکی اولیه (e_0) ، وزن واحد حجم خشک (γ_d) تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ در مقدار شاخص فشردگی دارند. یعنی به احتمال بیش از ۹۹ درصد همبستگی بین آن‌ها وجود دارد. لذا در تحلیل‌های بعدی از این مشخصه‌ها برای استخراج رابطه به‌منظور تعیین شاخص فشردگی استفاده گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در مراجع و هم‌چنین نتایج حاصل از این پژوهش ملاحظه می‌گردد که شاخص فشردگی خاک‌ها تابع دو گروه عمده از عوامل تأثیرگذار هستند که عوامل مرتبط با مشخصات فیزیکی بیانگر ساختمان اولیه‌ی نمونه‌ها مهم‌ترین آن‌ها است.

مقایسه‌ی میانگین، برآزش انواع مختلف رگرسیون، تعیین همبستگی بین داده‌ها و... است. در این پژوهش آنالیز همبستگی بین مشخصات مختلفی نظیر حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، حد انقباض (SL)، رطوبت اولیه‌ی نمونه (ω_0) ، نسبت پوکی اولیه (e_0) ، وزن واحد حجم خشک (γ_d) ، دامنه‌ی خمیری (I_p) ، شاخص انقباض (I_s) ، نسبت پوکی در حد روانی (e_L) ، چگالی ذرت جامد خاک (G_s) نسبت پوکی در حد خمیری (e_p) ، رطوبت بهینه (ω_{opt}) ، دانسیته ماکزیمم (γ_{max}) ، درصد رس (clay)، عدد فعالیت رس (A) و شاخص فشردگی (c_c) استفاده گردید. سپس ضریب همبستگی هر یک از مشخصه‌ها با ضرایب منحنی فشردگی یعنی e_1 (عرض از مبدأ) و C_c (شاخص فشردگی) تعیین گردید. جدول شماره‌ی (۳) ضریب همبستگی برخی از این مشخصات فیزیکی با یکدیگر و با شاخص فشردگی را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول مذکور ملاحظه می‌شود مقدار شاخص فشردگی و عرض از مبدأ خط فشردگی با اغلب مشخصه‌های مورد ارزیابی، همبستگی معنی‌داری دارد ولی مقدار ضریب همبستگی به‌ازای مشخصه‌های مختلف متفاوت است. به‌طوری‌که مقدار ضریب همبستگی شاخص فشردگی و عرض از مبدأ خط با مشخصه‌های وزن واحد حجم خشک (γ_d) ، نسبت پوکی اولیه (e_0) و رطوبت اولیه (ω_0) بزرگ‌تر از ۰/۹ و به‌مراتب بیش‌تر از مقدار همبستگی این ضرایب با سایر مشخصات فیزیکی است. هم‌چنین مقدار همبستگی شاخص فشردگی با سایر مشخصات فیزیکی که به نوعی با جنس ذرات و خاصیت خمیری آن‌ها در ارتباط هستند تقریباً یکسان و حدود ۰/۵ می‌باشد. به‌طور کلی اگر کلیه‌ی مشخصات فیزیکی خاک‌ها به دو گروه شامل مشخصات مرتبط با جنس ذرات (خواص خمیری، درصد ذرات رس، عدد فعالیت و...) و مشخصات مرتبط با ساختمان اولیه‌ی نمونه (وزن واحد حجم، نسبت پوکی اولیه و رطوبت اولیه)

جدول ۲ مشخصات منحنی فشردگی نمونه‌ها (مقادیر شاخص فشردگی و عرض از مبدأ)

مشخصات خط e-LogP		نسبت پوکی اولیه	شماره خاک	مشخصات خط e-LogP		نسبت پوکی اولیه	شماره خاک	مشخصات خط e-LogP		نسبت پوکی اولیه	شماره خاک
شاخص فشردگی	عرض از مبدأ			شاخص فشردگی	عرض از مبدأ			شاخص فشردگی	عرض از مبدأ		
۰/۱۸	۰/۹۱۲	۰/۷۰	۱۹	۰/۱۰	۰/۸۸۷	۰/۷۴	۱۰	۰/۰۹	۰/۶۵۰	۰/۵۰	۱
۰/۲۵	۱/۲۶۱	۰/۹۷		۰/۳۲	۱/۵۷۵	۱/۲۱		۰/۱۷	۰/۸۰۰	۰/۸۰	
۰/۳۶	۱/۶۳۳	۱/۵۸		۰/۵۵	۲/۲۵۵	۱/۵۴		۰/۲۲	۱/۰۷۷	۰/۹۰	
۰/۰۸	۰/۶۶۴	۰/۵۵	۲۰	۰/۲۳	۰/۹۸۴	۰/۷۳	۱۱	۰/۱۲	۰/۷۹۲	۰/۶۰	۲
۰/۱۴	۰/۷۹۲	۰/۶۵		۰/۴۹	۲/۱۹۲	۱/۷۰		۰/۱۵	۰/۸۵۲	۰/۶۴	
۰/۵۳	۱/۹۳۵	۱/۲۵		۰/۵۱	۲/۲۷۶	۱/۸۷		۰/۱۸	۱/۰۳۹	۱/۰۲	
۰/۱۰	۰/۷۸۵	۰/۶۶	۲۱	۰/۱۴	۰/۹۴۱	۰/۷۷	۱۲	۰/۱۰	۰/۷۴۹	۰/۶۰	۳
۰/۲۱	۱/۰۷۳	۰/۸۵		۰/۴۵	۱/۹۹۲	۱/۵۵		۰/۱۲	۰/۸۸۱	۰/۷۱	
۰/۲۹	۱/۴۹۶	۱/۴۹		۰/۴۹	۲/۱۷۷	۱/۹۱		۰/۲۴	۱/۲۱۵	۱/۰۷	
۰/۰۸	۰/۵۸۳	۰/۴۹	۲۲	۰/۰۹	۰/۶۹۲	۰/۵۶	۱۳	۰/۰۷	۰/۶۴۶	۰/۵۵	۴
۰/۱۰	۰/۶۲۱	۰/۵۲		۰/۲۵	۱/۲۰۱	۰/۸۸		۰/۱۹	۱/۰۲۲	۰/۸۱	
۰/۱۶	۰/۸۹۲	۰/۹۱		۰/۲۸	۱/۳۴۹	۱/۲۱		۰/۳۸	۱/۶۲۵	۱/۱۳	
۰/۰۸	۰/۶۵۱	۰/۵۵	۲۳	۰/۰۹	۰/۶۴۵	۰/۵۳	۱۴	۰/۰۸	۰/۱۹۸	۰/۱۳	۵
۰/۱۵	۰/۸۶۴	۰/۶۷		۰/۲۵	۱/۲۴۸	۰/۹۵		۰/۰۷	۰/۵۴۴	۰/۴۷	
۰/۲۶	۱/۳۳۱	۱/۳۲		۰/۳۱	۱/۳۴۸	۱/۱۵		۰/۱۴	۰/۸۰۰	۰/۶۶	
۰/۰۷	۰/۶۱۴	۰/۵۲	۲۴	۰/۱۳	۰/۸۰۱	۰/۶۶	۱۵	۰/۰۹	۰/۶۷۸	۰/۵۷	۶
۰/۱۴	۰/۸۲۰	۰/۷۱		۰/۲۷	۱/۴۰۴	۱/۱۵		۰/۱۶	۰/۸۶۲	۰/۶۷	
۰/۲۷	۱/۳۷۶	۱/۱۵		۰/۴۴	۱/۸۷۴	۱/۵۸		۰/۱۸	۱/۱۱۹	۱/۰۷	
۰/۱۰	۰/۶۷۵	۰/۵۴	۲۵	۰/۱۳	۰/۷۵۱	۰/۵۸	۱۶	۰/۰۸	۰/۵۹۸	۰/۵۲	۷
۰/۱۸	۰/۸۳۱	۰/۶۳		۰/۱۹	۰/۹۱۰	۰/۷۵		۰/۱۷	۰/۸۶۸	۰/۶۸	
۰/۳۱	۱/۳۳۲	۱/۲۱		۰/۲۰	۱/۱۶۸	۱/۱۶		۰/۲۱	۱/۱۵۹	۱/۰۲	
۰/۱۰	۰/۷۲۰	۰/۵۹	۲۶	۰/۰۹	۰/۷۲۲	۰/۶۰	۱۷	۰/۲۱	۱/۰۹۴	۰/۸۶	۸
۰/۱۶	۱/۰۶۴	۰/۹۵		۰/۲۴	۱/۰۹۱	۰/۸۸		۰/۵۵	۲/۳۸۰	۱/۶۶	
۰/۳۴	۱/۷۷۰	۱/۵۲		۰/۲۷	۱/۳۹۹	۱/۴۴		۰/۶۰	۲/۴۶۸	۲/۴۳	
				۰/۰۸	۰/۶۱۷	۰/۵۲	۱۸	۰/۱۰	۰/۸۱۹	۰/۶۸	۹
				۰/۱۸	۰/۴۳۲	۰/۲۵		۰/۱۹	۱/۱۶۴	۱/۰۰	
				۰/۲۷	۱/۲۲۳	۱/۳۸		۰/۲۶	۱/۵۷۷	۱/۳۵	

جدول ۳ جدول ضریب همبستگی مشخصات فیزیکی مختلف با یکدیگر و با شاخص فشردگی

C_c	e_0	w_n	gama	el	Is	IP	SL	PL	LL	
.593(**)	.582(**)	.555(**)	-.554(**)	.997(**)	.961(**)	.979(**)	-.271(*)	.835(**)	1	LL
.485(**)	.476(**)	.464(**)	-.480(**)	.821(**)	.770(**)	.706(**)	-.114	1	.835(**)	pL
-.172	-.138	-.162	.155	-.254(*)	-.527(**)	-.306(**)	1	-.114	-.271(*)	sL
.584(**)	.573(**)	.543(**)	-.537(**)	.980(**)	.953(**)	1	-.306(**)	.706(**)	.979(**)	IP
.573(**)	.553(**)	.537(**)	-.534(**)	.953(**)	1	.953(**)	-.527(**)	.770(**)	.961(**)	Is
.590(**)	.579(**)	.548(**)	-.548(**)	1	.953(**)	.980(**)	-.254(*)	.821(**)	.997(**)	e_1
-.906(**)	.963(**)	-.970(**)	1	-.548(**)	-.534(**)	-.537(**)	.155	.480(**)	-.554(**)	γ_d
.921(**)	.980(**)	1	-.970(**)	.548(**)	.537(**)	.543(**)	-.162	.464(**)	.555(**)	w_n
.914(**)	1	.980(**)	-.963(**)	.579(**)	.553(**)	.573(**)	-.138	.476(**)	.582(**)	e_0
1	.914(**)	.921(**)	-.906(**)	.590(**)	.573(**)	.584(**)	-.172	.485(**)	.593(**)	c_c

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است. * همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی دار است.

صورت که آنالیز رگرسیون خطی یک متغیره مختلفی بین شاخص فشردگی (C_c) و شرایط اولیه نمونه شامل رطوبت اولیه نمونه (w_n)، نسبت پوکی اولیه (e_0) و وزن واحد حجم خشک (γ_d) و حد روانی (LL) و همچنین روابط دو متغیره به صورت ترکیب یکی از متغیرهای مربوط به شرایط اولیه نمونه و حد روانی انجام گردید. مدل‌های بدست آمده از آنالیز رگرسیون انجام شده با استفاده از نرم افزار SPSS به ازای هر یک از مشخصه‌ها و هم‌چنین مشخصات آماری آن‌ها مطابق جدول (۴) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۴) ملاحظه می‌گردد که به‌جز رابطه‌ی شماره‌ی شماره E-4 که تنها متکی بر حد روانی است، سایر روابط در سطح کم‌تر از ۰/۰۱ معنی‌دارند و از ضریب تبیین بزرگ‌تری (r^2) نیز برخوردار هستند. البته از میان آن‌ها روابط شماره‌ی E-3 و E-7 دارای کم‌ترین مقدار شاخص مجذور خطای میانگین مربعات RMSE و بیش‌ترین مقدار ضریب تبیین هستند و در مقایسه با سایر مدل‌ها مقدار شاخص فشردگی را به‌تر تخمین می‌زنند. مجذور خطای

رطوبت اولیه، نسبت پوکی اولیه و وزن واحد حجم اولیه از جمله عوامل و مشخصات این گروه می‌باشند. در واقع هر سه مشخصه‌ی یادشده دارای ماهیت یکسانی هستند و نشانگر فضای خالی موجود میان ذرات خاک و در نتیجه پتانسیل تحکیم‌پذیری بیش‌تر می‌باشند. به‌طوری‌که اغلب روابط تجربی شده نیز بر اساس این مشخصات هستند. گروه دوم شامل مشخصات مربوط به خواص خمیری خاک‌ها نظیر حد روانی (LL)، دامنه‌ی خمیری (I_p)، شاخص انقباض (I_s) نسبت پوکی در حد روانی (e_L) و نسبت پوکی در حد خمیری (e_p)، می‌شود. از این رو است که برخی محققان سعی نمودند از روابط دو متغیره یا چندمتغیره که شامل گروه‌های مختلف تأثیرگذار باشند، استفاده نمایند. در این پژوهش سعی گردید در بررسی‌ها و تحلیل‌های صورت‌گرفته از هر دو گروه عوامل استفاده گردد. بدین منظور از مشخصه حد روانی به عنوان نماینده عوامل ترکیبی و از مشخصه‌های رطوبت، نسبت پوکی و وزن واحد حجم خشک به عنوان نمایندگان عوامل محیطی استفاده گردیده است. بدین

معیارهای آماری بسیار شبیه هم می‌باشند و از دقت قابل قبولی هم برخوردار هستند. به‌منظور انتخاب یکی از روابط فوق به‌عنوان رابطه‌ی برتر (از نظر دقت و سادگی) تحلیل دیگری نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مستقلی که در بسط روابط فوق نقش نداشته‌اند صورت گرفت. بدین منظور با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در مرجع [7] مقادیر شاخص فشردگی بر اساس روابط ارائه‌شده در جدول (۴) محاسبه و با نتایج آزمایشگاهی آن‌ها مقایسه گردیدند. بر اساس نتایج حاصل از این بررسی‌ها مشخص گردید که رابطه‌ی پیشنهادی E-3 که یک رابطه‌ی تک‌متغیری و بر اساس وزن واحد حجم خشک است، دارای کم‌ترین مقدار RMSE می‌باشد. این مدل تجربی که با در نظر گرفتن دقت دو رقم اعشار به‌شرح رابطه‌ی شماره‌ی (۳) معرفی می‌گردد، هم به لحاظ سادگی و هم به‌خاطر دقت بیشتر سبت به سایر روابط ارائه‌شده در جدول (۴)، به‌عنوان رابطه‌ی برتر انتخاب گردید.

$$C_c = -0.46\gamma_d + 0.88 \quad (۳)$$

به روش مشابهی رابطه‌ی خطی یک متغیره‌ی نیز برای تعیین عرض از مبدأ منحنی فشردگی (خط فشردگی) به شرح معادله‌ی (۳) تعیین گردید.

$$e_1 = -1.78\gamma_d + 3.70 \quad (۴)$$

میانگین مربعات (Root Mean Square Error) شاخصی است که مقدار نزدیکی مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهد. این شاخص مطابق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{Cest} - C_{Cdet})^2} \quad (۲)$$

که در رابطه مذکور C_{Cdet} شاخص فشردگی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، C_{Cest} شاخص فشردگی تخمین زده شده و n تعداد نمونه‌های آماری است.

به روشنی می‌توان نتیجه گرفت که روابط مبتنی بر شرایط فیزیکی اولیه نظیر نسبت پوکی، دانسیته خشک و رطوبت که همگی به‌نوعی بیانگر فاصله‌ی ذرات خاک از یکدیگر و نهایتاً پتانسیل نشست هستند، در تخمین مقدار شاخص فشردگی از کارایی خوبی برخوردار هستند. هم‌چنین روابطی که تنها مبتنی بر جنس و خواص ذرات ریزدانه (نظیر حدود اتربرگ) و بدون توجه به تخلخل اولیه آن‌ها می‌باشد (رابطه‌ی شماره‌ی E-4) از نظر آماری معنی‌دار نیستند و قادر به تخمین درست شاخص فشردگی نمی‌باشند. هم‌چنین از بین مشخصه‌های مؤثر در مقدار شاخص فشردگی، مشخصه‌های مربوط به تخلخل اولیه‌ی نمونه‌ها (رطوبت، نسبت پوکی، دانسیته خشک و...) از نظر

جدول ۴ مشخصات روابط استخراج شده در این پژوهش برای کل نمونه‌ها

مقدار RMSE	ضریب همبستگی (r^2)	رابطه‌ی پیشنهادی	مشخصه‌ی مورد استفاده	شماره‌ی مدل
۰/۰۵۳۴۱۷	۰/۸۳۶	$C_c = 0.286e_0 - 0.054$	e_0	E-1
۰/۰۵۱۷۲	۰/۸۴۸	$C_c = 0.008\omega_i - 0.044$	ω_i	E-2
۰/۰۵۵۷۳۱	۰/۸۲۰	$C_c = -0.461\gamma_d + 0.883$	γ_d	E-3
۰/۱۰۷۳۷۸	۰/۳۵۱	$C_c = 0.007LL - 0.043$	LL	E-4
۰/۰۵۲۴۷۱	۰/۸۴۱	$C_c = 0.269e_0 + 0.001LL - 0.078$	e_0 & LL	E-5
۰/۰۵۴۳۹	۰/۸۵۸	$C_c = 0.007\omega_i + 0.001LL - 0.077$	ω_i & LL	E-6
۰/۰۵۶۹۴۸	۰/۸۳۲	$C_c = -0.424\gamma_d + 0.001LL + 0.773$	γ_d & LL	E-7

ارزیابی کارایی روش‌های تجربی موجود و

صحت رابطه‌ی جدید ارائه‌شده

با توجه به این‌که اغلب روابط تجربی پیشنهادشده در مراجع برای تعیین شاخص فشردگی است، لذا در این قسمت رابطه‌ی شماره‌ی (۳) که برای تعیین شاخص فشردگی است، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

برای ارزیابی صحت رابطه‌ی پیشنهادشده در این تحقیق و هم‌چنین مقایسه‌ی آن با روابط سایر محققان، از داده‌های ارائه‌شده در مرجع (پارک و کوموتو، ۲۰۰۴) مطابق جدول (۵) استفاده گردید. بدین منظور ضریب فشردگی‌های مورد استفاده در مرجع یادشده، براساس روش پیشنهادی این تحقیق و هم‌چنین چند مورد از روش‌های موجود در این خصوص برآورد شدند و با مقادیر آزمایشگاهی آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفتند. روابط تجربی مورد استفاده برای انجام این مقایسه در جدول (۶) ارائه شده است.

مقادیر شاخص فشردگی برآوردشده براساس روش‌های تجربی مختلف و مقادیر شاخص فشردگی محاسبه‌شده براساس نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های ارائه شده توسط پارک و کوموتو [11] در جدول شماره (۷) ارائه شده است. شکل شماره‌ی (۵-۳) مقادیر شاخص فشردگی تعیین شده (از آزمایش) و تخمین شده را به ترتیب براساس روش‌های تجربی یک‌متغیره مبتنی بر نسبت پوکی و رطوبت اولیه و هم‌چنین روابط دو متغیره را به صورت ترسیم‌ی نشان می‌دهد. خط ۱:۱ ارائه‌ی شده در این شکل‌ها خط فرضی و مکان هندسی نقطای است که مقادیر محاسبه شده و تخمین شده‌ی برابر هستند. لذا وضعیت نقاط نسبت به این خط مقدار دقت روش را نشان می‌دهد. به طوری که هر چه نقاط تخمین زده شده به این خط نزدیک‌تر باشند از دقت بیش تری برخوردار خواهند بود.

بر خلاف شیب خط فشردگی یعنی C_c که مستقل از بعد تنش مؤثر است، مقدار عرض از مبدأ (e_1) خط فشردگی که از نظر فیزیکی برابر نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر معادل یک است، بستگی به واحد مورد استفاده برای تنش مؤثر دارد. رابطه‌ی شماره‌ی (۴) برای حالتی که واحد تنش کیلو پاسکال است بسط داده شده است. بدین ترتیب معادله‌ی عمومی منحنی فشردگی و یا رفتار فشردگی خاک‌های رسی با قرار دادن روابط (۴) و (۳) در معادله‌ی شماره‌ی (۱) به شرح زیر تعیین گردید:

$$e = [-1.78\gamma_d + 3.7] - [-0.461\gamma_d + 0.883] \log p \quad (5)$$

در رابطه‌ی اخیر γ_d وزن واحد حجم خشک اولیه‌ی نمونه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و مقدار تنش بر حسب کیلو پاسکال می‌باشد. رابطه‌ی (۵) بدان معنی است که با تعیین وزن واحد حجم خشک اولیه‌ی نمونه‌ی خاک، می‌توان منحنی بیانگر پتانسیل فشردگی خاک موسوم به منحنی فشردگی را برآورد نمود. هم‌چنین شاخص فشردگی خاک (C_c) با استفاده از رابطه‌ی (۳) قابل تعیین است. رابطه‌ی شماره‌ی (۳) در مقایسه با روابط مشابه موجود جدول (۶) علاوه بر سادگی و دقت بیش‌تر، از یک ویژگی دیگری نیز برخوردار است. تعیین کمیت مورد استفاده در رابطه‌ی مذکور (وزن واحد حجم خشک) برخلاف سایر کمیت‌های فیزیکی نظیر حد روانی (LL)، شاخص انقباض (I_s)، چگالی ذرت جامد خاک (G_s)، نسبت پوکی (e) و ... نسبتاً ساده بوده و آزاد از خطاهای اندازه‌گیری است. اصولاً تعیین دانسیته خشک برای یک نمونه خاک به‌راحتی و با تعیین وزن، حجم و رطوبت نمونه قابل انجام است. البته دانسیته خشک علی‌رغم سادگی تعیین آن به‌طور غیرمستقیم بیانگر سایر ویژگی‌های خاک نیز می‌باشد. به عبارتی دیگر با لحاظ نمودن مقدار دانسیته خشک در تعیین شاخص فشردگی در حقیقت سایر ویژگی‌ها نیز به‌طور ضمنی در آن لحاظ می‌گردند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به مجموعه مباحث مطرح شده هم‌چنین نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان موارد و نکات زیر را جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نمود: نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان داد که منحنی تغییرات نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر در مقیاس نیمه لگاریتمی برای خاک‌های رسی نرم تحکیم‌نیافته و یا عادی تحکیم یافته همواره خطی است و تنها ضرایب این خط تابعی از مشخصات خمیری و تخلخل اولیه نمونه می‌باشند. این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیقات قبلی نیز مطابقت دارد.

هرچه رطوبت و یا نسبت پوکی اولیه نمونه آزمایشی بیش‌تر باشد، شاخص فشردگی (C_c) و مقدار نسبت پوکی به‌ازای تنش مؤثر واحد (e_0) نیز افزایش می‌یابند. هم‌چنین خاصیت خمیری خاک در مقدار این ضرایب مؤثر است به‌طوری‌که با افزایش حد روانی خاک، مقادیر این ضرایب نیز افزایش می‌یابند.

البته این نوع مقایسه، به‌صورت کیفی می‌باشد و برای مقایسه‌ی کمی و دقیق روش‌ها لازم است از شاخص‌های آماری مناسبی استفاده گردد. بدین منظور و با توجه به ماهیت مسأله از شاخص مجذور خطای میانگین مربعات (RMSE) استفاده گردید. لذا در این پژوهش به‌منظور تعیین روش برتر مقادیر شاخص RMSE به‌ازای هر یک از روش‌ها با استفاده از رابطه‌ی شماره‌ی (۵) محاسبه گردید که نتایج به‌دست آمده در سطر آخر جدول (۷) ارائه شده است.

با توجه به مقادیر RMSE محاسبه شده به‌ازای هر یک از روش‌های مورد مقایسه (سطر آخر جدول (۷))، ملاحظه می‌گردد روش پیشنهادی این تحقیق دارای کم‌ترین مقدار شاخص مذکور (۰/۰۶۰۱) می‌باشد و در مقایسه با سایر روش‌ها از قابلیت پیش‌بینی و کارایی بیش‌تری برخوردار است. هم‌چنین روش‌های آوزو، هوف و برلند به‌ترتیب در رده‌های بعدی از این منظر و بر اساس شاخص ذکر شده می‌باشند.

جدول ۵ مشخصات نمونه‌های مورد استفاده برای صحت‌سنجی [11]

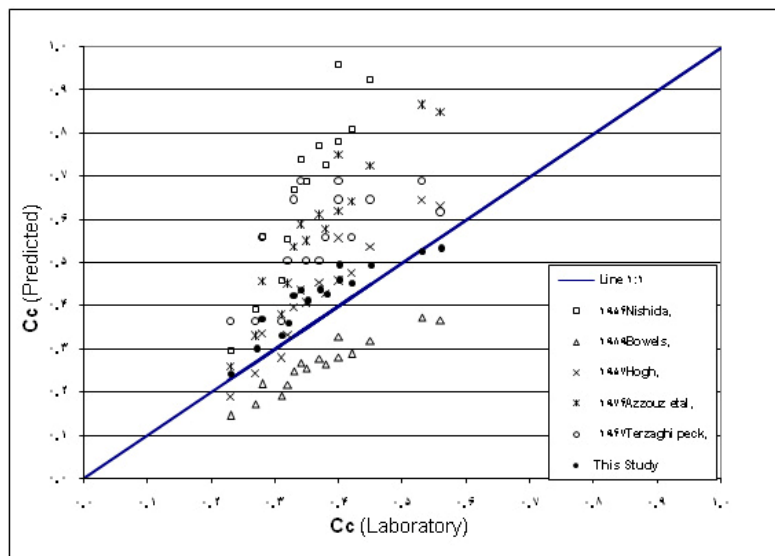
C_c	n_0	e_0	ω_0	ρ_s	I_p	ω_L	نوع خاک
۰/۳۲	۵۷/۹۳	۱/۳۷۷	۴۹/۹	۲/۶۷۶	۳۲/۳	۶۶	Kaolinite
۰/۳۵	۶۱/۹۲	۱/۶۲۶	۵۸/۳	۲/۶۷۶	۳۲/۳	۶۶	
۰/۳۷	۶۳/۹۸	۱/۷۷۶	۶۶/۱	۲/۶۷۶	۳۲/۳	۶۶	
۰/۲۳	۴۷/۲۶	۰/۸۹۶	۳۱/۵	۲/۶۱۸	۳۲/۸	۵۰/۴	Karatsu clay
۰/۲۷	۵۱/۸۱	۱/۰۷۵	۴۰/۷	۲/۶۱۸	۳۲/۸	۵۰/۴	
۰/۳۱	۵۴/۵۵	۱/۲	۴۵/۴	۲/۶۱۸	۳۲/۸	۵۰/۴	
۰/۲۸	۵۸/۱۲	۱/۳۸۸	۵۳/۱	۲/۶۳۸	۳۴/۸	۷۲/۱	M1-a
۰/۳۸	۶۲/۸۸	۱/۶۹۴	۶۰/۸	۲/۶۳۸	۳۴/۸	۷۲/۱	
۰/۴۲	۶۴/۹۲	۱/۸۵۱	۶۷/۷	۲/۶۳۸	۳۴/۸	۷۲/۱	
۰/۳۳	۶۱/۳۹	۱/۵۹	۵۶/۲	۲/۵۵۶	۳۹/۷	۸۱/۷	M2-b
۰/۴	۶۴/۲۳	۱/۷۹۶	۶۵/۸	۲/۵۵۶	۳۹/۷	۸۱/۷	
۰/۴۵	۶۷/۳۱	۲/۰۵۹	۷۸/۴	۲/۵۵۶	۳۹/۷	۸۱/۷	
۰/۳۴	۶۳/۲۵	۱/۷۲۱	۶۱/۲	۲/۶۱۶	۴۲/۳	۸۶/۶	M3-c
۰/۴	۶۷/۹۸	۲/۱۲۳	۷۶/۹	۲/۶۱۶	۴۲/۳	۸۶/۶	
۰/۵۳	۷۰/۷۲	۲/۴۱۵	۸۹/۲	۲/۶۱۶	۴۲/۳	۸۶/۶	
۰/۵۶	۷۰/۳۳	۲/۳۷	۹۳/۳	۲/۵۴۳	۴۷/۵	۷۸/۶	Ariake clay (Kubota)

جدول ۶ روابط تجربی مورد استفاده برای تخمین ضریب فشردگی خاک‌های رسی (نقل از Ozer et al, 2008)

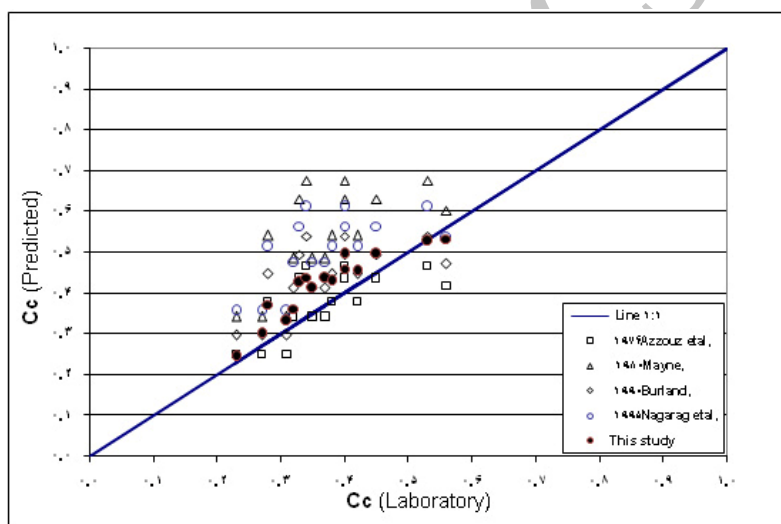
مرجع	رابطه
Azzouz et al. (1976)	$C_c = 0.40 (e_o - 0.25)$
Hough (1957)	$C_c = 0.30 (e_o - 0.27)$
Bowles, 1989	$C_c = 0.15e_o + 0.0107$
Nishida (1956)	$C_c = 0.54 (e_o - 0.35)$
Azzouz et al. (1976)	$C_c = 0.006 (w_L - 9)$
Mayne (1980)	$C_c = (w_L - 13)/109$
Terzaghi and Peck (1967)	$C_c = 0.009 (w_L - 10)$
Burland, 1990	$C_c = 0.256e_L - 0.04$
Nagaraj et al, 1995	$C_c = 0.27e_L$
Azzouz et al. 2 (1976)	$C_c = 0.37 (e_o + 0.003w_L - 0.34)$
Al-Khafaji and Andersland (1992)	$C_c = -0.156 + 0.41e_o + 0.00058w$
Koppula (1981)	$C_c = 0.009w_n + 0.005w_L$
Park & Koumoto, 2004	$C_c = 0.302(e_o - e_p) + 0.064$

جدول ۷ مقادیر شاخص فشردگی برآورد شده بر اساس روش‌های تجربی مختلف و نتایج آزمایشگاهی [11]

شاخص فشردگی C_c	روابط یک متغیره (نسبت پوکی)					روابط یک متغیره (رطوبت اولیه)					روابط دو متغیره			رابطه تجربی پیشنهادی این
	Nishida, 1956	Bowles, 1989	Hogh, 1957	Azzouz et al, 1976	Terzaghi & peck, 1967	Azzouz et al, 1976	Mayne, 1980	Burland 1990	Nagarag et al 1995	Azzouz et al, 1976	Al-Khafaji 1992	Park 2004	Koppula, 1981	
۰/۳۲	۰/۵۵	۰/۲۲	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۳۴	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۲۱	۰/۷۸	۰/۳۳
۰/۳۵	۰/۶۹	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۳۴	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۵۷	۰/۵۳	۰/۲۸	۰/۸۵	۰/۳۸
۰/۳۷	۰/۷۷	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۶۱	۰/۵۰	۰/۳۴	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۶۴	۰/۵۹	۰/۳۳	۰/۹۲	۰/۴۱
۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۵۴	۰/۲۱
۰/۲۷	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۰	۰/۲۵	۰/۶۲	۰/۲۷
۰/۳۱	۰/۴۶	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۳۵	۰/۲۹	۰/۶۶	۰/۳۰
۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۴۶	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۸۴	۰/۳۴
۰/۳۸	۰/۷۳	۰/۲۶	۰/۴۳	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۶۰	۰/۵۶	۰/۲۸	۰/۹۱	۰/۴۰
۰/۴۲	۰/۸۱	۰/۲۹	۰/۴۷	۰/۶۴	۰/۵۶	۰/۳۸	۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۵۱	۰/۶۷	۰/۶۳	۰/۳۳	۰/۹۷	۰/۴۲
۰/۳۳	۰/۶۷	۰/۲۵	۰/۴۰	۰/۵۴	۰/۶۵	۰/۴۴	۰/۶۳	۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۳	۰/۲۲	۰/۹۱	۰/۴۰
۰/۴۰	۰/۷۸	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۴۴	۰/۶۳	۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۲۸	۱/۰۰	۰/۴۳
۰/۴۵	۰/۹۲	۰/۳۲	۰/۵۴	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۴۴	۰/۶۳	۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۷۵	۰/۷۱	۰/۳۶	۱/۱۱	۰/۴۷
۰/۳۴	۰/۷۴	۰/۲۷	۰/۴۴	۰/۵۹	۰/۶۹	۰/۴۷	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۸	۰/۲۳	۰/۹۸	۰/۴۱
۰/۴۰	۰/۹۶	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۷۵	۰/۶۹	۰/۴۷	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۷۸	۰/۷۴	۰/۳۶	۱/۱۳	۰/۴۶
۰/۵۳	۱/۱۲	۰/۳۷	۰/۶۴	۰/۸۷	۰/۶۹	۰/۴۷	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۶۱	۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۴۴	۱/۲۴	۰/۵۰
۰/۵۶	۱/۰۹	۰/۳۷	۰/۶۳	۰/۸۵	۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۶۰	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۵۴	۱/۲۳	۰/۵۰
RSME	۰/۳۷۹۲	۰/۱۱۲۹	۰/۰۷۴۳	۰/۲۲۱۸	۰/۲۰۴۱	۰/۰۶۸۳	۰/۱۸۹۷	۰/۰۹۹۴	۰/۱۵۳۹	۰/۲۴۷۰	۰/۲۱۱۷	۰/۰۸۰۶	۰/۵۶۱۱	۰/۰۶۰۱



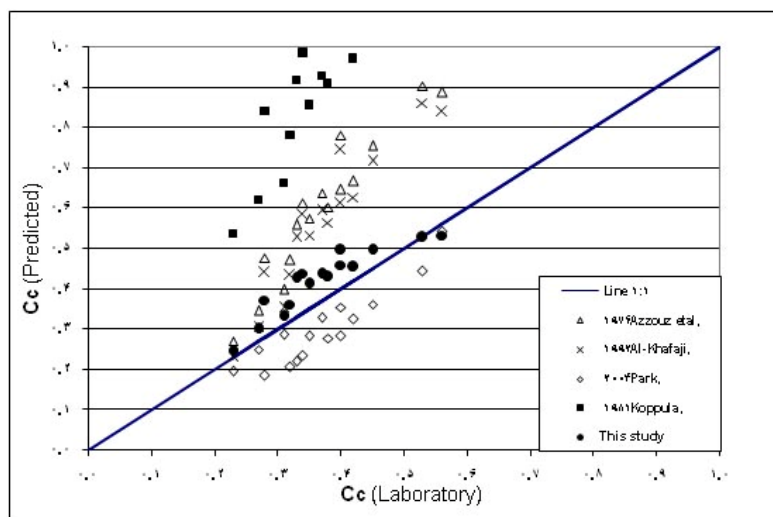
شکل ۳ مقایسه‌ی دقت روابط یک‌متغیره بر اساس نسبت پوکی اولیه در برآورد شاخص فشردگی



شکل ۴ مقایسه‌ی دقت روابط یک‌متغیره بر اساس رطوبت اولیه در برآورد شاخص فشردگی

نشست هستند، در تخمین مقدار شاخص فشردگی از کارایی بیش‌تری برخوردار هستند. هم‌چنین روابطی که تنها مبتنی بر جنس و خواص ذرات ریزدانه (نظیر حدود اتربرگ) و بدون توجه به تخلخل اولیه‌ی آن‌ها می‌باشند، از نظر آماری معنی‌دار نیستند و قادر به تخمین درست شاخص فشردگی نمی‌باشند.

مقدار همبستگی شاخص فشردگی با مشخصه‌های مرتبط با ساختمان اولیه نمونه‌ها به‌مراتب بیش‌تر از مقدار همبستگی آن با مشخصات مرتبط با جنس ذرات نظیر خواص خمیری خاک است. به‌عبارت دیگر روابط مبتنی بر شرایط ساختمان اولیه نظیر نسبت پوکی، دانسیته خشک و رطوبت که همگی به‌نوعی بیانگر فاصله‌ی ذرات خاک از یکدیگر و نهایتاً پتانسیل



شکل ۵ مقایسه‌ی دقت روابط دومتغیره در برآورد شاخص فشردگی

آماري و با استفاده از داده‌های ارائه‌شده در مراجع مشخص گردید که روش پیشنهادی این تحقیق برای تعیین شاخص فشردگی از دقت و کارایی بیشتری برخوردار است. هم‌چنین روش‌های پیشنهادی آوزو، هوف و برلند از این منظر در رده‌ی بعدی قرار دارند. پیشنهاد می‌گردد تحقیق مشابهی بر نمونه‌های دست‌نخورده و طبیعی انجام گردد.

در پژوهش‌های آتی اثر تنش پیش‌تحکیمی در مقدار شاخص فشردگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

با استفاده از تحلیل رگرسیونی صورت گرفته بر نتایج و داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، یک رابطه‌ی یک‌متغیره بر اساس وزن واحد حجم خشک برای برآورد شاخص فشردگی به شرح زیر پیشنهاد گردید.

$$C_c = -0.46\gamma_d + 0.88$$

هم‌چنین رابطه‌ی یک‌متغیره‌ی خطی دیگری نیز برای برآورد خط فشردگی (منحنی فشردگی) با استفاده از وزن واحد حجم خشک پیشنهاد گردید. براساس ارزیابی‌های صورت گرفته با شاخص‌های

مراجع

1. Lambe, T.W. and Whitman, R.V., "Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York, (1969).
2. Burland, J. B., "On the compressibility and shear strength of natural soils", *Geotechnique*, 40(3), pp.329-378,(1990).
3. Tsuchida, T. A., "new concept of e-Logp relationship for clays", *Proce, 9th Asian regional Conference on soil mechanics and foundation Engineering*, Bangkok, and Vol (1), pp. 87-90, (1991).
4. Sridharan, A. and Nagaraj HB., "Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index properties", *Can Geotech J.*, 37(3), pp. 712-722, (2000).
5. Sridharan, A and prakash, K., "Limiting Compression Curves", *Geotechnical Testing Journal.*,

- 24(3), pp. 330-333, (2001).
6. Bo, M.W. and Sin, W.K. and Chao, V. and Ing, T.H., "Compression test of ultra-soft soil using hydraulic consolidation cell", *Geotechnical Testing Journal.*, 26(3), pp. 1-10, (2003).
 7. Abbasi, N. and Rahimi, H. and Javadi, A. and Fakher, A., "Finite difference approach for consolidation with variable compressibility and permeability", *Journal of Computers and Geotechnics.*, 34(1), pp. 41-52, (2007).
 8. Lekha, K.R., and Krishnaswamy, N.R. and Basak, P., "Consolidation of clays for variable permeability and compressibility", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, 129(11), pp. 1001-1009, (2003).
 9. Yoon. G.L. and Kim, B.T. and Jeon, S.S., "Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis", *Can Geotech J.*, 41(6), pp. 1213-1221, (2004).
 10. Cerato B. and Alan L., "Determining intrinsic compressibility of fine grained soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, 130 (8), pp. 872-877, (2004).
 11. Park, J. H. and koumoto, T., "New compression index equation", *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*, 130 (2), pp. 223-226, (2004).
 12. Nath, A. and DeDalal., "The role of plasticity index in predicting compression behaviour of clays", *Journal of Geotechnical Engineering.*, EJGE, Ppr0466, (2004).
 13. Rao, k. and Reddy, P. and Rani, Ch., "Appropriate Parameters for prediction of compression index", *Electronical Journal of Geotechnical Engineering.*, EJGE, Ppr0628, (2006).
 14. Ozer, M. and Nihat, I. and Mehmet, O., "Statistical and neural network assessment of the compression index of clay-bearing soils", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* The official journal of the IAEG., 10.1007/s10064-008-0168-8, (2008).
 15. Azzouz, A. and Krizek, S. and Corotis, R.B., "Regression analysis on soil compressibility", *Soils Foundation.*, 16(2), pp. 19-29, (1976).
 16. Anon, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.08, Soil and Rock, D420-D5779, (2000).