

تأثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران

سید شهاب‌الدین یثربی
استادیار
گروه عمران، دانشگاه تربیت مدرس
ابراهیم اصغری
استادیار
گروه زمین شناسی، دانشگاه تبریز

سید محسن حائری
استاد
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
علی ارومیه‌ای
دانشیار
گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

دامنه‌های پرشیب و ترانشه‌های قائم بلند و متعددی در آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران مشاهده می‌شود که به مدت طولانی پایدار می‌مانند. پایداری این خاک‌ها بیشتر به سیمانی شدن آنها نسبت داده می‌شود. آبرفت‌های مزبور عموماً ناهمگن است و این ناهمگنی نه تنها در دانه‌بندی و وزن مخصوص، بلکه در سیمانی شدن آنها نیز دیده می‌شود. با توجه به ناهمگنی این خاک‌ها و دشواری فوق‌العاده‌ی تهیه‌ی نمونه‌های دست‌نخورده، برای بررسی اثر سیمانی شدن طبیعی بر مقاومت برشی آنها از سیمانی شدن مصنوعی استفاده شده است. در این مطالعه، براساس دانه‌بندی و جنس سیمان آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران، خاک پایه‌ای با دانه بندی ماسه شن‌دار تعیین شده و با استفاده از آهک به عنوان ماده‌ی سیمانی کننده، نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر ساخته شدند. نمونه‌ها در پنج سری غیرسیمانی، سیمانی شده با ۱/۵، ۳، ۴/۵ درصد و بی‌ساختار شده تهیه شده و آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده بر روی آنها صورت گرفته است.

مطالعات نشان می‌دهد که سیمانی شدن، سبب افزایش مقاومت خاک می‌شود و این افزایش بیشتر از پیوندهای سیمانی پدید آمده است. همچنین در اثر سیمانی شدن رفتار خاک شکننده می‌شود و این شکنندگی با ازدیاد ماده‌ی سیمانی کننده افزایش و با ازدیاد فشار همه جانبه کاهش می‌یابد. منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌ها در طول بارگذاری نشان می‌دهد که در نمونه‌های سیمانی شده، مقاومت برشی بعد از مقاومت اوج شدیدی پدید می‌کند. به بیان دیگر خاک از خود رفتار نرم شونده نشان می‌دهد. در حالی که در نمونه‌های غیر سیمانی، در منحنی مذکور نقطه اوج مشاهده نمی‌شود و همواره تنش با اضافه شدن کرنش، سیر صعودی دارد و رفتار خاک همچنان سخت شونده باقی می‌ماند.

پوش گسیختگی نمونه‌های سیمانی شده، منحنی شکل است. در نمونه‌های آزمایش شده، تأثیر سیمانی شدن بر زاویه‌ی اصطکاک تابعی از فشار همه جانبه، مقدار سیمان و تعریف زاویه اصطکاک است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اثر سیمانی شدن بر زاویه‌ی اصطکاک اوج در فشارهای همه جانبه کم، افزایش یافته است. زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده در نمونه‌های سیمانی شده و نشده تقریباً برابر است.

کلمات کلیدی

آبرفت‌های تهران، آهک، مقاومت برشی، خاک درشت دانه، سیمانی شدن.

Effect of Cementation on the Shear Strength of Coarse Grained Alluvium of Tehran

S. M. Haeri
Professor
Department of Civil Engineering,

S. S. Yasrebi
Assistant Professor
Department of Civil Engineering,

Abstract

Earth slopes and high vertical cuts are frequently observed to be stable for long period in the coarse-grained soils of Tehran. Their stability is often attributed to cementation effects that produce improved shear strength parameters. These soils are heterogeneous not only in gradation and density but also in cementation. Due to this heterogeneity and the extreme difficulty in obtaining undisturbed samples, artificially cemented specimens using lime as the cementing agent are used to understand the effects of cementation on the shear strength parameters.

A base soil with 45% gravel, 49% sand and 6% fine material was used, based on gradation curves of the coarse-grained soils of Tehran. Specimens with 100mm diameter and 200mm height are prepared by mixing of the soil with 1.5, 3, and 4.5 percent by weight lime and after curing were tested using drained triaxial compression tests. Samples were also tested in uncemented and destructured conditions.

The results of the tests indicate that the cementation increases peak shear strength, suggesting an increase in cohesion. Cemented samples show a brittle failure mode at low confining pressure with a transition to a ductile failure mode at higher confining pressures. The stress-strain curves for cemented samples show a clear peak stress followed by a sudden drop in stress and strain softening. There is no clear peak in shear stress for uncemented and destructured samples. The failure envelope is curved for cemented samples. The influence of cementation on the friction angle of the tested samples is a function of confining pressure, and degree of cementation. The results show that the peak friction angle at low confining pressure increases with increase in cementation. The residual friction angle is almost equal for cemented, destructured and uncemented samples.

Key words

Cementation, Coarse-grained soil, Lime, Shear strength, Tehran alluvium.

مقدمه

سیمانی شدن خاک‌های درشت دانه، در اثر رسوب مواد شیمیایی، میان ذرات خاک پدید می‌آید. سیمان‌های طبیعی متداول شامل کربنات‌ها، سیلیکات‌ها، اکسیدهای آهن و ژپس است. خاک‌های درشت دانه‌ی سیمانی شده، در زمین فراوان یافت می‌شود و پایداری در شیب‌های تند، یکی از ویژگی‌های بارز آنهاست [۱].

سیمانی شدن آبرفت‌های درشت دانه تهران موجب افزایش مقاومت برشی و پایداری آنها در دامنه‌ها و ترانشه‌ها می‌شود و از نشست پذیری خاک در اثر بارگذاری می‌کاهد. افزایش پروژه‌های عمرانی بزرگ در تهران، همچون تونل‌های حمل و نقل، مترو، آب و فاضلاب، بزرگراه‌ها و ساختمان‌های بلند، لزوم شناخت دقیق ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های تهران را برای طراحی مناسب‌تر و استفاده‌ی بهینه از شرایط لایه‌های زمین و ایمن سازی عملیات ژئوتکنیکی مانند حفر تونل و گودبرداری را بیشتر نمایان ساخته است.

در یک تلاش برای شناخت تأثیر سیمانی شدن بر پارامترهای مقاومت برشی آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران، آزمایش‌های سه محوری تراکمی بر روی نمونه‌های سیمانی نشده و سیمانی شده، مصنوعی با مقادیر مختلف آهک به عنوان ماده‌ی سیمانی کننده اجرا شده است. در این مقاله ضمن مروری بر منابع علمی مربوط، مهم‌ترین ویژگی‌های آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران بیان شده است و سپس روش مطالعه‌ی موضوع و نتایج حاصل شرح داده می‌شود.

۱- مروری بر مطالعات موجود

از نظر مکانیکی، خاک‌های سیمانی شده و سنگ‌های ضعیف موادی هستند که در رده‌ی میانی مکانیک خاک کلاسیک و مکانیک سنگ قرار می‌گیرند. بنابر این یک مدل فیزیکی و ریاضی که قادر به ارائه‌ی یک چارچوب واحد و فراگیر برای همه این مواد باشد، وجود ندارد [۲].

در دهه‌های اخیر پژوهشگرانی در نقاط مختلف دنیا، مطالعاتی را بر روی خاک‌های سیمانی شده پی گرفتند که در این قسمت، خلاصه‌ی برخی نتایج به دست آمده بیان می‌شود.

مطالعات ساکسنا و لاستریکو [۳] بر رسوبات ماسه‌ای به طور طبیعی سیمانی شده، نشان می‌دهد که سیمانی شدن طبیعی نه تنها در مقیاس بزرگتر، نظیر توالی‌های رسوبی یک سازند، تغییر می‌کند، بلکه در مقیاس کوچکتر نیز یکنواخت نیست. غیریکنواختی مزبور، ناشی از نهشته شدن متفاوت مواد کلسیتی از آبهای زیرزمینی است. آنها با آزمایش بر نمونه‌های دست‌نخورده نتیجه گرفتند که در تغییر شکل‌های کم (کرنش کمتر از یک درصد) چسبندگی ناشی از مواد سیمانی، عامل اصلی مقاومت است، ولی در تغییر شکل‌های بیشتر اثر چسبندگی از بین می‌رود و مقاومت خاک اغلب از نوع اصطکاکی خواهد بود.

مطالعات کلاف و همکاران [۱] بر روی ماسه‌هایی با سیمان طبیعی و مصنوعی (سیمان پرتلند) نشان داده است که رفتار خاک سیمانی شده، از مقدار سیمان، وزن مخصوص و فشار همه جانبه متأثر است. آنها نتیجه گرفتند که در فشارهای همه جانبه کم، ماسه‌های سیمانی شده رفتار شکننده^۱ و در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا، رفتار خمیری^۲ نشان می‌دهند. همچنین تأثیر سیمانی شدن در افزایش چسبندگی خاک زیاد است ولی تأثیر آن بر زاویه‌ی اصطکاک خاک قابل توجه نیست.

نتایج مطالعات لد و اورتون [۴] بر روی ماسه‌های به طور مصنوعی سیمانی شده (با سیمان پرتلند) نشان می‌دهد که پوش گسیختگی خاک‌های درشت دانه‌ی سیمانی شده، به صورت منحنی است و در فشارهای همه جانبه کم، سیمانی شدن موجب افزایش زاویه‌ی اصطکاک خاک می‌شود.

مطالعات کوپ و اتکینسون [۵] بر روی ماسه‌های به طور مصنوعی سیمانی شده، با گچ نشان داده که رفتار خاک‌های سیمانی شده بعد از گسیختگی به صورت نرم شونده با کرنش^۳ درمی‌آید و مقدار زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده‌ی خاک‌های سیمانی شده، چند درجه کمتر از خاک‌های غیرسیمانی است.

هوانگ و ایری [۶] با اجرای آزمایش‌های سه محوری بر ماسه‌های سیمانی شده با گچ نشان دادند که با افزایش مقدار ماده‌ی سیمانی کننده، مقاومت حداکثر و سختی^۴ و اتساع^۵ طی گسیختگی افزایش می‌یابد و کرنش نظیر نقطه‌ی گسیختگی کاهش پیدا می‌کند.

در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر سیمانی شدن بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک پایه‌ای که نماینده‌ی آبرفت‌های درشت دانه تهران است، بررسی شده است.

۲- مشخصات آبرفت‌های درشت دانه و سیمانی شده‌ی تهران

آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران از فرسایش کوه‌های شمال تهران و رسوب‌گذاری به وسیله‌ی رودخانه‌ها و سیلاب‌ها پدید آمده‌اند. این آبرفت‌ها بر اساس خصوصیات زمین شناسی، به چهار سری A، B، C و D تقسیم می‌شوند. آبرفت‌های سری A با ضخامت کل بیش از هزار متر، بیشتر در قسمت‌های شمالی شهر گسترش دارند. این رسوبات اغلب از شن و ماسه‌ی قلمه سنگ‌دار با مقادیر متفاوتی از مواد ریز دانه تشکیل شده‌اند. آبرفت‌های درشت دانه سری B و C که جوانتر از آبرفت‌های سری A هستند در قسمت‌های مرکزی و در برخی نواحی شمالی شهر دیده می‌شوند. آبرفت‌های درشت دانه‌ی سری D نیز که دربرگیرنده رسوبات عهد حاضرند تنها در بستر رودخانه‌ها و سیلاب‌ها قابل مشاهده‌اند.

سیمانی شدن آبرفت‌های تهران پدیده‌ی ثانویه‌ای است که در اثر رسوب مواد کربناتی از آب‌های زیرزمینی به وجود آمده‌اند. براساس آنالیزهای شیمیایی و XRD، جنس بیشتر مواد سیمانی‌کننده، کربناتی و به ویژه کلسیتی است [۷]. عموماً در

آبرفت‌های سری A سیمان نسبتاً محکم و در آبرفت‌های سری‌های B و C سیمان ضعیف مشاهده می‌شود ولی در آبرفت‌های سری D سیمانی شدن قابل توجهی روی نداده است. البته ممکن است به طور موضعی در آبرفت‌های سری D سیمان ضعیف و در آبرفت‌های سری‌های B و C سیمان محکمی مشاهده شود. میزان سیمانی شدن این آبرفت‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که مهمترین آنها بافت اولیه، جنس مواد تشکیل دهنده رسوب و همچنین شرایط آب‌های زیر زمینی، فشار و هوازدگی بعد از مرحله رسوبگذاری هستند. سیمانی شدن در آبرفت‌های تهران مثل دانه بندی و وزن مخصوص آنها از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است و این تفاوت نه تنها از لایه‌ای به لایه‌ای دیگر قابل مشاهده است، بلکه در مقیاس‌های کوچکتر نظیر یک نمونه‌ی دستی نیز مشهود است.

آزمایش‌های اجرا شده بر نمونه‌های دست‌نخورده نشان می‌دهد که وزن مخصوص خشک آنها بین ۱۶/۵ تا ۲۰/۵ کیلو نیوتن بر متر مکعب در نوسان است و مقدار متوسط آن حدود ۱۸/۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب است [۸].

۳- روش مطالعه

هدف تحقیق حاضر، مطالعه‌ی تاثیر سیمانی شدن بر مقاومت برشی آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران است. با توجه به ناهمگنی این خاک‌ها و دشواری فوق‌العاده‌ی تهیه‌ی نمونه‌های دست‌نخورده، از نمونه‌های مصنوعی سیمانی شده برای این منظور استفاده شده است. در این مطالعه، ابتدا خاک پایه‌ای که نماینده‌ی آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران باشد، تعیین و سپس نمونه‌های غیرسیمانی و سیمانی شده، تهیه شده‌اند. آنگاه بر نمونه‌های تهیه شده، آزمایش‌های سه محوری اجرا و نتایج بررسی شده است. مراحل مطالعه در پی آمده است.

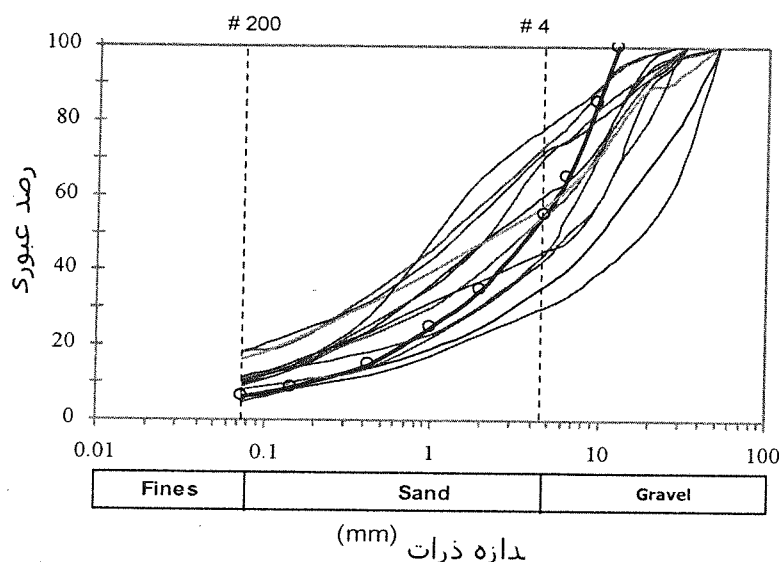
۳-۱- انتخاب خاک پایه و ماده‌ی سیمانی کننده

برداشت حدود ۲۰ نمونه خاک از نقاط مختلف شمال تهران و دانه‌بندی آنها نشان می‌دهد که طبقه‌بندی یونیفاید آنها معمولاً SW-SM, SW-SC, GM, GC, GP, GW-GM, GW-GC و SM هستند (شکل (۱)). گرچه مقدار مواد ریز دانه‌ی (سیلت و رس) آنها بین ۴ تا ۳۰ درصد اندازه‌گیری شده است ولی در بیشتر نقاط، مقدار آن در حدود ۱۰ درصد است. بر اساس منحنی دانه‌بندی و بافت آبرفت‌های درشت دانه شمال تهران و همچنین محدودیت اندازه‌ی ذرات در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۱۰۰ و به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر برای آزمایش سه محوری، خاک پایه‌ای تعیین شده است. منحنی دانه‌بندی خاک پایه، در شکل (۱) و مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. در خاک پایه ۶ درصد مواد ریزدانه منظور شده است؛ با این تصور که با اضافه شدن ماده‌ی سیمانی کننده به عنوان مواد ریزدانه، این مقدار به میزان ریز دانه‌ی میانگین آبرفت‌های تهران نزدیک می‌شود. میزان اجزای شنی و درشت‌تر نمونه‌ها بین ۲۵ تا ۷۵ درصد مشاهده شده و برای این در خاک پایه ۴۵ درصد مواد شنی در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه جنس سیمان بیشتر آبرفت‌های تهران از نوع کربناتی است. برای همین در این مطالعه از آهک آبدار $Ca(OH)_2$ به عنوان ماده‌ی سیمانی کننده استفاده شده است. این ماده با به هم چسباندن مواد ریز دانه و ایجاد واکنش‌های پوزولانی با رس، سبب تشکیل پیوند بین ذرات خاک می‌شود و نوعی سیمانی شدن به وجود می‌آورد.

۳-۲- تهیه‌ی نمونه

برای ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های سیمانی شده از قالب‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۱۰۰ و به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای این منظور از قطعاتی از لوله پلیکا^۱ی تراشکاری شده استفاده شده است. با توجه به وزن مخصوص متوسط آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران، همه‌ی نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک ۱۸/۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب ساخته شده‌اند که معادل دانسیته‌ی نسبی ۶۶ درصد خاک پایه است. برای ساخت نمونه، ماده‌ی سیمانی کننده‌ی مورد نیاز با توجه به حجم قالب و وزن مخصوص مورد نظر، توزین و به صورت خشک با خاک، مخلوط می‌شود. سپس حدود ۸ درصد آب مقطر به نمونه اضافه و دوباره خوب به هم زده می‌شود تا مخلوط همگنی حاصل شود. رطوبت مزبور، نزدیک به مقدار رطوبت بهینه‌ی آزمایش پراکتور خاک پایه است. مخلوط آماده شده در ۱۰ لایه‌ی مساوی، در قالب ریخته می‌شود و هر بار به وسیله‌ی یک تکه چوب

استوانه‌ای شکل به قطر کمی کوچکتر از قالب، با نیروی جک به طور استاتیکی فشرده می‌شود تا به وزن مخصوص مورد نظر برسد. سپس نمونه‌های داخل قالب در کیسه‌های پلاستیکی قرار می‌گیرد و آنگاه مجموعاً در داخل حوضچه آب با دمای ثابت ۲۵ درجه نگهداری می‌شود. داخل کیسه‌ی پلاستیک محتوی نمونه، آب مقطر ریخته شده اس به طوری که نمونه، کاملاً اشباع شود. قرار دادن نمونه در کیسه پلاستیک به این خاطر است که از تأثیر کنترل نشده‌ی آب حوضچه بر فرایند سیمانی شدن نمونه‌ها جلوگیری شود. بعد از سپری شدن ۶ هفته، قالب نمونه‌های سیمانی شده با احتیاط به وسیله‌ی هویه‌ی برقی بریده می‌شود و نمونه خارج می‌گردد. شایان ذکر است که نمونه‌های سیمانی نشده در داخل قالب مخصوص سه محوری (با ابعادی مشابه ابعاد ذکر شده برای نمونه‌های سیمانی شده) ساخته می‌شود و آنگاه برای آزمایش روی دستگاه سه‌محوری قرار داده می‌شود.



شکل (۱): منحنی دانه بندی آبرفت‌های درشت دانه و سیمانی شده‌ی شمال تهران و منحنی دانه بندی خاک پایه.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی خاک پایه.

مقدار	مشخصه
۲/۵۸	G_s چگالی ویژه ذرات
۰/۲	D_{10} قطر مؤثر (میلی متر)
۲۸	$C_u = D_{60}/D_{10}$ ضریب یکنواختی
۴۵	درصد شن (بزرگتر از ۴/۷۶ میلی متر)
۶	درصد مواد ریز دانه (کوچکتر از ۰/۰۷۴ میلی متر)
۱/۹۳	وزن مخصوص حداکثر (گرم بر سانتی متر مکعب)
۱/۵۹	وزن مخصوص حداقل (گرم بر سانتی متر مکعب)
۴۴	حد روانی مواد عبوری از الک شماره ۴۰ (%)
۱۶	نشانه خمیری مواد عبوری از الک شماره ۴۰ (%)
SW- SM	طبقه بندی یونیفاید

۳-۳- برنامه‌ی آزمایش‌ها

اثر سیمانی شدن بر اساس اجرای آزمایش سه محوری زهکشی شده بر روی سه دسته‌ی نمونه‌ی غیرسیمانی، سیمانی شده و نمونه‌های بی‌ساختار^۱ مطالعه شده است. نمونه‌های غیرسیمانی، بی افزودن هر گونه ماده‌ی سیمانی کننده تهیه شده‌اند و نمونه‌های سیمانی شده با افزودن آهک به مقدار متفاوت ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد وزنی خاک حاصل شده‌اند. خاک نمونه‌های بی‌ساختار شده از خرد کردن نمونه‌های سیمانی شده با ۳ درصد آهک به دست آمده است. خرد کردن نمونه‌ها با دست و با

احتیاط صورت می‌گیرد تا شکست ذره رخ ندهد. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر عوامل مختلف، آزمایش‌های بیشتری بر روی نمونه‌های سیمانی شده‌ی ۳ درصد و بی‌ساختار شده‌ی ۳ درصد و غیر سیمانی اجرا شده است. فهرست آزمایش‌های اجرا شده در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲): فهرست آزمایش‌های سه محوری اجرا شده.

نمونه	فشار همه جانبه (kPa)
غیر سیمانی	۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰، ۱۱۰، ۵۵، ۲۵
سیمانی شده ۱/۵ درصد	۵۰۰، ۳۰۰، ۱۱۰
سیمانی شده ۳ درصد	۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰، ۱۱۰، ۵۵، ۲۵
سیمانی شده ۴/۵ درصد	۵۰۰، ۳۰۰، ۱۱۰، ۱۰
بی‌ساختار شده	۵۰۰، ۳۰۰، ۵۵

تمامی نمونه‌های مورد نظر، ابتدا اشباع شد و سپس نمونه‌ها تحت فشار همه جانبه‌ی مورد نظر قرار گرفت تا تحکیم پیدا کند. تغییر حجم، در طول تحکیم نیز اندازه‌گیری شد. تا در محاسبه‌ی حجم نهایی نمونه‌ی تحکیم یافته استفاده شود. سرعت بارگذاری ۰/۱ میلی‌متر در دقیقه (معادل با ۳ درصد کرنش در ساعت) تنظیم شده بود. در طول آزمایش، فشار سلولی، پس فشار یا فشار منفذی، تغییر حجم نمونه، جا به جایی محوری و نیرو به وسیله‌ی کامپیوتر و با استفاده از نرم‌افزار TRIAX [۹] ثبت می‌شد. کرنش محوری به صورت خارجی و با استفاده از جابجایی‌سنج الکترونیکی^۹ که به حلقه نیرو سنج بسته شده بود اندازه‌گیری شده است.

جدول (۳): خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌های سه محوری.

شکل گسیختگی غالب	مقاومت برشی (کیلو پاسکال)			فشار همه جانبه (کیلو پاسکال)	نمونه
	حداکثر انقباض	باقیمانده	گسیختگی		
خمراه‌ای		۱۳۵/۰	۱۵۵/۸	۲۵	غیر سیمانی
خمراه‌ای		۱۹۶/۷	۲۰۹/۸	۵۵	
خمراه‌ای		۴۳۱/۲	۴۳۹/۶	۱۱۰	
خمراه‌ای		۸۱۶/۲	۸۱۶/۲	۳۰۰	
خمراه‌ای		۱۵۱۸/۸	۱۵۱۸/۸	۵۰۰	
خمراه‌ای		۲۹۳۰/۹	۲۹۳۰/۹	۱۰۰۰	
پهنه برشی	۷۲۷	۲۸۹/۹	۹۱۶/۴	۱۱۰	سیمانی شده ۱/۵ درصد
پهنه برشی	۱۴۴۷	۱۰۳۳/۵	۱۶۷۹/۹	۳۰۰	
خمراه‌ای	۲۲۷۵	۱۷۳۶/۷	۲۳۳۴/۰	۵۰۰	
پهنه برشی	۵۴۰	۱۶۰/۵	۶۴۸/۵	۲۵	سیمانی شده ۳ درصد
پهنه برشی	۵۵۵	۲۴۹/۳	۶۸۴/۷	۵۵	
پهنه برشی	۶۲۷	۴۸۴/۹	۹۷۸/۱	۱۱۰	
پهنه برشی	۱۵۳۳	۱۱۰۵/۵	۱۷۴۷/۹	۳۰۰	
خمراه‌ای	۲۴۴۸	۲۰۱۱/۵	۲۴۶۳/۶	۵۰۰	
خمراه‌ای	-	۲۷۴۱/۷	۳۵۵۱/۹	۱۰۰۰	
پهنه برشی	۸۶۰	۸۹/۷	۱۱۱۵/۵	۱۰	سیمانی شده ۴/۵ درصد
پهنه برشی	۱۰۵۶	۴۵۰/۱	۱۵۱۴/۰	۱۱۰	
پهنه برشی	۱۹۱۷	۱۴۰۲/۶	۲۲۱۶/۷	۳۰۰	
پهنه برشی	۲۷۱۹	۱۹۹۶/۶	۲۹۷۰/۷	۵۰۰	
پهنه برشی		۲۱۰/۳	۲۸۸/۷	۵۵	بی‌ساختار شده
خمراه‌ای		۱۰۷۷/۱	۱۱۷۱/۶	۳۰۰	
خمراه‌ای		۱۷۴۵/۰	۱۸۰۰/۰	۵۰۰	

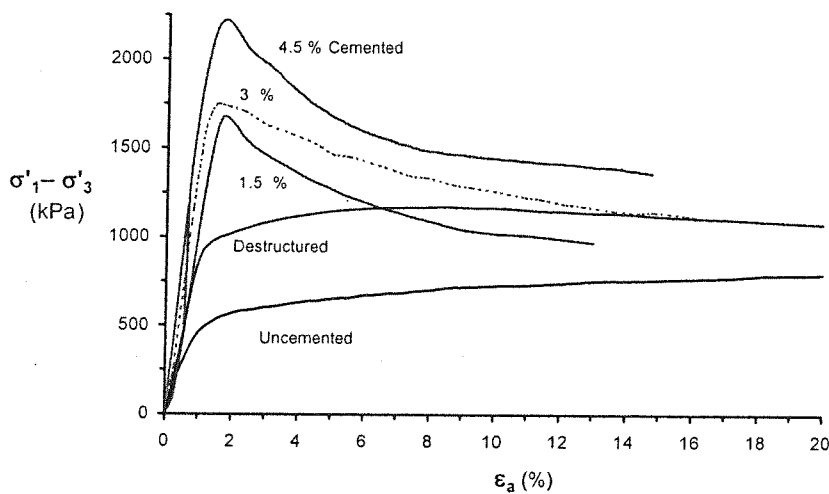
۴- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

نشانه‌ها و پارامترهای به کار رفته، در تحلیل و بررسی نتایج، عبارتند از: کرنش محوری ϵ_h ، کرنش حجمی ϵ_v ، تنش محوری

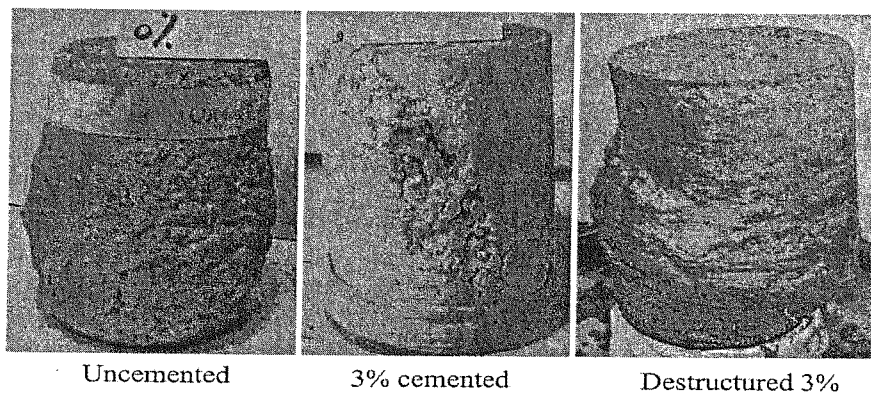
مؤثر σ_1 ، تنش جانبی یا همه جانبه مؤثر σ_3 ، مقاومت برشی و یا تفاضل تنش‌های اصلی ($\sigma_1 - \sigma_3$)، چسبندگی مؤثر خاک c' و زاویه اصطکاک مؤثر ϕ . خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌ها در جدول (۳) درج شده است.

ع-۱- رفتار برشی نمونه‌ها

همان‌گونه که برای مثال در شکل (۲) می‌بینید، روند منحنی تنش - کرنش نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده، همواره صعودی است و رفتار سخت شونده با کرنش دارند ولی در نمونه‌های سیمانی شده، منحنی مزبور بعد از صعود تند اولیه و رسیدن به نقطه‌ی اوج، کاهش شدید یافته و رفتاری مانند نمونه نرم شونده با کرنش پیدا می‌کند. نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده، در بارگذاری و با افزایش کرنش محوری، به طور پیوسته منقبض می‌شود و به شکل خمراه‌ای درمی‌آید ولی در نمونه‌های سیمانی شده، گسیختگی با ایجاد پهنه‌ی برشی همراه است. در نمونه‌های سیمانی شده، با افزایش فشار همه جانبه، تغییر شکل خمراه‌ای نیز پدیدار می‌شود؛ به طوری که در آزمایش‌های اجرا شده با فشارهای همه‌جانبه‌ی زیاد، گسیختگی نمونه با خمراه‌ی شدن زیادی همراه است و پهنه‌ی برشی پدید آمده نظیر سایر نمونه‌ها مشخص و کم ضخامت نیست. به بیان دیگر در نمونه‌های سیمانی شده، با افزایش فشار همه‌جانبه خمراه‌ی شدن بیشتر می‌شود و ضخامت پهنه‌ی برشی پدید آمده نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۳) تصاویری از نمونه‌های مختلف بعد از آزمایش و گسیختگی نشان داده شده است.



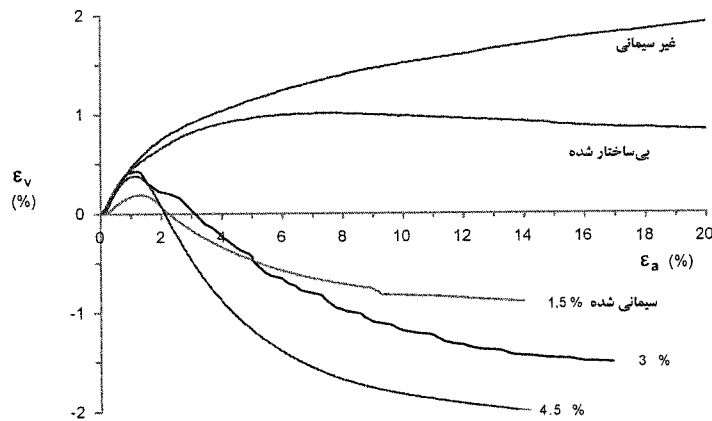
شکل (۲): منحنی‌های تنش - کرنش نمونه‌های آزمایش شده در فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.



شکل (۳): تصاویری از نمونه‌ها بعد از آزمایش سه محوری.

نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده، در بارگذاری و با افزایش کرنش محوری، پیوسته منقبض (متراکم) می‌شوند ولی

در نمونه‌های سیمانی شده بعد از یک انقباض اولیه، اتساع، شروع و سپس پهنه‌ی برشی تشکیل می‌شود. در شکل (۴) نمودار تغییرات کرنش حجمی چند نمونه، در بارگذاری و گسیختگی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سیمانی شدن، میزان اتساع به وجود آمده در طول گسیختگی، افزایش یافته است.

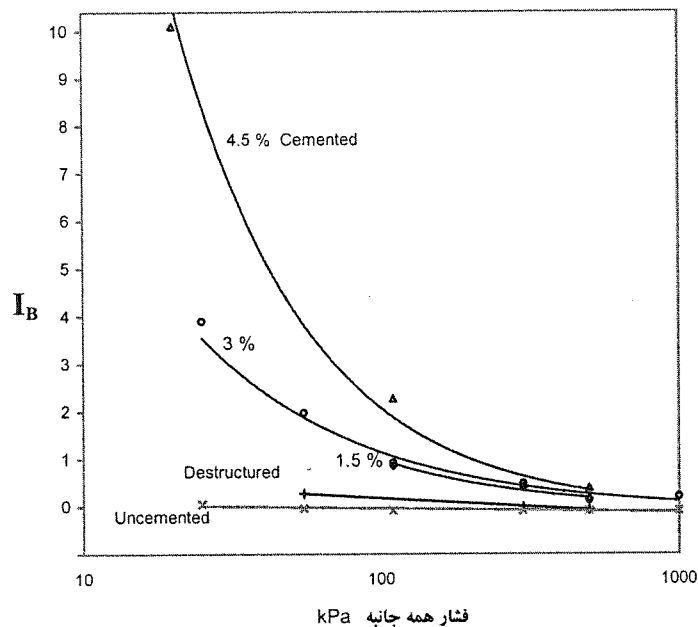


شکل (۴): تغییرات حجم، در بارگذاری و گسیختگی برای نمونه‌های آزمایش شده در فشار همه جانبه ۳۰۰ کیلو پاسکال.

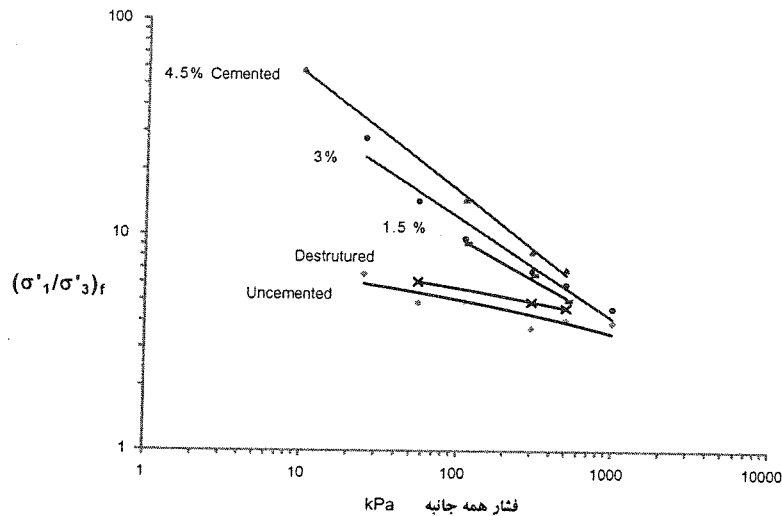
کنسولی و همکاران [۱۰] برای نمایش میزان شکنندگی نمونه‌ها، شاخصی را به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

$$I_B = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_r} - 1 \quad (1)$$

عبارت $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_r$ مقاومت برشی در موقع گسیختگی و $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f$ مقاومت برشی باقیمانده هستند. شکل (۵) نمودار تغییرات شاخص شکنندگی نمونه‌های مختلف را نسبت به فشار همه جانبه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سیمانی شدن، شاخص مزبور افزایش می‌یابد ولی در هر سری از نمونه‌ها با افزایش فشار همه جانبه، این شاخص کم می‌شود. همان طوری که در شکل (۶) نشان داده شده است، تغییرات نسبت تنش‌های اصلی در موقع گسیختگی $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$ نسبت به فشار همه جانبه نشان می‌دهد که با ازدیاد سیمانی شدن، نسبت مزبور افزایش، ولی با افزایش فشار همه جانبه مقدار آن به شدت کاهش می‌یابد. روند همگرایی نمودارها نشان می‌دهد که نسبت تنش‌های اصلی، هنگام گسیختگی همه نمونه‌ها، احتمالاً در فشارهای همه جانبه در حدود ۱۲۰۰ کیلو پاسکال یکسان می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نقش سیمانی شدن، در افزایش مقاومت برشی خاک با ازدیاد فشار همه جانبه، کاهش می‌یابد.



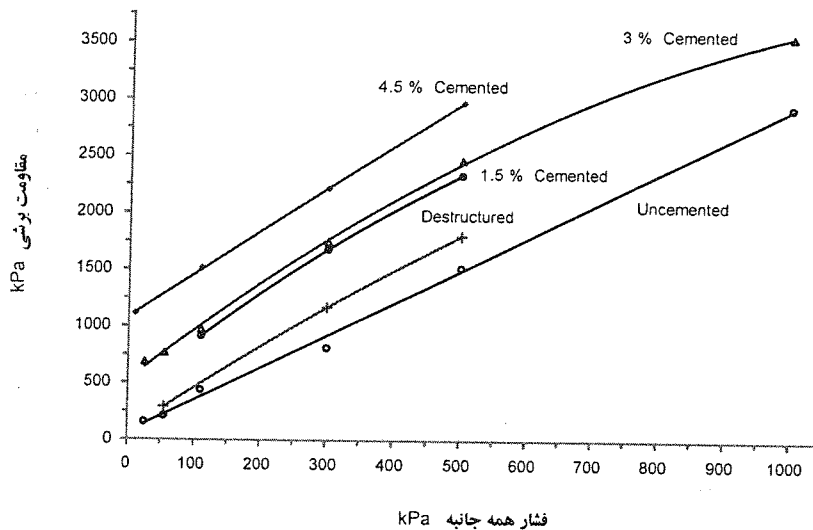
شکل (۵): تغییرات شاخص شکنندگی نمونه‌ها نسبت به فشار همه جانبه.



شکل (۶): تغییرات نسبت تنش‌های اصلی گسیختگی نسبت به فشار همه‌جانبه برای نمونه‌های مختلف.

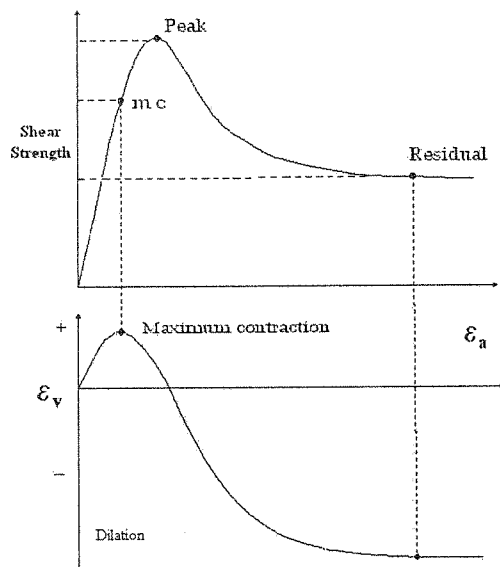
۴-۲- مقاومت برشی نمونه‌ها

همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است با افزایش سیمانی شدن، مقاومت در برابر گسیختگی افزایش می‌یابد. میزان این افزایش در فشارهای جانبی کم، بیشتر ولی در فشارهای جانبی زیاد، کمتر است.



شکل (۷): تغییرات مقاومت برشی با سیمانی شدن و فشار همه‌جانبه.

پارامترهای مقاومت برشی (c و ϕ) بسته به این که نمونه‌ها در چه شرایطی آزمایش شوند و یا چه مرحله‌ای از بارگذاری برای تعیین آنها ملاک قرار گیرند، می‌تواند مقادیر متفاوتی داشته باشد. در صورتی که از تنش‌های اصلی مؤثر σ'_1 و σ'_3 استفاده شود، مقادیر c' و ϕ' به دست می‌آیند که به ترتیب به عنوان چسبندگی مؤثر و زاویه اصطکاک مؤثر شناخته می‌شوند. پارامترهای مزبور را می‌توان برای مراحل مختلف بارگذاری و گسیختگی نمونه‌ها تعیین کرد. همان‌گونه که در شکل (۸) به طور نمادین نشان داده شده است، در صورتی که از تنش‌های اصلی در نقطه‌ی مقاومت اوج^{۱۱} استفاده شود، پارامترهای مزبور c'_p و ϕ'_p نامیده می‌شوند، ولی در صورتی که از تنش‌های اصلی در مقاومت باقیمانده^{۱۲} استفاده شود پارامترهای c'_r و ϕ'_r به دست خواهند آمد.



شکل (۸): نمایش نمادین نحوه‌ی تعیین تنش مراحل مختلف بارگذاری نمونه.

در صورتی که تنش‌های اصلی با نرخ تغییر حجم صفر یا اتساع صفر انتخاب شود، زاویه‌ی اصطکاک مربوط به ϕ'_{cv} نامیده می‌شود که در این حالت، مؤلفه‌ی ناشی از اتساع از بین می‌رود. شرایط نرخ تغییر حجم صفر در آزمایش بر نمونه‌های سیمانی شده، در دو حالت قابل مشاهده است. حالت اول لحظه‌ی حداکثر انقباض^{۱۳} یا تغییر فاز است که بعد از آن با ادامه بارگذاری، نمونه، شروع به اتساع می‌کند. حالت دوم مرحله‌ی نهایی یا باقیمانده است که در آن، نمونه تغییر حجم چندانی ندارد. در صورت انتخاب تنش‌های اصلی حالت اول، زاویه‌ی اصطکاک ϕ'_{mc} نامیده می‌شود.

برای به دست آوردن پارامترهای مقاومت برشی، می‌توان دوایر موهر مربوط به آزمایش‌ها را رسم کرد و با ترسیم پوش بر روی آنها مقادیر c' و ϕ' را به دست آورد. لمب [۱۱] روش دیگری را که موسوم به روش مسیر تنش است، برای به دست آوردن پارامترهای مزبور عرضه کرده است. با رسم یک نقطه برای هر نمونه در فضای p' : q' و وصل آنها به یکدیگر خطی حاصل می‌شود که شیب α' و ضریب ثابت a' آن با زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی خاک روابط زیر را دارند:

$$\sin \phi' = \tan \alpha' \quad (۲)$$

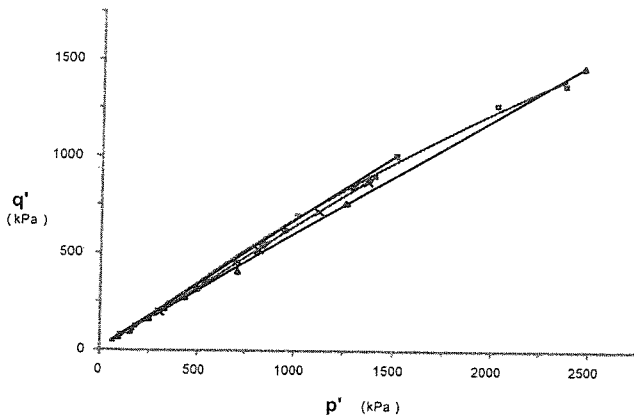
$$c' = \frac{a'}{\cos \phi'} \quad (۳)$$

q' و p' به صورت زیر تعریف شده‌اند:

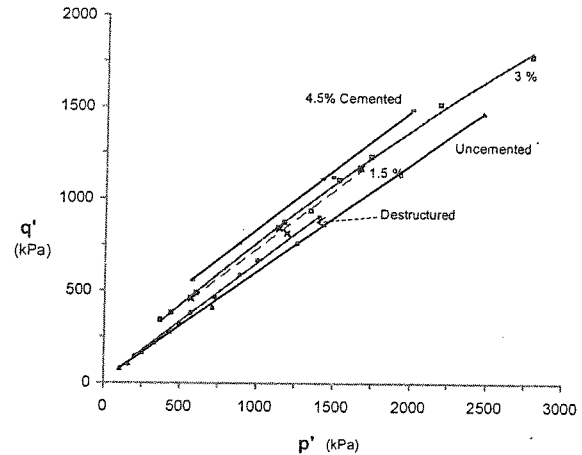
$$q' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (۴)$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \quad (۵)$$

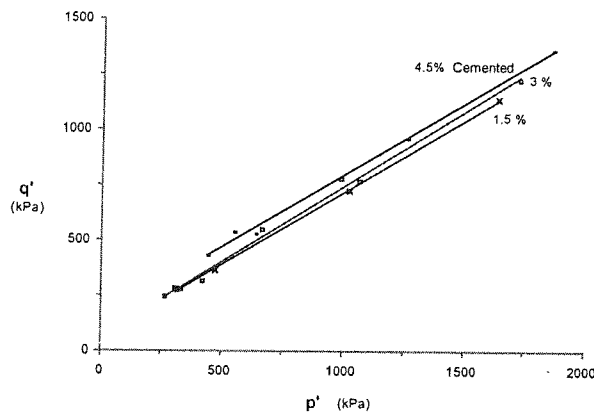
به وسیله‌ی این روش، می‌توان مسیر تنش کل و یا مؤثر نمونه را از ابتدا تا انتهای آزمایش ترسیم کرد. در این مطالعه، براساس روش اخیر، پوش مقاومت اوج و باقیمانده‌ی نمونه‌های مختلف ترسیم شده و به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است. همچنین پوش مقاومت در لحظه‌ی حداکثر انقباض برای نمونه‌های سیمانی شده در شکل (۱۱) دیده می‌شود. با توجه به این که در بیشتر نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده، تغییر فاز روی نمی‌دهد، برای همین رسم این نوع پوش در مورد آنها مقدور نمی‌باشد.



شکل (۱۰): پوش مقاومت باقیمانده نمونه‌های مختلف.



شکل (۹): پوش گسیختگی نمونه‌های مختلف.



شکل (۱۱): پوش مقاومت در لحظه حداکثر انقباض برای نمونه‌های سیمانی شده.

به طور خلاصه، مقادیر پارامترهای c' و ϕ' بدست آمده براساس مقاومت، در مراحل سه گانه‌ی بالا برای هر سری از نمونه‌ها برآورد شده و در جدول (۴) آمده است.

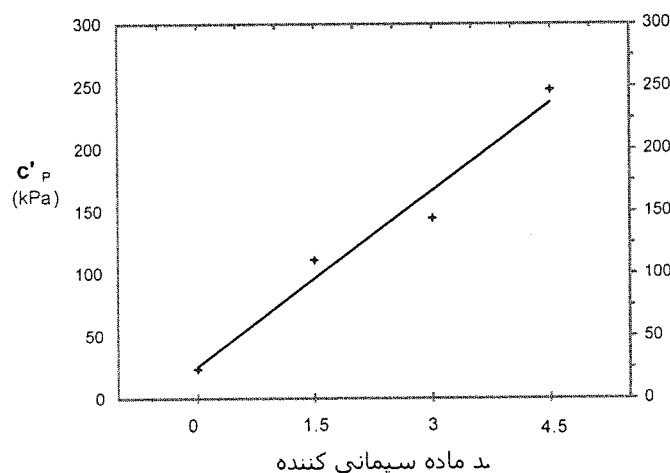
جدول (۴): پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها در حالات مختلف.

حداکثر انقباض	Residual		باقیمانده		Peak		حالت	نوع نمونه
	ϕ' °	c' (kPa)	ϕ' °	c' (kPa)	ϕ' °	c' (kPa)		
-	-	-	۳۵/۸	۱۹/۳	۳۶	۲۳	غیر سیمانی	
۴۰/۸	۸۲	-	۳۹/۳	۳/۱	۴۰/۰	۱۱۱	سیمانی شده ۱/۵ درصد	
۴۱	۱۱۹	-	۳۹/۲	۱۲/۵	۴۰/۴	۱۴۴	سیمانی شده ۳ درصد	
۴۰/۶	۱۹۱	-	۴۰/۰	۱۱/۷	۴۰/۵	۲۴۷	سیمانی شده ۴/۵ درصد	
۴۰/۷	۶/۴	-	۳۹/۴	۴/۸	۳۹/۴	۱۴	بی‌ساختار شده	

۵- بحث درباره مقاومت برشی نمونه‌ها

مقاومت برشی خاک، ناشی از دو عامل چسبندگی و اصطکاک است. در خاک‌های درشت دانه که چسبندگی معمولاً ناشی از سیمانی شدن است، تا مرحله‌ی گسیختگی، مقاومت خاک، ناشی از هر دو عامل مذکور است ولی بعد از آن مقاومت خاک اغلب از اصطکاک نشأت می‌گیرد. مقایسه‌ی نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های سیمانی شده و نشده نشان می‌دهد که در نمونه‌های سیمانی شده تا مرحله گسیختگی، مقاومت خاک بیشتر ناشی از پیوندهای سیمانی است. البته همان طور که در شکل (۶) نشان داده شد، با افزایش فشار همه جانبه، نقش مقاومت ناشی از سیمانی شدن ضعیفتر می‌شود. گسیخته شدن پیوندهای سیمانی بین ذرات از جایی که شیب منحنی تنش - کرنش کمتر می‌شود، شروع شده و تا بعد از گسیختگی ادامه

پیدا می‌کند. آغاز گسیخته شدن پیوندهای سیمانی که تسلیم پیوند^۴ نام دارد [۱۲]، خیلی زودتر از نقطه‌ی گسیختگی نمونه یا مقاومت حداکثر صورت می‌گیرد ولی از بین رفتن غالب این پیوندها با گسیختگی نمونه صورت می‌گیرد. چسبندگی به دست آمده برای نمونه‌های سیمانی شده و نشده بر اساس تنش‌های اصلی مقاومت حداکثر در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سیمانی شدن بر مقدار چسبندگی نیز افزوده شده است. در نمونه‌های غیر سیمانی نیز به دلیل تأثیر چسبندگی ناشی از مواد رسی موجود در نمونه، مقداری چسبندگی مشاهده می‌شود ولی در نمونه‌های بی‌ساختار شده، مقدار آن ناچیز است. علت این امر را باید ناشی از تأثیر آهک بر کانی‌های رسی و تغییر ماهیت فیزیکوشیمیایی رسها دانست. بوینتون [۱۳] نشان داده است که دو عامل سبب افزایش مقاومت خاک رسی در اثر اضافه کردن آهک می‌شود: الف- آهک، ذرات ریز رسی را به هم می‌چسباند و ذرات درشت و سخت را پدید می‌آورد که این عمل در اثر جای‌گزینی کاتیون کلسیم به جای یون‌های سدیم یا هیدروژن موجود در رس صورت می‌گیرد؛ ب- آهک باعث سیمانی شدن در اثر واکنش‌های شیمیایی با آلومینوسیلیکات‌های خاک می‌شود. بنابراین به دلیل جای‌گزینی کاتیون کلسیم در مواد رسی نمونه‌های بی‌ساختار شده، در پارامترهای مقاومتی آنها نسبت به نمونه‌های غیرسیمانی قدری تفاوت مشاهده می‌شود. چسبندگی باقیمانده در نمونه‌های سیمانی شده و بی‌ساختار شده خیلی کم به دست آمده ولی در نمونه‌های غیرسیمانی مقدار آن قابل توجه است. شایان ذکر است که چسبندگی در نمونه‌های غیرسیمانی ناشی از چسبندگی کانی‌های رسی است.



شکل (۱۲): افزایش چسبندگی مؤثر اوج با مقدار ماده سیمانی کننده.

تأثیر سیمانی شدن بر زاویه‌ی اصطکاک خاک مورد بحث محققان بسیاری بوده است و درباره‌ی تأثیر افزایشی یا کاهش‌ی آن اتفاق نظری وجود ندارد. برخی از جمله المان و پولوس [۱۴] و کوپ و اتکینسون [۵] تأثیر آن را کاهش می‌دانند و معتقد هستند که ماده‌ی سیمانی‌کننده باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک می‌شود. عده‌ای نیز این پدیده را بی‌تأثیر دانسته‌اند که از جمله‌ی آنها کلاف و همکاران [۱]، آکار و ال‌تاهیر [۱۵]، ردی و ساکسنا [۱۶] و اشناید و همکاران [۱۷] هستند. این محققان معتقدند که سیمانی شدن، تنها سبب جا به جایی موازی پوش گسیختگی به سمت بالا می‌شود و تأثیر محسوسی بر زاویه اصطکاک نمی‌گذارد. بعضی نیز سیمانی شدن را عاملی در جهت افزایش مقدار ϕ' می‌دانند. برای مثال لد و اورتون [۴] معتقدند که سیمانی شدن سبب اتصال دانه‌های ریز خاک به یکدیگر و پدید آمدن دانه‌های بزرگتر می‌شود. از آنجا که دانه‌های بزرگتر، در هم رفتگی بیشتری پیدا می‌کنند، موجب افزایش زاویه اصطکاک می‌شوند. ویسا و همکاران [۱۸] نشان داده‌اند که سیمانی شدن، سبب افزایش زاویه‌ی اصطکاک تا حدود ۵ درجه می‌شود ولی هیچ تأثیری بر روی زاویه اصطکاک باقیمانده ندارد.

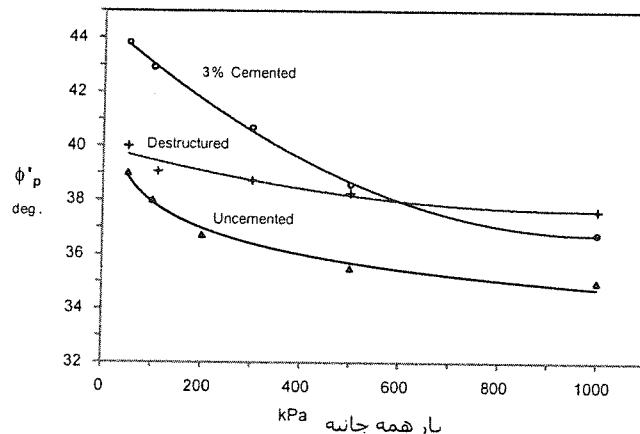
مقادیر ϕ' بدست آمده برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که کلاً مقدار ϕ' نمونه‌های غیر سیمانی کمتر از نمونه‌های سیمانی شده است. علت آن را باید ناشی از تأثیر آهک بر مواد رسی موجود و سیمانی شدن دانست. همان گونه که در شکل (۹) می‌بینید، پوش گسیختگی نمونه‌های سیمانی شده، منحنی شکل است و برای این، مقدار زاویه‌ی اصطکاک ϕ'_p تابعی از فشار همه جانبه نیز هست. پس ϕ'_p بسته به این که در چه محدوده‌ای از فشار همه جانبه تعیین شود، مقدار متفاوتی خواهد داشت. تغییرات ϕ'_p با فشارهای همه جانبه مؤثر برای نمونه‌های مختلف در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در نمونه‌های غیر سیمانی و

بی‌ساختار شده مقدار ϕ'_p در محدوده‌ی فشارهای همه‌جانبه استفاده شده، تقریباً ثابت است ولی در نمونه‌های سیمانی شده، مقدار آن در فشارهای همه‌جانبه‌ی پایین، زیاد و در فشارهای همه‌جانبه‌ی بالا، کمتر است.

شکل (۱۰) نشان می‌دهد که پوش مقاومت باقیمانده‌ی همه‌نمونه‌ها، نزدیک به هم است. بنابراین در مقاومت باقیمانده، تاثیر سیمانی شدن ناچیز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که پوش مقاومت باقیمانده‌ی بعضی نمونه‌ها، دارای مقدری انحناست و بنابراین زاویه اصطکاک ϕ'_r نیز در فشارهای همه‌جانبه بالا کمتر جلوه می‌کند.

زاویه‌ی اصطکاک محاسبه شده، بر اساس مقاومت در لحظه حداکثر انقباض ϕ'_{mc} نمونه‌های سیمانی شده نیز با افزایش سیمانی شدن قدری افزایش نشان می‌دهد. مقایسه‌ی زوایای اصطکاک مختلف بیانگر آن است که به طور متوسط در هر سری از نمونه‌های سیمانی شده، مقدار ϕ'_{mc} بزرگتر از ϕ'_p است. شایان ذکر است که همواره پوش مربوط به نقاط حداکثر انقباض زیر پوش مقاومت اوج قرار می‌گیرد. به بیان دیگر مقاومت برشی در این شرایط، کمتر از مقاومت برشی اوج است.

به نظر می‌رسد مهمترین عاملی که موجب شده است، محققان مختلف در تأثیر سیمانی شدن بر زاویه اصطکاک خاک درشت دانه اتفاق نظر نداشته باشند، استفاده از خاک‌هایی با جنس و شکل ذرات گوناگون، نوع و مقدار ماده سیمانی‌کننده‌ی متفاوت، محدوده‌ی فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف و آزمایش‌های متفاوت با شیوه‌های نمونه سازی گوناگون است. برای مثال کلاف و همکاران [۱] از خاک ماسه‌ای یکنواخت و سیمان پرتلند با مقادیر ۲، ۴ و ۸ درصد استفاده کرده‌اند. المان و پولوس [۱۴] در مطالعات خود، ماسه کربناتی و سیمان پرتلند با مقادیر ۲، ۴ و ۸ درصد به کار برده‌اند. لد و اورتون [۴] از ماسه‌ی شکسته و سیمان پرتلند به مقدار ۶، ۱۲ درصد استفاده کرده‌اند. ردی و ساکسنا [۱۶] و کنسولی و همکاران [۱۰] برای مطالعات خود ماسه و سیمان پرتلند به کار برده‌اند. هوانگ و ایری [۶] و کوپ و اتکینسون [۵] از ماسه‌های کربناتی و گچ به مقدار حدود ۲۰ درصد استفاده کرده‌اند. همچنین ماکارینی [۱۹] و مالاندراکی و تول [۱۲] مخلوطی از ماسه و رس را در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پخته و نمونه‌ی خاک سیمانی شده را به دست آورده‌اند. در نتیجه، تفاوت‌های موجود در مصالح، تهیة نمونه و نحوه‌ی آزمایش پژوهشگران مختلف، سبب اختلاف در نتیجه گیری‌ها شده است.



شکل (۱۳): تغییرات ϕ'_p با فشارهای همه‌جانبه در نمونه‌های غیرسیمانی، بی‌ساختار شده و سیمانی شده ۳ درصد.

۶- نتیجه گیری

آبرفت‌های درشت دانه‌ی تهران بیشتر سیمانی شده و در اثر سیمانی شدن، مقاومت برشی آنها افزایش چشمگیری پیدا کرده است. با توجه به ناهمگنی آبرفت‌های تهران و دشواری تهیة نمونه دست‌نخورده برای آزمایش سه محوری، با انتخاب یک خاک پایه و استفاده از سیمانی شدن مصنوعی، تأثیر این پدیده بررسی شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در اثر سیمانی شدن، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد و رفتار خاک هنگام گسیختگی، شکننده می‌شود. البته در نمونه‌های سیمانی شده با افزایش فشارهای همه‌جانبه، رفتار شکننده به تدریج به رفتار خمیری تبدیل می‌شود. در منحنی‌های تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده، نقطه‌ی اوج مشخصی دیده نمی‌شود در حالی که در نمونه‌های سیمانی شده نقطه‌ی اوج واضح است و مقاومت برشی بعد از آن کاهش می‌یابد و به

سمت مقاومت نهایی یا باقیمانده‌ی نمونه ادامه پیدا می‌کند. گسیختگی در نمونه‌های سیمانی شده با اتساع قابل توجهی همراه است و میزان آن با افزایش مقدار سیمان زیادتر می‌شود.

مقاومت در نمونه‌های غیر سیمانی و بی‌ساختار شده از نوع اصطکاکی است ولی در نمونه‌های سیمانی شده تا مرحله‌ی گسیختگی، مقاومت، بیشتر ناشی از پیوندهای سیمانی و بعد از آن از نوع اصطکاک بین دانه‌ای می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ماده‌ی سیمانی‌کننده، مقدار چسبندگی افزایش می‌یابد ولی بعد از گسیختگی، این چسبندگی تقریباً زایل می‌شود.

پوش گسیختگی یا مقاومت حداکثر نمونه‌های سیمانی شده، دارای انحنای قابل توجهی است ولی در نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده، تقریباً به صورت خط مستقیم است. سیمانی شدن بر زاویه اصطکاک اوج تا حدودی مؤثر است ولی تأثیر آن بر زاویه‌ی اصطکاک باقیمانده، قابل توجه نیست. در فشارهای جانبی کم، ϕ_p نمونه‌های سیمانی شده بیشتر از نمونه‌های غیرسیمانی و بی‌ساختار شده است ولی در فشارهای جانبی زیاد، این وضعیت دیده نمی‌شود. زاویه اصطکاک باقیمانده یا ϕ_r نمونه‌های سیمانی شده و نشده نزدیک به هم است.

تشکر و قدردانی

آزمایش‌های سه محوری به وسیله‌ی نگارنده‌ی چهارم با پشتیبانی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و دانشگاه تربیت مدرس در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه دورهام انگلیس، انجام شده است. همچنین مطالعه بر روی آبرفت‌های تهران با حمایت مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن صورت گرفته است. مساعدت‌ها و مشورت‌های دکتر David Toll از دانشگاه دورهام انگلیس شایسته قدردانی فراوان است.

زیر نویس‌ها

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1 - Brittle | 9 - Transducer |
| 2 - Ductile | 10 - Shear zone |
| 3 - Strain softening | 11 - Peak strength |
| 4 - Stiffness | 12 - Residual |
| 5 - Dilation | 13 - Maximum contraction |
| 6 - Curing | 14 - Bond |
| 7 - P.V.C | |
| 8 - Destructured | |

مراجع

- [1] Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C. and Rad, N. S. (1981), "Cemented sands under static loading"; Journal of Geotech. Engineering Div., ASCE, Vol. 107(6), pp 799-817.
- [2] Gens, A., and Nova, R (1993), "Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks", Proc., Int. Symp. On Geotech. Engineering Of Hard Soils- Soft Rocks, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 485-494.
- [3] Saxena, S. K., and Lastrico, R. M. (1978), "Static properties of lightly cemented sand", Journal of Geotech. Engineering Div., ASCE, 104(12), pp 1449-1465.
- [4] Lade, P. V. and Overton, D. D. (1989), "Cementation effects in frictional materials", Journal of Geotech. Engineering Div., ASCE, Vol. 115(10), pp 1373-1387.
- [5] Coop, M. R., and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", Geotechnique, London, 43(1), pp 53-67.
- [6] Huang, J. T. and Airey, D. W (1993), "Effects of cement and density on an artificially cemented sand", Proc. Geotechnical Engineering of Hard Soils- Soft Rocks, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp 553-560.
- [7] حائری، سید محسن، سید شهاب‌الدین یثربی، علی ارومیه‌ای، و ابراهیم اصغری (۱۳۸۱)، "ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی آبرفت‌های درشت دانه و سیمانی شده تهران"، فصلنامه علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور، جلد ۱۱، شماره ۴۷، صفحات ۱۴ تا ۲۱
- [8] یثربی، سید شهاب‌الدین، سید محسن حائری، ابراهیم اصغری و محمد حسین توفیق‌ریحانی (۱۳۸۲)، "تأثیر سمنتاسیون بر پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل خاک‌های درشت دانه با نگرشی به آبرفت‌های تهران"، گزارش پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [9] Toll, D.G.(1999), "A data acquisition and control system for geotechnical testing, in computing developments in civil and structural engineering" (eds.) B. Kumar and B.H.V. Topping), Edinburgh:



Civil-Comp Press, pp 237-242.

- [10] Consoli, N. C., Prietto, D. M. and Ulbrich, L. A.(1998), "Influence of fiber and cement addition on behaviour of sandy soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124(12), pp 1211- 1214.
- [11] Lambe, T. W.(1964), "Methods of estimating settlement", Journal of Geotech. Engineering Div., ASCE, Vol. 90(5), pp 43.
- [12] Malandaraki, V., and Toll, D.G. (2000), "Drained probing triaxial tests on a weakly bonded artificial soil", Geotechnique, London, 50(2), pp 141-151.
- [13] Boynton, R. S. (1966), "Chemistry and technology of lime and limestone", John Wiley and Sons.
- [14] Allman , M. A., and Poulos, H. G. (1988), "Stress- strain behaviour of an artificially cemented calcareous soil", Proc. Engineering for Calcareous Sediments, Jewell & Andrews(eds), Balkema, Rotterdam, pp 51-60.
- [15] Acar, Y.B. and El-Tahir, A.E. (1986), "Low strain dynamic properties of artificially cemented sand", Journal of Geotech. Engineering, ASCE, Vol. 112(11), pp 1001-1015.
- [16] Reddy, K. R. and Saxena, S. K. (1993), "Effects of cementation on stress-strain and strength characteristics of sands", Journal of Soils and Foundation, Vol. 33 (4), pp 121- 134.
- [17] Schnaid, F.; Prietto, P. D. M. and Consoli, M. H. T. (2001), "Characterization of cemented sand in triaxial compression", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(10), pp 857-867.
- [18] Wissa, A. E. Z., Ladd, C. C., and Lambe, T. W. (1965), "Effective stress strength parameters of stabilized soils", Proc. 6th Int. Conf. of Soil Mechanics, Int. Society of Soil Mechanics and Foundation Eng., 1, pp 412- 416.
- [19] Maccarini, M. (1987), "Laboratory studies of a weakly bonded artificial" soil, Ph.D thesis, University of London, London.

