بررسي ارتباط بين خصوصيات ذاتي تحكيم‌پذيري خاک‌هاي ريزدانه بازسازي شده و طبيعي منطقه جنوب تهران

اسماعيل افلاكي[i] ؛ رضا رحيم نژاد[ii]

چكيده

در اين مقاله خصوصيات مقاومتي و تحكيم‌پذيري رس‌هاي بازسازي شده به عنوان چهارچوب اصلي و مرجعي براي تفسير خصوصيات مشابه نهشته‌هاي رس طبيعي مورد استفاده قرار مي‌گيرند. ويژگي‌هاي رس‌هاي بازسازي شده وقتي با نام ويژگي‌هاي "ذاتي" بيان مي‌شوند كه براي خاک لاينفک و به حالات طبيعي خاک نيز وابسته نباشند. پارامتري كه شاخص تخلخل ناميده مي‌شود، به برقراري ارتباط بين خصوصيات ذاتي خاک‌هاي رسي گوناگون كمک مي‌كند. مسئله اصلي به‌دست آوردن آن دسته از پارامترهايي است كه بر اساس خواص تحكيم‌پذيري خاک بنا شده‌اند. شايد خواص ذاتي رس‌ها در حالت طبيعي با خواص آنها در حالت بازسازي شده متفاوت باشد و اين بخاطر تاثير بافت ميكروسكپي و ماكروسكپي خاک است كه در اثر دست خوردگي بافت طبيعي به وجود مي‌آيد.

در اين تحقيق نمونه‌ها با رطوبتي معادل ۱۵۰ درصد رطوبت حد رواني بازسازي شده‌اند. مقدار آب اضافه شده به نمونه‌ها، به نوع رس و گستردگي لايه مضاعف كاني رس بستگي دارد.

ترسيم نتايج در چهارچوب ارائه شده توسط برلند و قرارگرفتن خط فشار رسوبي (SCL)، زير خط فشار ذاتي (ICL) بيانگر شدت سيلاب‌هاي جاري شده از رشته كوه البرز است كه در هنگام تشكيل رسوب، نهشته‌اي غيرحساس را در منطقه تهران و به‌ويژه در جنوب تهران از خود برجاي گذاشته‌اند.

كلمات كليدي:

رس، نمونه بازسازي شده، خصوصيات ذاتي، شاخص فشردگي، آماده سازي نمونه

Study the Relationship between Intrinsic Compression Characteristics of Reconstituted and Intact Fine Grained Soils for South of Tehran Region

ABSTRACT

The compressibility characteristics of reconstituted clays are used as a basic frame for interpreting the corresponding characteristics of natural sedimentary clays. Intrinsic properties are especially used for reconstituted soil which, are independent of natural state. Void index is a parameter which relates the reconstituted parameters of different clay soils. Burland 1990 suggested that the natural properties of clay soil may be different from that of reconstituted ones due to the influence of soil microscopic and macroscopic texture (fabric and bonding).

In this research, clay specimens from Tehran region were prepared by water to 1.5 times the liquid limit and then reconstituted. The amount of additional water depends upon the clay content and the development of adsorbed water (diffuse double layer).

Plotting the results in Burland's framework, show the SCL lies well below the ICL. This is related to the rates and modes of deposition of alluvium when, a freshet (high water) from wide valleys of Alborz

---

[i] استاديار؛ دانشكده مهندسي عمران و محيط زيست؛ دانشگاه صنعتي اميركبير eaflaki@aut.ac.ir Email

[ii] دانشجوي كارشناسي ارشد؛ دانشكده مهندسي عمران و محيط زيست؛ دانشگاه صنعتي اميركبير Email ahimnejad.reza@gmail.com

Mountain spread out the flood plain providing deposits of low to insensitive clay soil. In this study the compressibility parameters were correlated as an aid to site investigation interpretation.

KEYWORDS:

Clay, Reconstituted Sample, Intrinsic Properties, Compression Index

۱- مقدمه

به‌عنوان بخشي از مرحله تحقيقات صحرايي، نمونه‌هاي بدست آمده از اعماق مختلف براي طبقه‌بندي خاک و تعيين پارامترهاي طراحي، درآزمايشگاه مورد استفاده قرار مي‌گيرند. اين نمونه‌ها تحت تأثير عواملي مانند هندسه نمونه‌گير، سرعت نفوذ آن، نوع خاک و غيره، مقداري دست‌خوردگي پيدا مي‌کنند که منجر به پراکندگي چشمگير اطلاعات و به‌دست آمدن نتايج نابرابر مي‌گردد. پس بدليل وجود کاستي و ضعف اطلاعات ژئوتکنيکي به‌دست آمده، استفاده از نمونه‌هاي بازسازي‌شده به‌منظور دستيابي به مقادير قابل قبول پارامترهاي طراحي، مورد توجه قرارگرفته است.

تئوري رفتار خاک براي نمونه‌هاي بازسازي شده توسط برلند در سال ۱۹۹۰ با عنوان "خصوصيات ذاتي" ارائه شد که مي‌تواند رابطه‌اي قابل قبول بين خصوصيات ژئوتکنيکي رس‌هاي بازسازي شده و رس‌هاي طبيعي برقرار سازد.

پارامتر جديدي که شاخص تخلخل ناميده مي‌شود، به برقراري ارتباط خصوصيات ذاتي خاک‌هاي رسي متنوع کمک مي‌کند. بحث مربوط به تحکيم‌پذيري خاک‌هاي رسي از ديرباز توسط محققين مورد توجه‌قرار گرفته‌است. ترزاقي در سال ۱۹۲۵ آزمايشاتي روي خاک‌هاي طبيعي و بازسازي شده انجام داد. وي پارامترهاي e^*_{100} و C^*_c را ثابت‌هاي تحکيم‌پذيري ناميد. اين نتايج به‌دست آمده تنها براى مقايسه استفاده مى‌شد. پس از او، اسکمپتون (۱۹٤٤)، لئونارد و راميا (۱۹۵۹) آزمايش‌هايي روي رس‌هاي بازسازي شده انجام دادند. از نتيجه آزمايش‌هاي اين دو محقق جدولي به‌دست آمده که خصوصيات ژئوتکنيکي رس‌هاي مناطق مختلف جهان به همراه کار خودشان را در آن جمع آوري کرده‌اند. ناکاس و همکاران (۱۹۸۸) نيز جدولي مشابه براي رس‌هاي دريايي در ژاپن ارائه کرده است.

هدف اين تحقيق، مشخص نمودن رفتار خاک بازسازي شده و مقايسه آن با خاک‌هاي دست‌نخورده منطقه جنوب تهران و نتايج جمع‌آوري شده از ديگر محققين است. در اين طرح، اساس کار به‌دست آوردن نمودارهاي تخلخل- فشار براي خاک‌هاي بازسازي شده و دست‌نخورده در آزمايشگاه و مقايسه آنها با يکديگر مي‌باشد. استخراج روشي مناسب براي توصيف تاريخچه تنش خاک مورد آزمايش و رفتار خاک در طول آزمايش که به تاريخچه تنش آن باز مي‌گردد، از اهداف ديگر اين تحقيق است. روابطي که در اين مقاله ارائه مي‌گردد، مربوط به‌خاک منطقه جنوب تهران بوده و به‌همين منظور و براي داشتن روابطي دقيق لازم است تا مطالعه‌اي جامع روي رسوبات و زمين شناسي خاک منطقه جنوب تهران انجام گيرد.

براي رسيدن به‌اهداف مورد نظر، نمونه‌هاي خاک از نقاط مختلف منطقه جنوب تهران جمع‌آوري شده است. تعدادي از نمونه‌ها دست‌خورده و بافت آنها گسيخته گرديد. با اضافه کردن آب به‌نمونه‌هاي دست‌خورده، درصد رطوبت به مقدار ۱/۵ برابر حد رواني افزايش يافت. اين نمونه‌ها به‌نام نمونه‌هاي بازسازي شده شناخته مي‌شوند. پس از آماده‌سازي نمونه و قرارگيري در قالب دستگاه تحکيم يک بعدي، عمل تحکيم طبق بارگذاري استاندارد انجام گرفت.

رفتار نمونه‌هاي بازسازي شده در برابر فشار به‌عنوان چهارچوبي براي توصيف خصوصيات ذاتي در نظر گرفته شده است. از آنجا که اين خصوصيات براي خاک‌ها لاينفک و مستقل از حالت طبيعي آنهاست، چهارچوبي ارزشمند براي به‌دست آوردن پارامترهاي طبيعي متناظر حاصل مي‌شود [۷]. رسم خصوصيات ذاتي در نمودار شاخص تخلخل در مقابل لگاريتم فشار وارده، $I_v - \log \sigma'_v$، معرف خط واحدي بنام خط فشار ذاتي (ICL: Intrinsic Compression Line)، است. منحني نشست نمونه‌هاي دست‌نخورده، $\mathrm{e} - \log \sigma'_v$، نيز رسم شده است. خصوصيات طبيعي با رسم منحني‌هاي نشست در مختصات $\mathrm{I_v} - \log \sigma'_v$، معرف خط فشار رسوبي (SCL: Sedimentation compression Line)، است. مي‌توان گفت که خط فشار رسوبي به‌دست آمده از اين روش، بيانگر تحکيم‌پذيري درجاي رسوبات طبيعي است اما، تأثير بافت خاک و ذرات ريز و درشت آن بايد مورد مطالعه قرارگيرد.

پارامترهاي طراحي براساس روابط تجربي است که از همبستگي بين خصوصيات ژئوتکنيکي نمونه‌هاي بازسازي شده و نمونه‌هاي طبيعي همان لايه رسوبي بدست آمده‌اند و در ادبيات فني طيف گسترده‌اي از اين همبستگي‌ها وجود دارد.

۲- زمين شناسي تهران

رسوبات تهران نتيجه حمل و رسوب گذاري رودخانه و

آبراهه‌هاي مختلف دامنه جنوبي البرز بوده که در زمان‌هاي مختلف وبا شرايط متفاوت تشکيل شده‌اند و از نظر فرم دانه‌ها، ابعاد و چگونگی گسترش به سازندهاي (A)، (B)، (C) و (D) تقسيم شده‌اند [۳],[٤].

سازند (A) قديمي‌ترين رسوبات ضخيم و چين‌خورده پاي رشته‌کوه البرز را تشکيل مي‌دهد و سازند (D)، جديدترين رسوبات محسوب شده که رسوبات کنوني بستر رودخانه‌ها را تشکيل مي‌دهد. بين اين دو سازند، سري (B) و (C) مشهور به سازندهاي کهريزک و تهران، قرارگرفته‌اند.با توجه به‌اين توضيحات، مي‌توان يک نتيجه‌گيري اجمالي ارائه داد:

رسوبات (A) در کوهپايه‌هاي البرز به‌صورت يک نوار موازي با امتداد البرز (شرقي-غربي)، مي‌سازد و به‌صورت تپه‌ماهورهاي مرتفعي ظاهر شده‌اند.

رسوبات (B)، از شمال به‌جنوب ضخامتش زيادتر شده و روي رسوبات (A) قرارگرفته‌اند. رسوبات (B)، تا جنوبي‌ترين نقطه تهران و تا نزديکي‌هاي کهريزک ديده مي‌شود (رخنمون‌هاي رسي کوره‌هاي آجرپزي).

تهران مرکزي روي رسوبات جوان و ريزدانه (D) بنا و رسوبات درشت‌دانه و منفصل (C) بستر کنوني رودخانه‌ها را مي‌سازد. در جنوب تهران، رسوبات (D) به‌صورت ريزدانه نمايان هستند.

خاک مناسب براي انجام آزمايش تحکيم خاک ريزدانه است، که آبرفت‌هاي (D) بهترين گزينه براي تهيه نمونه‌هاي مورد نظر است. مناطق انتخاب شده براي نمونه‌گيري با دايره توپر در نقشه شماره ۱ (ضميمه) نشان داده شده‌اند.

۳- روش آزمايش تحکيم يک بعدي

براي انجام اين آزمايش از استانداردASTM D2435-80 , استفاده شده است. دستگاه تحکيم به‌يک LVDT مجهز شده که تغيير مکان‌هاي اندازه‌گيري شده به‌وسيله آن، توسط کامپيوتر ثبت شده است.

در اين آزمايش گام بارگذاري با نسبت افزايش بار ۱ در هر ٢٤ ساعت دنبال شده تا اينکه به‌فشار نهايي ۱۶۰۰ کيلوپاسکال رسيد. در ابتداي آزمايش فشار سرباري معادل ۳ کيلوپاسکال و حلقه تحکيم به قطر ۵ سانتيمتر و ارتفاع ۲ سانتيمتر براي همه نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

٤- خصوصيات ذاتي

٤-۱- خط فشار ذاتي

نتايج به‌دست آمده از آزمايش تحکيم روي نمونه‌هاي بازسازي شده در شکل(۱-الف) نشان داده شده است. اين منحني‌ها نشان‌دهنده منحني‌هاي ذاتي فشار خاک‌هاي مختلف است که تمامي آنها با محتوي آب $۱/۵\,\omega_L$ بازسازي شده‌اند. کميت‌هاي $e^{*}_{۱۰۰}$ و $e^{*}_{۱۰۰۰}$، نسبت‌هاي تخلخل ذاتي متناظر با kPa ۱۰۰= σ'_v و kPa ۱۰۰۰= σ'_v هستند. شاخص فشردگي ذاتي، C^{*}_{c} از شيب قسمت خطي نمودار تحکيم بدست مي‌آيد:

$$C_c^{*} = \frac{e^{*}_{100} - e^{*}_{1000}}{\log 1000 - \log 100} = \frac{e^{*}_{100} - e^{*}_{1000}}{\log(1000/100)} = e^{*}_{100} - e^{*}_{1000} \qquad (۱)$$

منحني‌هاي تحکيم را که در شکل(۱-الف) رسم شده‌اند، مي‌توان با مقادير ثابت $e^{*}_{۱۰۰}$ و $e^{*}_{۱۰۰۰}$ نرمال‌سازي نمود. اين نمودارها از نظر شکل و تقعر شبيه به‌هم هستند ولي، در جهت محور e باهم تفاوت دارند [۷]. براي اين مهم، پارامتري با عنوان شاخص تخلخل، I_v، معرفي مي‌گردد و با استفاده از اين پارامتر نرمال‌سازي انجام مي‌شود:

$$I_v = \frac{e - e^{*}_{100}}{e^{*}_{100} - e^{*}_{1000}} = \frac{e - e^{*}_{100}}{C_c^{*}} \qquad (۲)$$

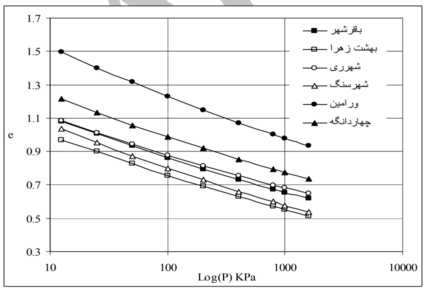
اين منحني‌ها نرمال سازي شده و در مختصات $I_v - Log(\sigma'_v)$ ترسيم شده‌اند. همانطورکه ديده مي‌شود، اين منحني‌ها تا اندازه‌ای بر روي يکديگر قرار مي‌گيرند، شکل(۱-ب). از بين اين منحني‌ها توسط نرم افزار MINITAB خطي برازش داده شده و معادله اين خط به‌صورت رابطه(۳) است:

$$I_v = 2/393 - 1/225x - 0/0199x^2 + 0/0172x^3 \qquad (۳)$$

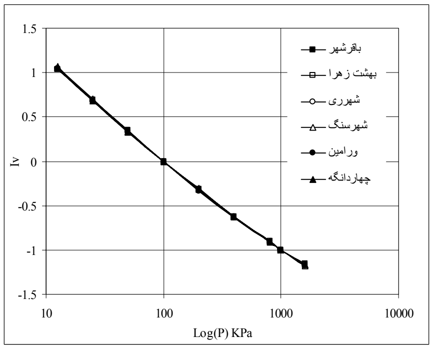
که در آن $x = \log \sigma'_v$ مي‌باشد.

در شکل(۲) اين خط با خط به‌دست آمده توسط برلند (رابطه٤) مقايسه شده است. ديده مي‌شود اين دوخط بر روي يکديگر قرار دارند و تفاوتي که بين اين خطوط وجود دارد ناشي از خطاهاي آزمايشگاهي است.

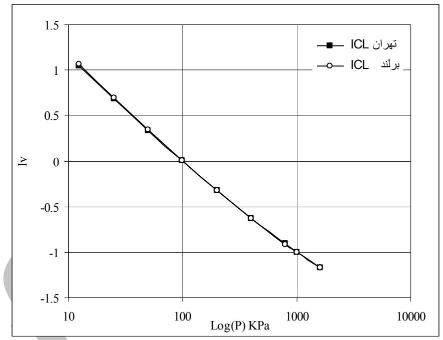
$$I_v = 2/45 - 1/285x + 0/015x^3 \qquad (٤)$$



شکل(۱-الف) منحني تحکيم نمونه‌هاي بازسازي شده



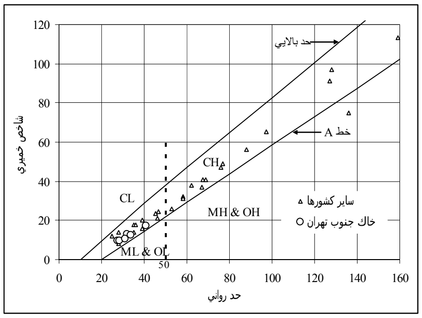
شکل(۱-ب) نرمال سازي نمودارهاي تحکيم



شکل(۲) مقايسه ICL به‌دست آمده در اين تحقيق و ICL به‌دست آمده توسط برلند

۴-۲- ارتباط بين ثابت‌هاي تراکم‌پذيري ذاتي و حدود اتربرگ

اگر رابطه(۲) بر حسب e مرتب گردد، رابطه ديگري به‌دست خواهد آمد که با استفاده از آن مي‌توان نمودار تحکيم هر خاکي را رسم نمود. I_v از رابطه(۳) به‌دست مي‌آيد اما دو پارامترديگر يعني C_c^* و e_{100}^* مجهول هستند که بايستي از برقراري ارتباط بين خصوصيات تحکيم‌پذيري به‌دست آيند. البته اين سه پارامتر را به‌صورت مستقيم از آزمايش مي‌توان به‌دست آورد که اين روش دقيق‌تر است و در عين حال به‌زمان بيشتري نياز دارد.طبق گفته برلند، چون خط ICL به‌دست آمده منحصر به‌فرد است پس براي به‌دست آوردن پارامترهاي تحکيم‌پذيري مي‌توان از خصوصيات خاک‌هاي ديگر نقاط دنيا نيز بهره‌گرفت و اين پارامترها را تخمين زد. خط به‌دست آمده در مورد خاک منطقه جنوب تهران با خطي که برلند به‌دست آورده همخواني دارد پس از پارامترهاي ژئوتکنيکي که برلند از مقاله‌هاي گوناگون جمع‌آوري کرده است [۸]، در اين تحقيق استفاده مي‌گردد. اين پارامترها به‌همراه خصوصيات ژئوتکنيکي خاک منطقه جنوب تهران در جدول(۱ ضميمه) و نمودار خميري آنها در شکل(۳) نشان داده شده‌است. همانگونه که ديده مي‌شود نقاط دايره توخالي مربوط به‌خاک منطقه جنوب تهران بوده و بالاي خط A و در محدوده خاک‌هاي CL قرار مي‌گيرند.



شکل(۳) خواص خميري رس‌هاي معرفي شده در جدول(۱)

نتايج به‌دست آمده از خاک منطقه جنوب تهران، با يکديگر و بار ديگر براي اينکه فراواني داده‌ها نيز بيشتر باشد و نتيجه بهتري به‌دست آيد، با نتايج ساير کشورها مقايسه شده‌اند. در شکل(۴-الف) ارتباط بين ثابت تحکيم‌پذيري e^*_{100} با نشان تخلخل در حد رواني، e_L نشان داده شده است. از شکل(۴-الف)، منحني درجه يک با تقريب خوب و ضريب همبستگي $R^2 = 0/98$ و از شکل(۴-ب)، منحني درجه ۳ با ضريب همبستگي $R^2 = 0/93$ به‌دست مي‌آيد:

$$e_{100} = 1/188\, e_L \quad 0/1012 \qquad (5)$$

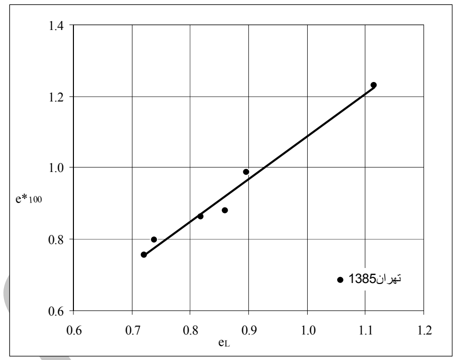
$$e_{100} = 0/5065 + 0/2076 e_L + 0/0863 e_L^2 \quad 0/00368 e_L^3 \qquad (6)$$

در شکل(۴-الف) برخلاف اينکه رابطه(۵) از برازش تعداد کمي نقاط حاصل شده است ولي از ضريب همبستگي بالاتري برخوردار است. در شکل(۴-ب) ديده مي‌شود که جهت‌گيري نقاط مربوط به‌خاک منطقه جنوب تهران (نقاط تو خالي) با ساير نقاط (نقاط توپر) متفاوت است و خطي که از مجموعه کل نقاط برازش شده است پاسخ خوبي به‌جهت‌گيري نقاط مربوط به‌خاک جنوب تهران نمي‌دهد. چنين استنباط مي‌شود که خاك‌هاي استفاده شده از ساير منابع از نظر طبقه‌بندي در رده CL-CH بوده، در نمودار پلاستيسيته شکل(۳) بالاي خط A قرار مي‌گيرند. حد رواني آنها بسيار وسيع مي‌باشد $25 < \omega_L < 160$ و $0/6 < e_L < 4/5$ و رابطه(۶) براي آنها صادق مي‌باشد. درحاليکه خاک منطقه جنوب تهران فقط از رده CL بوده که حد رواني آن محدودتر بين $25 < \omega_L < 60$ و $0/6 < e_L < 1/5$ مي‌باشد و در نتيجه رابطه(۵) در مورد آنها صادق بوده و همبستگي بهتري بين e^*_{100} و e_L مربوط به‌خاک جنوب تهران برقرار مي‌سازد.

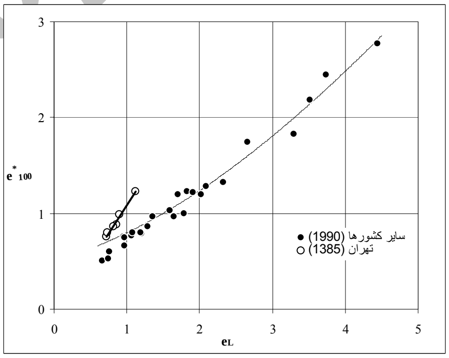
اما در مورد ارتباط تحکيم‌پذيري نمونه بازسازي شده، C_c^*، با e_L، با توجه به‌شکل(۵-الف)، همبستگي براي خاک جنوب

تهران و دیگر بار براي خاک منطقه جنوب تهران و خاک سایر منابع ایجاد مي‌گردد. در شکل(۵-الف)، به‌علت پراکندگي نقاط، معادله‌اي براي نمودار $C_c^* - e_L$ نمي‌توان به‌دست آورد. براي رفع این مشکل، مي‌توان نتایج به‌دست آمده از سایر نقاط دنیا را در این نمودار وارد کرده تا در نتیجه با گستردگي بیشتر حد رواني (بین ۲۵ تا ۱۶۰) همبستگي بهتري به‌دست‌آید. در شکل(۵-ب)، براي C_c^* و e_L^* معادله درجه۱ به‌صورت رابطه(۷) ارائه شده است:

$$C_c^* = 0/2406\, e_L \quad 0/0125 \tag{۷}$$

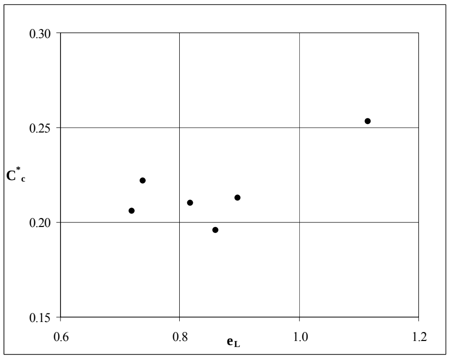


(الف) خاک تهران

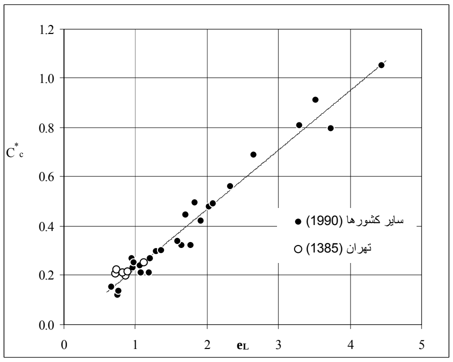


(ب) خاک سایر کشورها

شکل(۴) ارتباط بین ثابت e_{100}^* با e_L،



(الف) خاک تهران



(ب) خاک تهران به همرا خاک سایر کشورها

شکل(۵) ارتباط بین ثابت C_c^* با e_L،

۴-۳- مقایسه شاخص تحکیم‌پذیري طبیعي و ذاتي (C_c^*, C_c)

براي مقایسه خواص ذاتي و طبیعي، از ۲۷ طرح در جنوب تهران از کارگاه‌هاي وزارت راه و ترابري و متروي تهران که مجري بخش ژئوتکنیکي این طرح‌ها بوده‌اند، اطلاعات مورد نیاز جمع آوري شده است. با استفاده از رابطه(۷)، C_c^* مربوط به‌هر نمونه طبیعي محاسبه شده و C_c مربوط به‌همان نمونه‌ها نیز از روي نمودار $e - Log(\sigma'_v)$ به‌دست آمده است. با توجه به‌نتایج بدست آمده، نسبت تحکیم‌پذیري $\frac{C_c^*}{C_c}$ بین ۰/۵ تا ۳/۵ متغیر مي‌باشد.

تلاش شده است تا همبستگي بین این دو پارامتر مورد مطالعه قرارگیرد. به‌همین منظور، شاخص تحکیم پذیري ذاتي C_c^*، در مقابل شاخص تحکیم‌پذیري طبیعي C_c در نمودار شکل(۶) نشان داده‌شده است. نقاط پراکنده در شکل(۶) معرف C_c^*ها و C_cهاي متناظر هستند که از میان آنها خط برازش داده شده توسط رابطه(۸) مشخص شده است.

$$C_c = 0/219\, C_c^* + 0/092 \tag{۸}$$

به‌دلیل اینکه پراکندگي نقاط زیاد است، ازاینرو نقاط به‌دو قسمت تقسیم شده‌اند. پایین خط برازش ناحیه(۱) و بالاي آن، ناحیه(۲) نامیده شده است. از بین نقاط این نواحي نیز بطورجداگانه خط‌هاي۱ و۲ برازش داده شده‌اند که به‌ترتیب با روابط(۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند.

$$C_c = 0/219\, C_c + 0/054 \tag{۹}$$

$$C_c = 0/219\, C_c^* + 0/13 \tag{۱۰}$$

حال براي دانستن اینکه کدام یک از خطوط شکل(۶) براي چه خاکي استفاده مي‌شود، بهتر است ملاک انتخاب حدرواني نمونه‌ها در نظرگرفته شود. رابطه(۷) ارتباط بین ثابت‌هاي e_L و C_c^* را نشان مي‌دهد که براي خاک‌هاي رس سایر کشورها

نیز درست است. از این رابطه استفاده شده و به‌کمک رابطه(۸)، رابطه(۱۱) حاصل مي‌گردد.

$$C_c = 0/053\, e_L + 0/09 \qquad (۱۱)$$

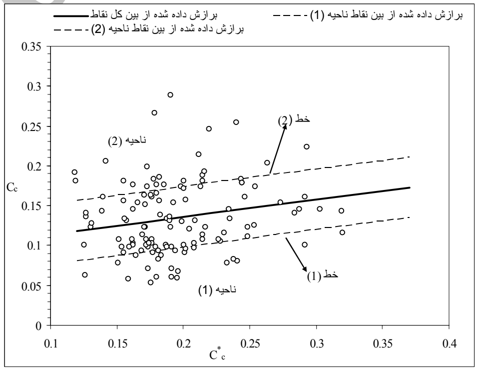
در روابط قبل و طبق رابطه $e_L = \frac{G_s \times w_L \%}{۱۰۰}$ رطوبـت خـاك در حد رواني، اشباع در نظر گرفته شده است. لذا با جایگـذاري e_L دررابطه(۱۱)، رابطه(۱۲) به‌دست مي‌آید:

$$C_c = 0/053 G_s \times \frac{\omega_L \%}{100} + 0/09 \qquad (۱۲)$$

در رابطـه(۱۲) وزن مخـصوص خـاك‌هـاي ریـز دانـه، G_s در محدوده ۲/۶۵ تا ۲/۷۵ تغییـر مـي‌کنـد. اگـر بطـور میـانگین G_s برابر ۲/۶۵ در نظر گرفته شود، رابطه(۱۲) به‌صورت رابطه(۱۳) ارائه مي‌گردد.

$$C_c = 0/14\, w_L + 0/09 \qquad (۱۳)$$

رابطه(۱۳) متناظر با رابطه(۸) یا خط توپر در شکل(٦) مي‌باشـد. از رابطه(۱۳) و با داشتن درصد رطوبـت حـدرواني ω_L مقـدار شاخص تحکیم‌پذیري C_c بـه‌دسـت مـي‌آیـد. بـراي اسـتفاده از خطوط ۱ و ۲ (شکل٦) و یافتن روابط متناظر بـا روابـط ۹ و ۱۰ به‌ترتیـب روابـط ۱۴ و ۱۵ حاصـل مـي‌شـوند. رابطـه ۱۴ بـراي خاك‌هاي بـا پلاستیـسیته کـم و رابطـه ۱۵ بـراي خـاك‌هـاي بـا پلاستیسیته بالا بکارمي‌روند.



شکل(٦): ارتباط بین شاخص‌هاي تراکم‌پذیري ذاتي و طبیعي

$$C_c = 0/14\, w_L + 0/513 \qquad (۱٤)$$

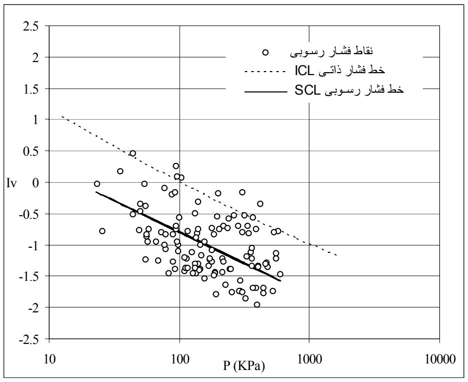
$$C_c = 0/14\, w_L + 0/127 \qquad (۱۵)$$

۵- تحکیم‌پذیري رسوبات طبیعي

با استفاده از رابطه به‌دست آمده براي شاخص تخلخل، $I_v^* = (e - e^*_{100})/C_c^*$ به‌عنوان پارامتري براي نرمال سازي، این امکان وجود دارد تا بتوان منحني‌هاي تحکیم رسوبي به‌دست آمده از ۲۷ نقطه منطقه جنوب تهران را با خط ICL متناظر مقایسه کرد. براي این کار، ثابت‌هاي تحکیم‌پذیري ذاتي هر خاک با استفاده از آزمایش تحکیم روي نمونه بازسازي شده همان خاک یا با استفاده از روابط(۵) و (۷) به‌دست مي‌آیند. تخلخل اولیه e_0 و عمق نمونه مشخص است. رابطه $I_v = (e - e^*_{100})/C_c^*$ براي رس‌هاي طبیعي به‌صورت $I_{v0} = (e_0 - e^*_{100})/C_c^*$ ظاهر مي‌شود.

نمودار $I_v - Log(\sigma'_{v0})$ براي این رسوبات طبیعي توسط نقاط دایره توخالي نشان داده شده است، شکل(۷). از بین این نقاط خطي برازش داده شده که معرف خط فشار رسوبي SCL است. این خط منحصر به‌فرد نیست و براي هر منطقه متفاوت است بنابراین، رابطه‌اي مانند خط فشار ذاتي براي آن نمي‌توان به‌دست آورد.

همان‌طوریکه در شکل(۷) دیده مي‌شود، نقاط به‌دست آمده بیشتر زیر خط ICL قرارمي‌گیرند. این به‌دلیل داشتن تخلخل کم و تحکیم‌پذیري پائین این رسوبات است. خط‌هاي ICL و SCL بین فشار ۱۰۰ و ۱۰۰۰ کیلوپاسکال باهم موازیند. به‌عبارت دیگر در یك نسبت e مشخص روي SCL چون خاك تنش بیشتري را نسبت به‌خط ICL تحمل کرده بنابراین خاك طبیعي تحکیم‌پذیري کمتري دارد و اتصال بین دانه‌ها در بافت خاك طبیعي نسبت به‌خاك بازسازي شده در آزمایشگاه قویتر است[۲۰]. مي‌توان این‌طور استدلال نمود که رسوبات منطقه جنوب تهران سیلابي بوده و دریک دوره کوتاه توسط سیلاب‌هاي فصلي و با سرعت زیاد حمل و در دشت تهران رسوب کرده‌اند [۵]. درهنگام فرایند رسوبي، این رسوبات فرصت کافي براي آرایش یافتن نداشته و به‌صورت تصادفي در کنار یکدیگر قرارگرفته‌اند. علاوه براین با توجه به‌تخلخل بیشتر نمونه‌هاي بازسازي شده نسبت به‌نمونه‌هاي طبیعي، تشکیل پیوند نهشته‌هاي جنوب تهران بدون حضور آب قابل توجه (۱/۵ برابر حدرواني) صورت گرفته است. بدیهي است که اگر این مقدار آب در موقع تشکیل رسوب وجود مي‌داشت، دانه‌هاي خاک از یکدیگر فاصله گرفته و پس از خشک شدن، خاکي با تخلخل بالاتر به‌وجود مي‌آمد. درنتیجه به‌علت شدت این سیلاب‌ها بافتي متراکم در این رسوبات به‌وجود آمده است. با استفاده از روش تصویر میکروسکوپ الکترونیک (SEM Scanning Electron Microscope)، خاک ریزدانه منطقه جنوب تهران با بافت بسیار متراکم معرفي شده است [۵].

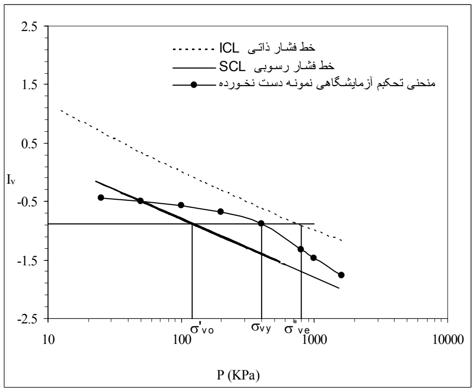


شكل(۷) ترسيم خط فشار رسوبي

بطور كلي چهارچوب اصلي برلند براي تفسير خصوصيات ژئوتكنيكي خاك‌هاي ريزدانه و ارزيابي بافت اين نوع خاك‌ها بكار مي‌رود. به‌عنوان مثال در شكل(۸) منحني آزمايشگاهي نمونه دست‌نخورده به‌همراه خط ICL و خط SCL نشان داده شده‌است. در اين شكل محل σ'_{vy} تنش تسليم و σ^*_{ve} تنشي است روي ICL معادل σ_{vc} (فشار پيش تحكيمي) روي خاك طبيعي در يك نسبت تخلخل e مشخص و σ'_{vo} تنش درجا مي‌باشد. در اين شكل ديده مي‌شود كه منحني تحكيم خاك طبيعي جنوب تهران خط SCL را قبل از رسيدن به‌تنش تسليم قطع كرده است و پس از نقطه تسليم با آن متقارب شده است. يعني خاك به‌تحكيم عادي خود رسيده است. بنابراين نسبت $\sigma'_{vy}/\sigma^*_{ve}$ پارامتر اندازه‌گيري افزايش مقاومت خاك در برابر تحكيم‌پذيري است كه بر اثر اتصال دانه‌ها در بافت ميكروسكپي خاك به‌وجود مي‌آيد. در مورد خاك جنوب تهران اين نسبت كمتر از يك مي‌باشد و بيانگر مطلب ياد شده مي‌باشد. از طرف ديگر اگر تنش تسليم σ'_{vy} خاك بالاتر از خط ICL قرارگيرد، گفته مي‌شود كه خاك از حساسيت بالاتري برخوردار است و از نظر حساسيت عنوان درجه ۱ به‌آن گفته مي‌شود. به‌همين منوال اگر تنش تسليم بين ICL و SCL قرار گيرد حساسيت درجه ۲ و اگر تنش تسليم نمونه زير SCL باشد، حساسيت خاك درجه ۳ خواهد بود. درجه حساسيت با نسبت $\sigma'_{vy}/\sigma'_{vo}$ بيان مي‌شود. نسبت $\sigma'_{vy}/\sigma'_{vo} > ۸$ بيانگر حساسيت بالا و شكننده بودن بافت خاك است. در شكل(۸)، تنش تسليم براي اين نمونه بين ICL و SCL قرار مي‌گيرد پس، از نظر حساسيت نسبي درجه ۲ به‌آن گفته مي‌شود.

مطالب گفته شده را مي‌توان به‌صورت رابط(۵) نيز نشان داد.

$$\begin{cases} \sigma'_{vy}/\sigma^*_{v\circ} \geq ۸ & \rightarrow \quad Sensitivit\ \ y\,Grade\ \ ۱ \\ ۱ \leq \sigma'_{vy}/\sigma^*_{v\circ} < ۸ & \rightarrow \quad Sensitivit\ \ y\,Grade\ \ ۲ \\ \sigma'_{vy}/\sigma^*_{v\circ} < ۱ & \rightarrow \quad Sensitivit\ \ y\,Grade\ \ ۳ \end{cases} \qquad (۱۵)$$



شكل (۸): مقايسه منحني‌هاي تحكيم آزمايشگاهي با ICL و SCL

۶- نتيجه‌گيري

نمونه‌هاي بازسازي شده در اين تحقيق با محتوي آب $۱/۵\omega_L$ بازسازي شده‌اند. مقدار آبي كه بليد براى بازسازي به‌رس اضافه شود، به‌مقدار رس خالص موجود در نمونه‌ها بستگي دارد. كمترين مقدار آن ω_L و بيشترين مقدار آن $۲\omega_L$ است.

رابطه خط فشار ذاتي به‌دست آمده براي خاك‌هاي منطقه جنوب تهران و رابطه‌اي كه توسط برلند ارائه شد، نزديك به‌هم و يكسان هستند و اين بر منحصر به‌فرد بودن ICL تأكيد دارد. همانطوريكه ديده مي‌شود اين دو خط برهم منطبق هستند، شكل(۲).

ثابت‌هاي تحكيم‌پذيري ذاتي خاك منطقه تهران براي حد رواني بين ۲۵ تا ۶۰ از رابطه(۷) محاسبه مي‌شود. با داشتن ثابت‌هاي تحكيم‌پذيري و شاخص تخلخل، منحني تحكيم نمونه‌هاي بازسازي شده خاك‌هاي رسي منطقه جنوب تهران ترسيم شده‌اند.

همان‌طوريكه ديده مي‌شود خط فشار رسوبي طبيعي SCL زير خط فشار رسوبي ذاتي ICL قرار مي‌گيرد. استنباط مي‌گردد كه به‌دليل تخلخل بالاتر نمونه‌ها بازسازي شده باشند. اين واقعيت نشان دهنده حساسيت پايين نهشته‌هاي آبرفتي منطقه جنوب تهران مي‌باشد. بالا يا پايين قرارگرفتن SCL نسبت به ICL بيانگر شرايط رسوب‌گذاري و نوع رسوبات مي‌باشد. براي تحليل اين مسئله منحني تحكيم آزمايشگاهي، انجام شده روي نمونه‌هاي طبيعي، در نمودار $I_v - Log(\sigma'_{v\circ})$ ترسيم و نسبت $\sigma'_{vy}/\sigma^*_{v\circ}$ محاسبه شده است. مقدار اين نسبت درجه افزايش مقاومت خاك در برابر فشردگي است كه درنتيجه با بافت طبيعي خاك رابطه مستقيم دارد. بنابراين مقدار عددي نسبت يادشده نشان دهنده حساسيت كم و وجود پيوندهاي محكم بين دانه‌اي در خاك مي‌باشد.

همانطوريکه ديده شد از لحاظ ساختماني و فيزيکي خاک ريزدانه تهران حساسيت بسيار کمي دارد که اين مهم خود نمايانگر تغيير شکل کم و در نتيجه تحکيم‌پذيري کم اين خاک تحت بار وارده مي‌باشد.

۷- مراجع

[۱] افلاکي، اسماعيل؛ (۱۳۷۴)، آزمايشگاه مکانيک خاک، انتشارات پرهام.

[۲] ابن جلال، ر ؛ شفاعي بجستان، م؛ (۱۳۷۰)، اصول نظري وعملي مکانيک خاک، انتشارات دانشگاه شهيد چمران اهواز.

[۳] اميني، م؛ (۱۳۶۸)، دانسته‌هاي مهندسي خاک تهران، مديريت بخش ژئوتکنيک متروي تهران.

[٤] اميني، م؛ ارژنگ روش، ب؛ يوسفي، ک؛ (۱۳۵۶)، گزارش مقدماتي مطالعات رسوبات آبرفتي اطراف تهران، وزارت صنايع و معادن، سازمان زمين شناسي کشور.

[۵] حيدري، م؛ (۱۳۸۰)، "بررسي ارتباط بين خصوصيات مکانيکي و ساختار خاکهاي ريزدانه جنوب تهران"، پايان نامه دکتري، دانشگاه تربيت مدرس تهران.

[٦] Aflaki, E. (1996), “Intrinsic Properties of Glacial Till: An Aid to Site Investigation Interpretation”, Ph.D Thesis, University of Newcastle upon Tyne.

[۷] Burland, J. B. (1990), “On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays”, J. Geotch. & Geoenvironmental Engrg. ASCE, Vol.40, No.3, pp.329-378.

[۸] Burland, J. B., Rampello, S. and Georgiannou, V. N. (1994), “A Laboratory Study of the Strength of Four Clays”, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.

[۹] Cerato, A.B. and Lutenegger, A.J. (2004), “Determining the Intrinsic Compressibility of Fine-Grained Soils”, J. Geotch. & Geoenvironmental Engrg. ASCE, Vol.130, No.8, pp.872-877.

[۱۰] Katagiri, M. (1995), “Effect of clay water content on the consolidation of a sediment layer”, Proc. Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, Department of Civil Engineering, Hiroshima, Japan, pp.261-266.

[۱۱] Leonards, G.A. and Ramaiah, B.K. (1959). "Time effects in consolidation of clays". ASTM Spec. Tech. Publ. 254, pp.116-130.

[۱۲] Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O., (1988), "Constitutive parameters estimated by plasticity index", Proceeding of the ASCE, J. of Geotechnical Engineering Division, Vol. 114, GT 7, pp.844-858.

[۱۳] Nash, D. F .T, Sills, G. C. and Davison, L. R. (1992), “One-Dimensional Consolidation Testing of Soft Clay From Bothkennar”, J. Geotch. & Geoenvironmental Engrg. ASCE, Vol.42, No.2, pp.241-256.

[۱۴] Skempton, A.W. (1970), “The Consolidation of Clays by Gravitational Compaction”, Geot Soc. London, Q.J., No.125, pp.373-412.

[۱۵] Skempton, A.W., (1944), "Notes on the compressibility of clays", Geol. Soc. London Q. J., Vol. 100, pp.119-136.

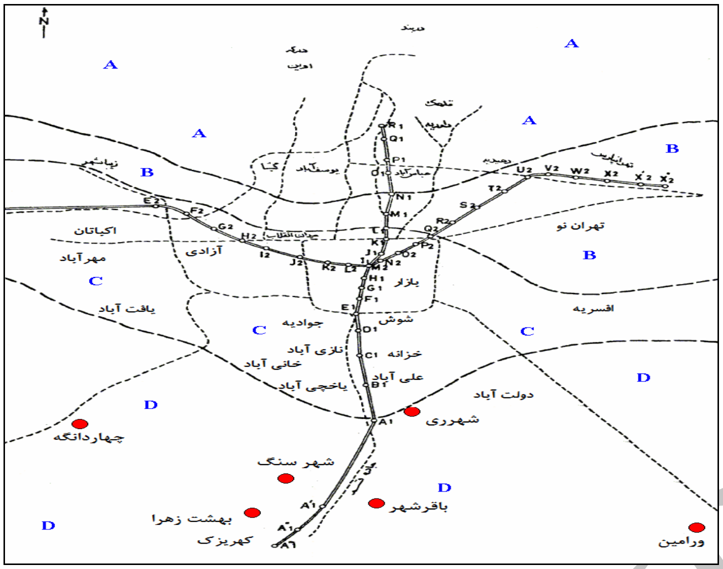
[۱۶] Terzagi, K. (1925). "Principals of Soil Mechanics", Engineering News-Record, Vol. 95,no.20.

[۱۷] Tsuchida, T. (1994), ‘‘A unified concept of e-Log P relationship of clays’’, Proc., 13th ICSMFE, pp.71–74.

[۱۸] Tsuchida, T. and Gomyo, M. (1995), “Unified model of e-Log(p) relationship with the consideration of the effect of void ratio”, Proc. Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, Department of Civil Engineering, Hiroshima, Japan, pp.379-384.

[۱۹] Veniale, F. (1985). “The role of microfabric in clay soil stability”, Miner. Petroger Acta, Vol.29-A, pp.101-119.

[۲۰] Wroth, C. P., and Wood, D. M. (1976), ‘‘The correlation of some basic properties of soils, and its implication in the assessment of poor quality data’’, Res. Rep. CUED/C-soils TR31, University of Cambridge.



نقشه شماره ۱(ضمیمه): حدود مرزبندي تقريبي نهشته‌هاي رسوبي منطقه تهران بر اساس تغييرات سازندهاي آبرفتي [۳]

جدول(۱ضمیمه) پارامترهاي آزمايشگاهي مربوط به‌خاک رس در چند کشور دنيا [۷]

خاک	w_L	w_P	G_s	e_L	e_{100}^*	C_c^*	مرجع
Lower Cromer Till	۲۵	۱۳	۲/۶۵	۰/۶۶۳	۰/۵۰۳	۰/۱۵۴	Gens (1982)
Boulder clay	۲۸	۱۴	۲/۶۹	۰/۷۵۳	۰/۵۲	۰/۱۲	Skempton (1944)
Silty clay	۲۸	۲۰	۲/۷۲	۰/۷۶۲	۰/۶۰۳	۰/۱۳۶	Ramiah (1959)
Magnus Clay	۳۵	۱۷/۲	۲/۷۳	۰/۹۵۶	۰/۷۶	۰/۲۷	Jardine (1985)
Grangemouth	۳۵	۲۱	۲/۷۸	۰/۹۷۳	۰/۶۵۹	۰/۲۲۹	Burland (1990)
Ton V	۳۶	۱۸	۲/۷۱	۰/۹۷۶	۰/۷۴	۰/۲۵	Skempton (1944)
Weald clay	۳۹	۱۹	۲/۷۳	۱/۰۶۵	۰/۷۷	۰/۲۴	Skempton (1944)
Boston blue clay	۳۹	۲۳	۲/۷۸	۱/۰۸۴	۰/۸	۰/۲۱	Skempton (1944)
Red soil	۴۵/۳	۲۲	۲/۶۶۷	۱/۲۰۸	۰/۷۸۵	۰/۲۷	Nagaraj et al. (1986)
River S. alluvium	۴۶	۲۵	۲/۵۹	۱/۱۹۱	۰/۸	۰/۲۱	Skempton (1944)
Wiener Tegel	۴۶/۷	۲۲	۲/۷۶	۱/۲۸۸	۰/۸۵۹	۰/۲۹۷	Hvorslev (1937)
Oxford clay	۵۳	۲۷	۲/۵۷	۱/۳۶۲	۰/۹۶	۰/۳	Skempton (1944)
Ton IV	۵۸	۲۶	۲/۸۵	۱/۶۵۳	۰/۹۷	۰/۳۲	Skempton (1944)
Residual clay	۵۸	۲۷	۲/۷۴	۱/۵۸۹	۱/۰۲۴	۰/۳۳۷	Ramiah (1959)
London clay	۶۲/۳	۲۴/۳	۲/۷۳	۱/۷۰۷	۱/۲	۰/۴۴۶	Jardine (1985)
Belfast estuarine clay	۶۷	۳۰	۲/۶۶	۱/۷۸۲	۱	۰/۳۲	Skempton (1944)
London clay	۶۷/۵	۲۶/۵	۲/۷۱	۱/۸۲۹	۱/۲۲۷	۰/۴۹۴	Som (1968)
Ganges delta clay	۶۹	۲۸	۲/۷۷	۱/۹۱۱	۱/۲۲	۰/۴۲	Skempton (1944)
Gosport clay	۷۶	۲۹	۲/۶۷	۲/۰۲۹	۱/۲	۰/۴۸	Skempton (1944)
London clay	۷۷	۲۸	۲/۷۱	۲/۰۸۷	۱/۲۸	۰/۴۹	Skempton (1944)
Brown London clay	۸۸	۳۲	۲/۶۵	۲/۳۳۲	۱/۳۲	۰/۵۶	Skempton (1944)
Black cotton clay	۹۷/۳	۳۲	۲/۷۳	۲/۶۵۶	۱/۷۴۴	۰/۶۹	Nagaraj et al. (1986)
Kleinbelt Ton	۱۲۷	۳۶	۲/۷۷	۳/۵۱۸	۲/۱۸	۰/۹۱	Hvorslev (1937)
Argile plastique	۱۲۸	۳۱	۲/۵۸	۳/۳۰۲	۱/۸۲	۰/۸۱	Skempton (1944)
Whangamarino clay	۱۳۶	۶۱	۲/۷۸	۳/۷۴	۲/۴۴	۰/۷۹۷	Newland & Allely (1956)
SAIL	۱۵۹/۳	۴۶	۲/۸۲۶	۴/۴۴۳	۲/۷۶۹	۱/۰۵	Nagaraj et al. (1986)
منطقه تهران							
ورامين	۴۱	۲۳/۵	۲/۷۲	۱/۱۲	۰/۲۵۳	۱/۲۳۱	رحيم‌نژاد، تحقق حاضر (۱۳۸۵)
شهرري	۳۲	۱۹/۲	۲/۶۹	۰/۸۶	۰/۱۹۶	۰/۸۸	رحيم‌نژاد، تحقق حاضر (۱۳۸۵)
بهشت زهرا	۲۷/۴	۱۷/۶	۲/۶۳	۰/۷۲	۰/۲۰۶	۰/۷۵۶	رحيم‌نژاد، تحقق حاضر (۱۳۸۵)
شهرسنگ	۲۸/۳	۱۸/۷	۲/۶۱	۰/۷۴	۰/۲۲۲	۰/۸	رحيم‌نژاد، تحقق حاضر (۱۳۸۵)
باقرشهر	۳۱	۲۰/۵	۲/۶۴	۰/۸۲	۰/۲۱۰	۰/۸۶۳	رحيم‌نژاد، تحقق حاضر (۱۳۸۵)
چهاردانگه	۳۳/۶	۲۱/۲	۲/۶۷	۰/۹	۰/۲۱۳	۰/۹۸۶	رحيم‌نژاد، تحقق حاضر (۱۳۸۵)