

بررسی مشخصات تغییر شکل تناوبی مصالح مخلوط متراکم کائولن - شن Cyclic Deformation Properties of Kaolin-Gravel Mixtures

علی شفیعی و محمد کاظم جعفری

پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
Email: shafieea@iiees.ac.ir

چکیده: رسهای مخلوط از انواع مصالح مخلوطی می‌باشند که دارای دانه‌بندی گسترده‌ای بوده و در بر گیرنده مصالحی مانند رس، ماسه، شن و حتی قلوه‌سنگ می‌باشند، با توجه به استفاده از رسهای مخلوط در هسته سدهای خاکی و نیز وجود اینگونه از مصالح در طبیعت، شناسایی رفتار زهکشی نشده این مصالح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله نتایج یک تحقیق جامع آزمایشگاهی به منظور شناخت خواص تغییر شکل تناوبی مصالح مخلوط (شامل مدول برشی و نسبت میرایی) بر روی مخلوطهای کائولن- شن معرفی می‌گردد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدول برشی تابعی از مقدار سنگدانه‌ها، دامنه کرنش برشی، تعداد سیکل‌های بارگذاری و تنش همه جانبه اولیه می‌باشد لیکن نسبت میرایی عمدتاً تابعی از مقدار سنگدانه‌ها و دامنه کرنش برشی بوده و بعلاوه بمقدار کمی از تعداد سیکل‌های بارگذاری تأثیر می‌پذیرد.

کلید واژه‌ها: مصالح مخلوط، سنگدانه، مدول برشی، نسبت میرایی

Abstract: Composite clay is a mixture of clay, as the main body and aggregates, which are floating within the clayey matrix. Undrained behavior of composite clays in its natural or compacted state e.g., core material of embankment dams has a great importance for the geotechnical engineers. An extensive test program was conducted on kaolin-gravel mixtures to investigate the effects of aggregate on the cyclic deformational properties, including shear modulus and damping ratio. Test results reveal that shear modulus for various mixtures, depends on aggregate content, shear strain amplitude, number of loading cycles and initial confining stress. Meanwhile damping ratio mainly depends on aggregate content and shear strain amplitude and is less affected by the number of loading cycles.

۱ - مقدمه

در انواع سازه‌های خاکی و یا مستحدماتی که بر روی خاک بنا می‌شوند، مهندسی ژئوتکنیک با طیف متنوعی از خاکها روبرو هستند. این طیف گسترده وسیعی از خاکهای چسبیده تا دانه‌ای را پوشش می‌دهد بطوریکه خاکهایی با خصوصیات بین این دو نوع خاک از وسعت بیشتری در طبیعت برخوردارند. مورن^۱ که از مصالح با منشأ یخچالی است، مثال مناسبی از مصالح مخلوط می‌باشد. از مورن که از مصالح متنوعی شامل رس، سیلت، ماسه و حتی شن تشکیل شده است، بطور گسترده‌ای بعنوان هسته سدهای خاکی و یا بعنوان مصالح تشکیل دهنده دایکهای همگن در آمریکای شمالی و کشورهای اسکاندیناوی استفاده شده است [۱]. رسهای مخلوط^۲ از انواع دیگر مصالح مخلوطی می‌باشند که دارای دانه‌بندی گسترده‌ای^۳ بوده و در برگیرنده مصالحی مانند رس، ماسه، شن و حتی قلوه‌سنگ می‌باشند، اگرچه در این مصالح بافت اصلی را بخش چسبیده یعنی رس تشکیل می‌دهد. امروزه استفاده از رسهای مخلوط بعنوان هسته

سدهای خاکی امری متداول شده است. علاوه بر این در حالاتی که مصالح مناسب رسی در دسترس نباشد (بعنوان مثال بعلت پلاستیسیته بالای رس) و همچنین امکان دسترسی به رسهای مخلوط نیز فراهم نباشد، مصالح هسته را می‌توان بصورت مصنوعی و با اختلاط رس با پلاستیسیته بالا با مصالح درشت‌دانه فراهم نمود. از این روش بطور مثال در ساخت هسته سد خاکی کرخه در ایران استفاده شده است که افزایش مشخصات مکانیکی هسته سد در جهت تضعیف پدیده قوسی شدن^۴ در هسته از یک طرف و کاهش نشست درازمدت از طرف دیگر، از اهداف این اختلاط بشمار می‌رود. بطور معمول فرض بر این است که بخش دانه‌ای این مصالح باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش تراکم‌پذیری^۵ می‌گردد و از طرف دیگر نفوذپذیری مصالح نیز بوسیله خصوصیات بخش چسبیده تعیین می‌گردد [۲]. بررسی تحقیقات گذشته بر روی رفتار مخلوطهای رس سنگدانه^۶ نشان می‌دهد که اگرچه مشخصات فیزیکی

انجام آزمونهای آزمایشگاهی در آنها ضروری به نظر می‌رسد (نظیر شناخت رفتار تناوبی مصالح) از مصالح با دانه‌بندی اصلاح شده استفاده می‌گردد. این اصلاح می‌تواند حتی در شرایطی نظیر رسی‌های شن‌دار صرفاً به انجام آزمایش روی بخش رسی و تعمیم نتایج آن به مصالح مخلوط (با فرض محافظه‌کارانه بودن برآورد مشخصات خاک در این شرایط) منجر گردد. با این وجود جعفری و شفیعی [۱۰] نشان دادند که برای بارگذاری سه محوری تناوبی در شرایط زهکشی نشده، این فرض که افزودن سنگدانه به رس سبب تقویت مشخصات مکانیکی آن می‌شود، باید مورد تردید واقع گردد. آنها نشان دادند که رس‌های مخلوط (حاوی ۵۰٪ شن ماسه‌دار و ۵۰ درصد رس خمیری) مقاومت تناوبی^{۱۳} کمتری را نسبت به رس خالص از خود بروز می‌دهند. در این آزمایشها مقاومت تناوبی بصورت نسبت تنش تناوبی (نسبت تنش انحراف‌آور به تنش همه جانبه اولیه) که سبب ایجاد ۵ درصد کرنش محوری می‌شود، تعریف گردید. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از این آزمایشها، کمبود تحقیقات در این زمینه و نیز اهمیت شناسایی رفتار رس‌های مخلوط متراکم در قالب مصالح مورد استفاده در سازه‌های خاکی و یا در شرایط درجا (مانند پی‌ها)، مطالعات جامعی بر روی شناخت رفتار استاتیکی و تناوبی (در شرایط زهکشی نشده) اینگونه از مصالح تعریف گردید که نتایج بارگذاریهای استاتیکی و نیز تغییرات فشار آب منفذی (در بارگذاریهای استاتیکی و تناوبی) بتفصیل در مقاله دیگری [۱۱] ارائه شده است. در این مقاله عمدتاً تأثیر مقدار سنگدانه‌ها بر خواص تغییرشکل تناوبی مصالح مخلوط یعنی مدول برشی و نسبت میرایی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مصالح مورد استفاده و روش آزمایش

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این تحقیق نمونه‌های مختلفی از ترکیب رس شن و رس ماسه مورد آزمایش قرار گرفتند. از آنجاییکه نتایج تحقیق برای این دو نوع اختلاط مشابه بود، در این مقاله فقط نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های رس شن معرفی می‌گردد. بمنظور کاهش احتمال تغییر نشانه خمیری^{۱۴} در رس‌های طبیعی از کائولن تجاری^{۱۵} به عنوان بخش چسبنده مصالح مخلوط استفاده گردید. کائولن مورد استفاده دارای توده ویژه^{۱۶} ۲/۷۶، حد روانی و نشانه خمیری بترتیب ۶۹ و ۳۸ درصد بود. همچنین مصالح شنی مورد استفاده که از بستر مسیل کن در شمال غرب تهران انتخاب گردید، تقریباً گرد گوشه و دارای توده ویژه ۲/۶۶ بود. برای انتخاب مصالح شنی از مصالح عبوری از الک ۱/۴ و مانده روی الک ۴ (قطر متوسط دانه‌ها = ۵/۵۵ میلی‌متر) استفاده

اینگونه مصالح مانند حدود اتربرگ، دانسیته خشک و نفوذپذیری خوبی مطالعه شده است [۳-۶] لیکن بر روی خواص مکانیکی اینگونه مصالح (به عنوان مثال مقاومت برشی) مخصوصاً در بارگذاریهای تناوبی و دینامیکی مطالعات کمتری صورت پذیرفته است.

هولتز^۷ و ویلارد^۸ [۷] احتمالاً اولین افرادی بوده‌اند که مقاومت برشی خاکهای رسی حاوی شن (تا حداکثر ۶۵٪) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعات مشخص ساخت که با افزایش مقدار شن، زاویه اصطکاک داخلی افزایش و چسبندگی ظاهری^۹ کاهش می‌یابد. در این آزمایشها تأثیر بخش دانه‌ای بر روی رفتار هنگامیکه مقدار شن از ۵۰٪ تجاوز می‌نماید کاملاً واضح بود. پتوردهان^{۱۰} و همکاران [۸] نیز در سال ۱۹۷۰ آزمایشهایی را بوسیله دستگاه برش مستقیم بر روی مخلوطهای رس - قلوه‌سنگ انجام دادند. در این آزمایشها مقدار قلوه‌سنگ از صفر تا ۱۰۰٪ متغیر بود. علاوه بر این، آزمایشها بدون اعمال تنش قائم انجام گردید. نتایج این آزمایشها نیز مشخص ساخت که با افزایش مقدار قلوه‌سنگ تا حدود ۴۰٪، مقاومت برشی تدریجاً افزایش می‌یابد لیکن با افزایش بیشتر مقدار قلوه‌سنگ (بیش از ۴۰٪)، مقاومت برشی مخلوط افزایش سریعتری را از خود نشان می‌دهد. همچنین والجو^{۱۱} و ژو^{۱۲} [۹] مطالعاتی را با دستگاه برش مستقیم بر روی ترکیبات مختلف رس کائولن و ماسه انجام دادند. نتایج این مطالعات نیز مشخص ساخت که وقتی مقدار ماسه کمتر از ۵۰٪ باشد مقاومت برشی مخلوط بوسیله بخش رسی تأمین می‌گردد لیکن وقتی مقدار ماسه بین ۵۰٪ تا ۸۰٪ باشد، مقاومت برشی مخلوط قسمتی بوسیله رس و قسمتی بوسیله مقاومت اصطکاک بین دانه‌های ماسه‌ای در تماس تأمین می‌گردد.

کمبود مطالعات جامع آزمایشگاهی بر روی رفتار مکانیکی مخلوطهای رس سنگدانه عمدتاً از این واقعیت نشأت می‌گیرد که برای شناسایی آزمایشگاهی رفتار اینگونه از مصالح (که دانه‌بندی گسترده‌ای از رس تا شن و حتی قلوه‌سنگ را پوشش می‌دهند)، با توجه به ابعاد نمونه‌های متعارف، محدودیت وجود دارد و باید براساس حداکثر ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی دانه‌بندی متناسب اختیار گردد. علاوه بر این، غیرهمگن بودن این مصالح نیز دلیل دیگری بر مشکل شناخت رفتار آزمایشگاهی آن می‌باشد. اگرچه می‌توان از روشهای پرهزینه‌ای مانند آزمایشهای درجا و یا مدل‌سازی فیزیکی (بعنوان مثال با استفاده از فن‌آوری سانتریفوژ) جهت شناسایی رفتار مکانیکی اینگونه از مصالح استفاده نمود لیکن بعضاً در پروژه‌هایی که

و پایین نمونه استفاده گردید [۱۴]. علاوه بر این، برای ایجاد سهولت اتساع نمونه در جهت شعاعی، صفحاتی که در تماس مستقیم با دو انتهای نمونه بودند، به چندین قطاع تقسیم شدند. در هر کدام از این صفحات نیز چندین سوراخ جهت امکان زهکشی نمونه در هنگام اشباع و تحکیم تعبیه گردید.

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها قبل از آزمایش.

نوع نمونه	دانسیتة خشک اولیه ($\frac{gr}{cm^3}$)	رطوبت اولیه (%)
K100	۱/۳۵	۳۲/۰
K80	۱/۴۲	۲۷/۰
K60	۱/۵۷	۲۱/۴
K40	۱/۶۹	۱۶/۸

۲-۳- روش انجام آزمایش

پس از قرار دادن نمونه درون سلول آزمایش، به منظور تسریع در اشباع نمونه‌ها و خارج نمودن حبابهای هوا از درون نمونه، گاز CO_2 از قسمت تحتانی وارد نمونه شده و از قسمت فوقانی نمونه به بیرون هدایت گردید. سپس آب بدون هوا از دو طرف نمونه در آن جریان یافت و نهایتاً با استفاده از پس فشار 150 kPa نمونه اشباع شد. در این آزمایشها ملاک اشباع نمونه، رسیدن ضریب B اسکمپتون به ۹۵ درصد بود.

پس از اتمام اشباع، نمونه‌ها تحت تحکیم همسان تک پله‌ای در تنشهای همه جانبه اولیه 100 kPa ، 300 kPa و 500 kPa قرار گرفتند. بعد از خاتمه مرحله تحکیم شیرهای بالا و پایین نمونه بسته شد و نمونه تحت بارگذاری زهکشی نشده سه محوری استاتیکی و یا تناوبی کنترل کرنش قرار گرفت. جدول (۲) نشان دهنده آزمایشهای انجام گرفته بر روی هر نمونه می‌باشد. برای انجام آزمایشها از دستگاههای پیشرفته سه محوری استاتیکی و تناوبی استفاده گردید. کلیه آزمایشهای استاتیکی کنترل کرنش تا رسیدن به کرنش محوری ۱۵٪ ادامه یافتند. از آنجائیکه مطالعات قبلی محققین مختلف [۱۵] حکایت از عاملیت اصلی کرنش برشی بر تغییرات فشار آب منفذی است، بنابراین آزمایشهای سه محوری تناوبی نیز بصورت کنترل کرنش انجام پذیرفت. سرعت بارگذاریهای استاتیکی و تناوبی به گونه‌ای انتخاب گردید که از یکسان بودن فشار آب منفذی در ارتفاع نمونه در هنگام بارگذاری اطمینان حاصل شود. در جدول (۲) مقادیر سرعت بارگذاری در آزمایشهای مختلف ارائه گردیده است. همچنین کلیه آزمایشهای سه محوری تناوبی تا ۵۰ سیکل بارگذاری بر روی هر نمونه ادامه یافت.

گردید. حداکثر قطر دانه‌ها بطریقی انتخاب گردید که (مطابق استاندارد ASTM) از $1/6$ قطر کلاهدک دستگاه (یعنی ۵ سانتی‌متر) کمتر باشد. از دانه‌بندی منقطع^{۱۷} برای مصالح شنی نیز به این دلیل استفاده گردید تا از تأثیر اندازه دانه‌ها یا عبارتی تأثیر دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر رفتار پرهیز گردد.

چهار نمونه مختلف از مصالح مخلوط، از ترکیب کائولن با شن برای انجام آزمایشها انتخاب گردیدند. کلیه درصدهای اختلاط به صورت حجمی (و نه وزنی) تعیین شده و نمونه‌ها با عناوین $K100$ ، $K80$ ، $K60$ و $K40$ نامگذاری شدند؛ بطوریکه حرف اول مخفف *Kaolin* و عدد بعد از حرف اول نشان‌دهنده درصد حجمی کائولن موجود در نمونه می‌باشد. انتخاب سقف 60% برای سنگدانه‌ها باتوجه به جهت‌گیری اصلی این تحقیق در مورد مصالح مورد استفاده در هسته سدهای خاکی بوده است. علاوه بر این حداکثر مقدار سنگدانه‌ها بگونه‌ای انتخاب گردید که از تشکیل اسکلت دانه‌ای و متعاقباً تأثیر آن بر رفتار جلوگیری گردد. مشاهدات مؤلفین نشان داد که در نمونه‌های حاوی 40% کائولن امکان تماس برای تعداد کمی از دانه‌ها وجود دارد، لیکن دانه‌های در تماس باندازه‌ای نیستند که بتوانند یک اسکلت دانه‌ای را تشکیل دهند [۱۲].

۲-۲- نمونه سازی

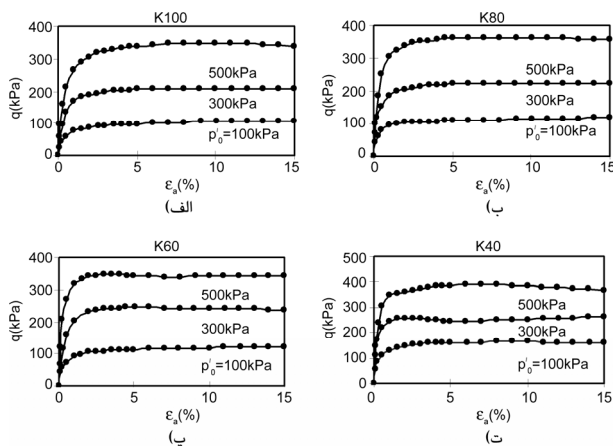
با توجه به جهت‌گیری اصلی تحقیق در مورد مصالح مورد استفاده در هسته سدهای خاکی، کلیه نمونه‌ها بصورت متراکم و در رطوبتی بیش از رطوبت بهینه ساخته شدند. همه نمونه‌ها دارای قطر 5 cm و ارتفاع 10 cm بوده و در 6 لایه تهیه گردیدند. جهت ثابت ماندن درصد اختلاط مصالح در هر لایه، لایه‌ها هرکدام در ظرفهای مجزا تهیه گردید و به منظور اطمینان از پخش یکنواخت رطوبت، هر نمونه حداقل 24 ساعت بعد از تهیه لایه‌ها، ساخته شد. هر لایه به وسیله چکش (با تعداد ضربات متغیر در هر لایه) تا رسیدن به ضخامت مورد نظر (به طوریکه تمام لایه‌ها دارای وزن مخصوص خشک یکسانی باشند) کوبیده شده [۱۲] و سطح هر لایه کوبیده شده نیز به منظور درگیری بهتر با لایه بعدی، خراش داده شد. هر نمونه در وزن مخصوص خشکی برابر ۹۵ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر بدست آمده از آزمایش تراکم استاندارد [۱۳] و رطوبتی برابر ۲ درصد بیش از رطوبت بهینه تهیه گردید. جدول (۱) نشان دهنده مقادیر دانسیته خشک و رطوبت اولیه نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش می‌باشد. همچنین به منظور کاهش اصطکاک بین کلاهدک‌های بالا و پایین سلول بارگذاری با نمونه از دو غشاء لاستیکی آغشته به گریس سیلیکون با لزجت زیاد در بالا

جدول ۲: مشخصات آزمایشهای انجام گرفته بر روی هر نمونه.

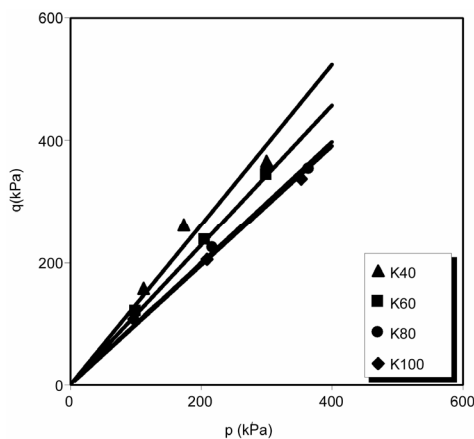
تنش (های) همه‌جانبه (kPa)	بارگذاری تناوبی		
	بارگذاری استاتیکی نرخ کرنش محوری (%/min)	دامنه کرنش برشی (%)	فرکانس بارگذاری (Hz)
۱۰۰	۰/۰۷	۱/۵ ۰/۷۵ ۰/۱۵	۰/۰۱
۵۰۰ و ۳۰۰	۰/۰۵	۱/۵ ۰/۷۵ ۰/۱۵	۰/۰۰۵

مقادیر q_{cs} و p'_{cs} که در جدول (۳) آورده شده‌اند، همگی در کرنشهای بزرگی برابر ۱۵٪ محاسبه شده‌اند. از آنجاییکه منحنی تنش- کرنش محوری تمام نمونه‌های آزمایش شده (شکلهای (۱-الف) تا (۱-ت)) به یک مقدار ثابت در کرنشهای بزرگ میل می‌کنند، بنابراین پارامترهای q_{cs} و p'_{cs} همان مقادیر تنش انحراف آور و تنش مؤثر میانگین در حالت بحرانی خواهند بود. شکل (۲) نشان‌دهنده خط حالت بحرانی برای مخلوطهای کائولن- شن در صفحه $q-p'$ می‌باشد. خطوط حالت بحرانی نشان داده شده در این شکل بوسیله برازش دادن مناسبترین خط عبوری از داده‌های ارائه شده در جدول (۳) بطوریکه از مبدأ عبور کند، حاصل گردیده است. همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد با افزایش سنگدانه‌ها، خط حالت بحرانی در جهت خلاف عقربه‌های ساعت می‌چرخد. همچنین در جدول (۳) مقادیر زاویه مقاومت برشی^{۲۲} در حالت بحرانی، ϕ برای انواع مختلف نمونه‌ها ارائه شده است. مقدار ϕ از رابطه زیر محاسبه گردیده است:

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (۲)$$



شکل ۱- منحنی‌های تنش- کرنش محوری برای ترکیبات مختلف کائولن- شن در تنشهای همه جانبه مختلف.



شکل ۲- خط حالت بحرانی در صفحه $q-p'$ برای انواع مصالح مخلوط.

۳- تأثیر مقدار سنگدانه‌ها بر مقاومت برشی در بارگذاریهای استاتیکی

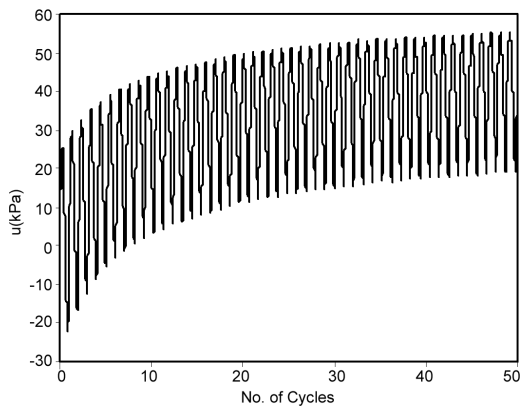
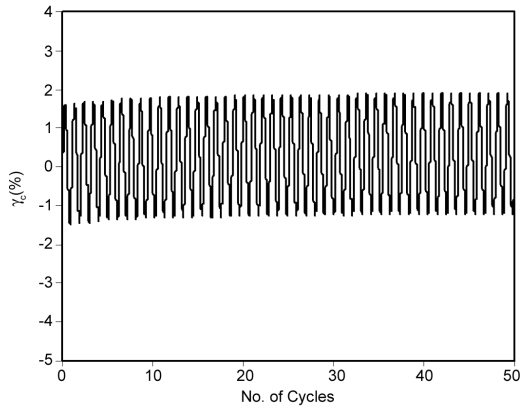
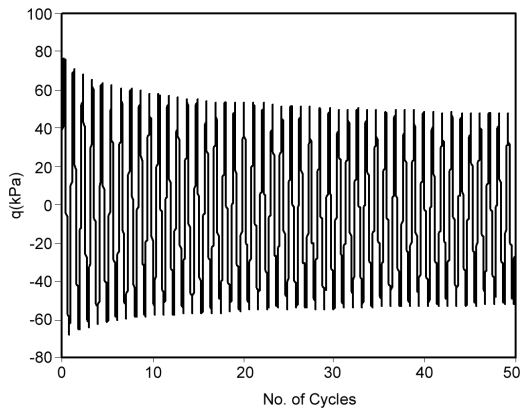
اگرچه هدف اصلی از انجام این تحقیق شناخت رفتار تناوبی رسهای مخلوط بود، لیکن بمنظور درک بهتر رفتار و نیز بدست آوردن خط حالت بحرانی^{۱۸} برای انواع نمونه‌ها، آزمایشهای سه محوری استاتیکی نیز انجام پذیرفت. شکلهای (۱-الف) تا (۱-ت) نشان‌دهنده منحنی‌های تنش- کرنش محوری برای نمونه‌های مختلف در تنشهای همه‌جانبه اولیه، p'_o مختلف می‌باشد. در این شکلها، q تنش انحراف‌آور^{۱۹} بوده و به وسیله رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (۱)$$

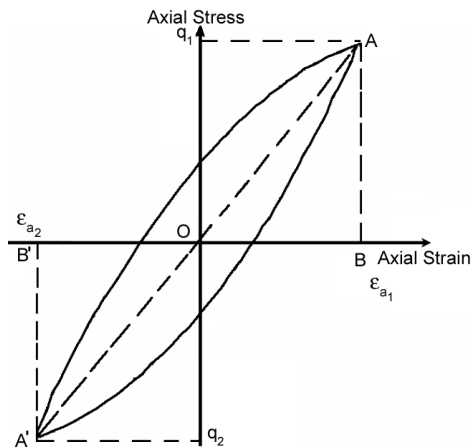
در رابطه (۱) σ'_1 و σ'_3 تنشهای مؤثر اصلی می‌باشند. در جدول (۳) مقادیر q و تنش مؤثر میانگین^{۲۰}، $p' = \left(\frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \right)$ در حالت گسیختگی^{۲۱} برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۳: خلاصه نتایج آزمایشهای سه‌محوری استاتیکی.

نمونه	تنش همه جانبه (kPa)	q_{cs} (kPa)	p'_{cs} (kPa)	ϕ (°)
K100	۱۰۰	۱۰۷/۸۵	۹۷/۹۸	۲۴/۷
	۳۰۰	۲۰۵/۱۵	۲۰۷/۸۳	
	۵۰۰	۳۳۹/۴۴	۳۵۲/۰۷	
K80	۱۰۰	۱۱۷/۰۴	۱۰۰/۹۹	۲۵/۳
	۳۰۰	۲۲۴/۲۴	۲۱۸/۰۷	
	۵۰۰	۳۵۴/۷۷	۳۶۵/۳۶	
K60	۱۰۰	۱۱۸/۶۹	۹۹/۶۳	۲۸/۸
	۳۰۰	۲۳۶/۵۱	۲۰۴/۷۳	
	۵۰۰	۳۴۳/۵۶	۳۰۱/۹۳	
K40	۱۰۰	۱۵۶/۵۳	۱۱۰/۶۰	۳۲/۵
	۳۰۰	۲۶۰/۹۸	۱۷۲/۹۳	
	۵۰۰	۳۶۶/۷۴	۲۹۹/۴۹	



شکل ۳- نتایج آزمایش بارگذاری سه محوری تناوبی بر روی نمونه K80 برای تنش همه جانبه اولیه 100 kPa و دامنه کرنش برشی $1/5$ درصد.



شکل ۴- نحوه تعیین مدول برشی و نسبت میرایی در بارگذاری تناوبی.

در رابطه (۲)، M شیب خط حالت بحرانی می‌باشد [۱۶]. مقادیر زاویه ϕ ارائه شده در جدول (۳) بیانگر این مطلب است که برای مخلوطهای کائولن- شن با افزایش سنگدانه‌ها، مقاومت برشی (اگرچه به مقدار اندک) افزایش می‌یابد. مطابق جدول (۳) با افزودن 60% سنگدانه به کائولن، زاویه ϕ حدود 8° افزایش می‌یابد. نتایج این آزمایشها که در حوزه بارگذاری استاتیکی (و نه تناوبی) بدست آمده است، بخوبی با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد.

۴- رفتار مصالح مخلوط در بارگذاریهای تناوبی

آزمایشهای سه محوری تناوبی کنترل کرنش در دامنه‌های مختلف و همچنین در تنش‌های همه جانبه متفاوت بر روی هر نمونه انجام گردید. کلیه آزمایشهای سه محوری تناوبی انجام شده در این تحقیق بر مبنای استاندارد *ASTM D3999* [۱۷] انجام پذیرفت. جدول (۲) مشخصات آزمایشهای تناوبی انجام گرفته بر روی هر نمونه را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از نتایج برای آزمایش بارگذاری تناوبی بر روی نمونه K80 که در تنش همه‌جانبه اولیه 100 kPa و دامنه کرنش برشی برابر $1/5\%$ صورت گرفته، در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، تنش انحراف آور، q کاهش و فشار آب منفذی، u افزایش می‌یابد. این روند بطور معمول در تمام آزمایشها مشاهده گردید. در این بخش تأثیر مقدار سنگدانه‌ها بر مدول برشی، نسبت میرایی و فشار آب منفذی بعنوان مشخصه‌هایی از رفتار تناوبی مصالح مخلوط، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- تأثیر مقدار سنگدانه بر مدول برشی و نسبت میرایی

مدول برشی و نسبت میرایی از مهمترین خواص تغییرشکل دینامیکی خاک هستند که در تحلیل‌های دینامیکی کاربرد وسیعی دارند و تغییرات آنها وابسته به عواملی نظیر سطح کرنش برشی در نمونه و حتی تعداد سیکل‌های بارگذاری می‌باشد. در شکل (۴) و روابط (۳)، (۴) و (۵) نحوه محاسبه مدول برشی و نسبت میرایی مطابق استاندارد *ASTM D3999* [۱۷] ارائه شده است.

$$E = \frac{|q_1| + |q_2|}{|\varepsilon_{a1}| + |\varepsilon_{a2}|} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$D = \frac{A_L}{2\pi(A_{OAB} + A_{OA'B'})} \quad (5)$$

در روابط فوق و شکل (۴)، E مدول الاستیسیته (شیب خط OA در شکل (۴))، $|q_1|$ و $|q_2|$ به ترتیب قدر مطلق دامنه تنش

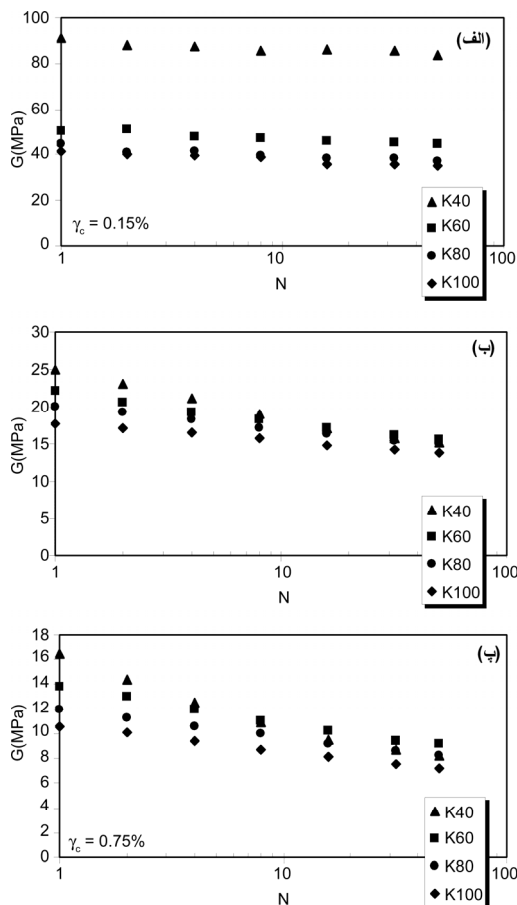
کائولن شن با افزایش کرنش برشی مدول برشی کاهش و نسبت میرایی افزایش می‌یابد. همانطور که در این شکلها مشاهده می‌شود با افزودن مصالح دانه‌ای به یک محیط چسبنده^{۲۴} (و عبارتی با کاهش خاصیت خمیری مخلوط) مدول برشی و نسبت میرایی هر دو افزایش می‌یابند، بطوریکه نمونه‌های *K40* دارای بیشترین مدول برشی و نسبت میرایی و نمونه‌های کائولن خالص یعنی *K100* دارای کمترین مدول برشی و نسبت میرایی می‌باشند. البته این روند مخصوصاً برای مدول برشی در کرنشهای کم از وضوح بیشتری برخوردار است. این نتایج با مطالعات وستیک^{۲۵} و دوبری^{۲۶} [۱۸] بر روی تأثیر خواص خمیری خاک بر خصوصیات تغییر شکل دینامیکی خاک، کاملاً مطابقت دارند. شکل (۷) نشان دهنده تغییرات مدول برشی برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای مخلوطهای کائولن شن در کرنشهای برشی مختلف و در تنش همه‌جانبه 100 kPa می‌باشد (رفتار در سایر تنش‌های همه‌جانبه نیز مشابه می‌باشد). همانطور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌گردد، در کرنش برشی کم یعنی 0.15% درصد در کلیه نمونه‌ها مدول برشی وابسته به تعداد

انحراف‌آور در بارگذاری و باربرداری، $|\varepsilon_{a1}|$ و $|\varepsilon_{a2}|$ به ترتیب قدرمطلق دامنه کرنش محوری در بارگذاری و باربرداری، G مدول برشی، ν ضریب پواسون (که برای بارگذاری در شرایط زهکشی نشده برابر 0.5 در نظر گرفته می‌شود)، D نسبت میرایی و A_L ، A_{OAB} و $A_{OAB'}$ به ترتیب مساحت حلقه هیسترتیک^{۲۳}، مساحت مثلث OAB و مساحت مثلث OAB' می‌باشند. مطابق رابطه (۵)، نسبت میرایی، نسبت انرژی تلف شده در نمونه به انرژی الاستیک جذب شده توسط نمونه می‌باشد.

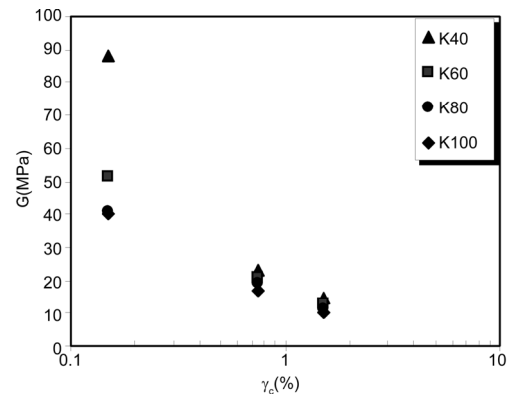
در شکل‌های (۵) و (۶)، تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی برحسب کرنش برشی در مخلوطهای کائولن شن برای سیکل دوم بارگذاری در تنش همه‌جانبه 100 kPa ارائه گردیده است (رفتار در سایر تنش‌های همه‌جانبه مشابه می‌باشد). در این شکلها مقدار کرنش برشی، γ_c مطابق استاندارد *ASTM D3999* [۱۷] از رابطه زیر محاسبه گردیده است:

$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_a \quad (۶)$$

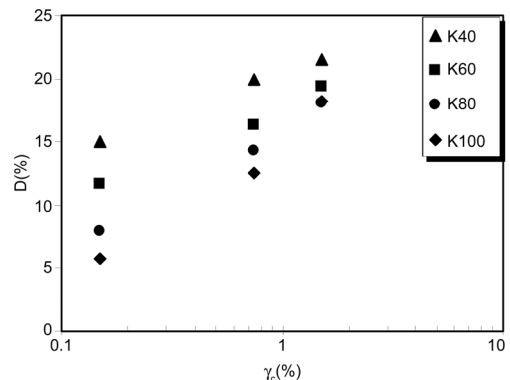
در رابطه (۶)، ε_a کرنش محوری می‌باشد. شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهند که مانند سایر خاکها برای انواع مخلوطهای



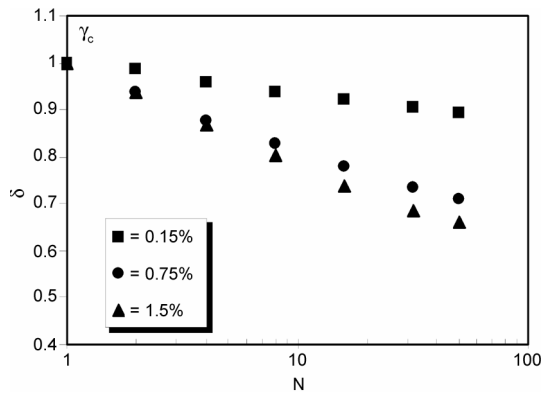
شکل ۷- تغییرات مدول برشی برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری در کرنشهای برشی مختلف و در تنش همه‌جانبه اولیه 100 kPa .



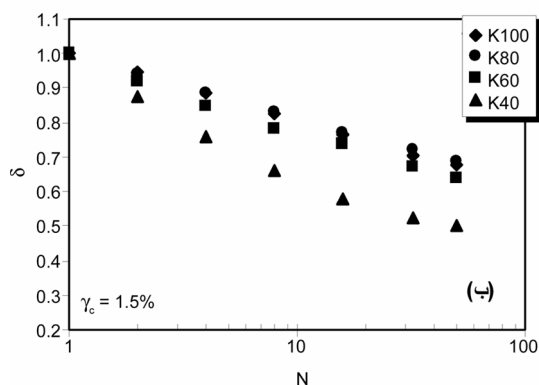
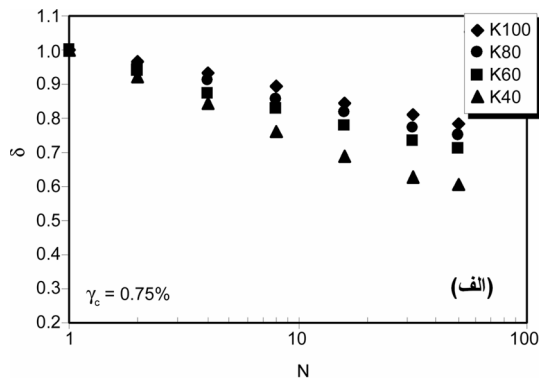
شکل ۵- تغییرات مدول برشی برحسب کرنش برشی در مصالح مخلوط برای سیکل دوم بارگذاری و در تنش همه‌جانبه اولیه 100 kPa .



شکل ۶- تغییرات نسبت میرایی برحسب کرنش برشی در مصالح مخلوط برای سیکل دوم بارگذاری و در تنش همه‌جانبه اولیه 100 kPa .



شکل ۸- تغییرات نشانه زوال، δ برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای نمونه K60 در کرنش‌های برشی مختلف و در تنش همه جانبه اولیه $100 kPa$.



شکل ۹- تغییرات نشانه زوال، δ برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای سطوح کرنش برشی ۰/۷۵ درصد و ۱/۵ درصد.

برشی افزایش می‌یابد لیکن نرخ کاهش مدول برشی (با تعداد سیکل‌ها) در مصالح مخلوط حاوی سنگدانه‌های بیشتر به مراتب بیش از مصالح مخلوط حاوی سنگدانه‌های کمتر است. اینگونه رفتار می‌تواند ناشی از تولید فشار آب منفذی اضافی بیشتر در مصالح مخلوط حاوی سنگدانه‌های بیشتر باشد که در بخش بعدی مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

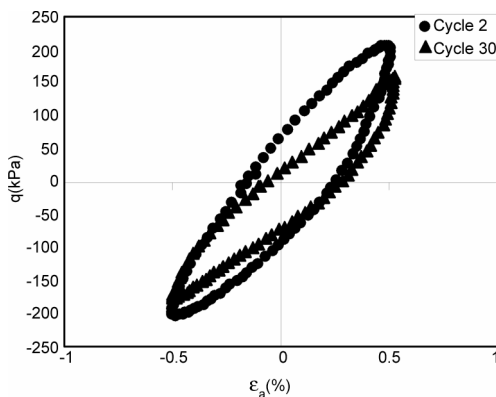
شکل (۱۰) نشانگر تغییرات نسبت میرایی برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای مخلوط‌های کائولن شن در کرنش‌های برشی مختلف و در تنش همه جانبه $100 kPa$ می‌باشد (رفتار در سایر تنش‌های همه جانبه مشابه می‌باشد). همانگونه که در

سیکل‌های بارگذاری نمی‌باشد و علاوه بر این با افزایش مقدار سنگدانه‌ها، مدول برشی افزایش یافته است بطوریکه نمونه K40 دارای بیشترین مدول برشی و نمونه K100 دارای کمترین مدول می‌باشد. در کرنش‌های برشی بالاتر یعنی ۰/۷۵٪ و ۱/۵٪ رفتار (در مقایسه با کرنش برشی کم) کاملاً متفاوت است. همانگونه که در شکل‌های (۷-ب) و (۷-پ) مشاهده می‌شود در کرنش‌های بالا، اولاً مقدار مدول برشی در انواع مصالح مخلوط تابع تعداد سیکل‌ها می‌باشد بطوریکه با افزایش تعداد سیکل‌ها مدول برشی کاهش می‌یابد (اینگونه رفتار می‌تواند ناشی از افزایش فشار آب منفذی در سیکل‌های بالاتر بارگذاری باشد که در بخش بعدی به آن اشاره می‌گردد) و ثانیاً تا قبل از حدود سیکل دهم بارگذاری، با افزایش مقدار سنگدانه مدول برشی افزایش می‌یابد لیکن بعد از سیکل دهم، بدلیل کاهش زیاد مدول برشی در مصالح مخلوط حاوی سنگدانه‌های بیشتر عملاً تفاوت بین مدول برشی در انواع مصالح مخلوط ناچیز می‌گردد، بطوریکه بعنوان مثال در سیکل‌های بالاتر از سیکل دهم، مدول برشی برای نمونه‌های K80 و K40 تقریباً یکسان است. بمنظور کمی کردن این موضوع کفایت تغییرات نشانه زوال δ [۱۹] یعنی δ را در نمونه‌های مختلف محاسبه نمود. پارامتر δ بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\delta = \frac{G_N}{G_1} \quad (7)$$

در رابطه (۷) G_1 و G_N بترتیب مدول برشی در سیکل N ام و سیکل اول بارگذاری می‌باشند. در شکل (۸) تغییرات δ بر حسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای نمونه K60 برای سطوح مختلف کرنش برشی و در تنش همه جانبه $100 kPa$ ترسیم گردیده است (تغییرات δ برای سایر نمونه‌ها و در سایر تنش‌های همه جانبه نیز از روندی مشابه شکل (۸) تبعیت می‌کند). همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، مقدار δ وابسته به تعداد سیکل‌های بارگذاری و سطح کرنش برشی می‌باشد بطوریکه با افزایش تعداد سیکل‌ها و نیز افزایش سطح کرنش برشی در نمونه، مقدار δ کاهش یافته است. در شکل (۹) تغییرات δ برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای سطوح کرنش برشی ۰/۷۵٪ و ۱/۵٪ در مخلوط‌های کائولن- شن ارائه گردیده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد با افزایش مقدار سنگدانه‌ها، مقدار δ با شدت بیشتری کاهش می‌یابد بطوریکه نمونه‌های K80 و K100 دارای بیشترین مقادیر δ و نمونه‌های K40 دارای کمترین مقادیر δ می‌باشند. روند تغییرات مدول برشی ارائه شده در شکل‌های (۷-ب)، (۷-پ) و (۹) بیانگر این مطلب است که اگرچه با افزودن سنگدانه‌ها به یک محیط چسبنده مقدار مدول

همچنین با توجه به کاهش مدول برشی در سیکل سی‌ام نسبت به سیکل (به خوابیده‌تر شدن حلقه بارگذاری سیکل سی‌ام نسبت به دوم سیکل دوم در شکل (۱۱) توجه گردد) نمونه در سیکل سی‌ام عملاً انرژی کمتری نسبت به سیکل دوم بارگذاری جذب می‌کند. بنابراین نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) بیانگر این مطلب است که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، که تقریباً نمونه انرژی کمتری نیز جذب می‌کند، بهمان نسبت نیز انرژی کمتری در نمونه تلف می‌گردد، بطوریکه مطابق رابطه (۵) عملاً نسبت میرایی خیلی کم تغییر می‌کند.

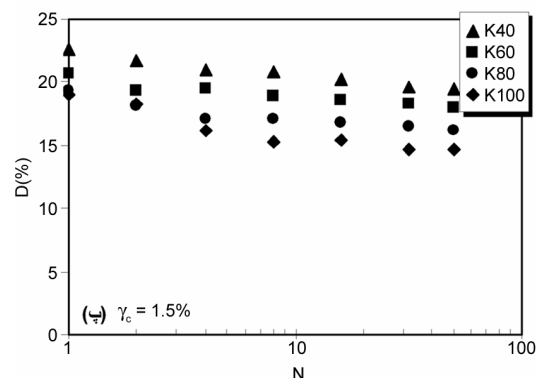
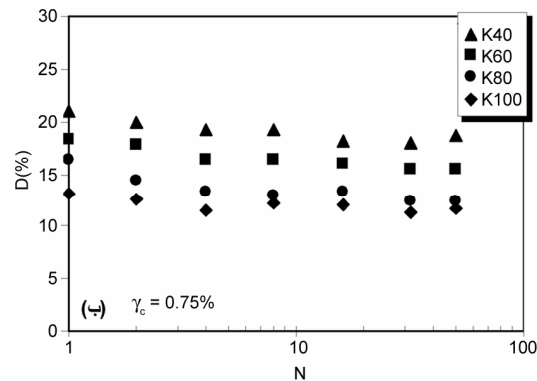
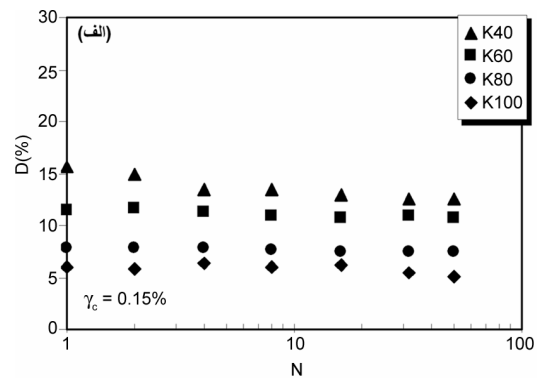


شکل ۱۱- نمودار تنش انحراف‌آور- کرنش محوری برای سیکل‌های دوم و سی‌ام بارگذاری تناوبی بر روی نمونه $K80$ برای دامنه کرنش برشی 0.15% و تنش همه جانبه اولیه $50.0 kPa$.

۴-۲- تأثیر سنگدانه‌ها بر فشار آب منفذی تولیدشده در بارگذاری تناوبی

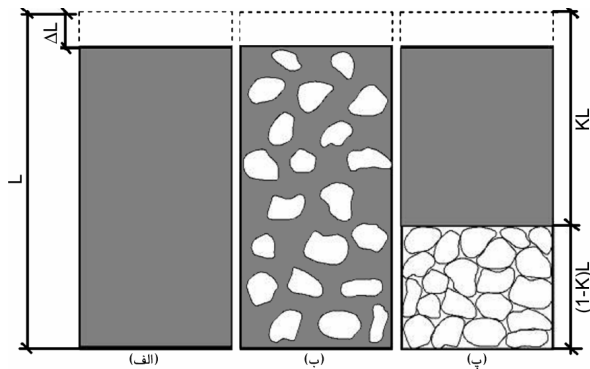
تأثیر سنگدانه‌ها بر تغییرات فشار آب منفذی تولید شده در مصالح مخلوط مورد استفاده در این تحقیق، بتفصیل در مرجع [۱۱] ارائه شده است. لیکن بدلیل اینکه شناخت کامل علل تغییرات مدول برشی، نشانه زوال و نسبت میرایی نیازمند شناخت تغییرات فشار آب منفذی است، در این بخش اشاره‌ای به نحوه تغییرات فشار آب منفذی در مصالح مخلوط می‌گردد. همانگونه که بعنوان مثال برای نمونه $K80$ در شکل (۳) مشاهده گردید، بطور معمول با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری، فشار آب منفذی نیز افزایش می‌یابد. شکل (۱۲) نشان دهنده تغییرات فشار آب منفذی تراز شده پس‌ماند u_r^* ، برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای ترکیبات مختلف کائولن شن و برای سطوح کرنش برشی 0.15% ، 0.75% و 1.5% و در تنش همه جانبه $100 kPa$ می‌باشد (رفتار در سایر تنش‌های همه جانبه نیز مشابه است). در u_r^* حقیقت مقدار فشار آب منفذی اضافی تراز شده به تنش اولیه همه‌جانبه است که برای هر سیکل بارگذاری در جایی که کرنش برشی صفر می‌گردد (یعنی در وسط هر سیکل) محاسبه می‌شود.

این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار سنگدانه‌ها، نسبت میرایی افزایش یافته است. علاوه بر این مطابق شکل (۱۰) در انواع مصالح مخلوط آزمایش شده، تا قبل از سیکل هشتم بارگذاری نسبت میرایی بمقدار کمی کاهش یافته و بعد از آن عملاً نسبت میرایی تغییری نمی‌کند. علت این رفتار در شکل (۱۱) شرح داده شده است. در این شکل بعنوان نمونه نمودار تنش انحراف‌آور کرنش محوری برای سیکل‌های دوم و سی‌ام بارگذاری تناوبی بر روی نمونه $K80$ برای دامنه کرنش برشی 0.15% و تنش همه‌جانبه اولیه $50.0 kPa$ ترسیم گردیده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود مساحت حلقه هیسترتیک (که نشان دهنده انرژی تلف شده می‌باشد) در سیکل سی‌ام کمتر از مساحت مربوطه در سیکل دوم است.



شکل ۱۰- تغییرات نسبت میرایی برحسب تعداد سیکل‌های بارگذاری در کرنش‌های برشی مختلف و در تنش همه‌جانبه اولیه $100 kPa$.

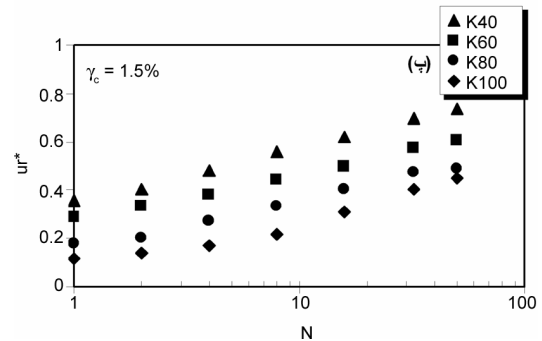
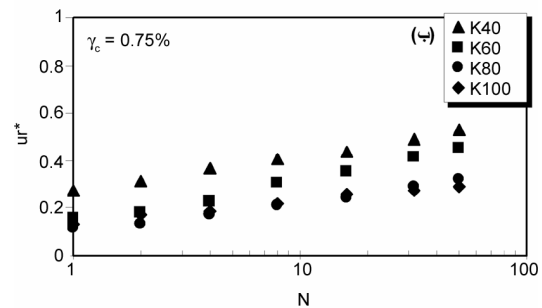
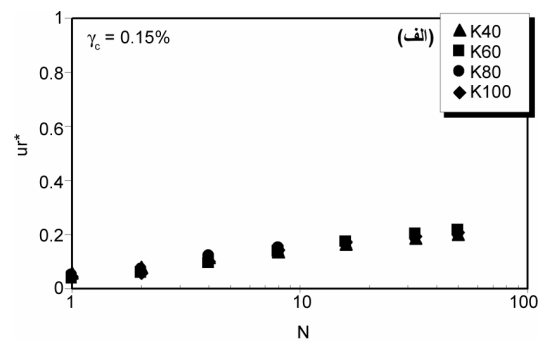
می‌گردد و بدیهی است که در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های بیشتر، بخش چسبنده تغییرشکل‌های بیشتری را متحمل گردیده و در نتیجه فشار آب‌منفذی نیز افزایش می‌یابد. این مطلب در شکل (۱۳) نیز شرح داده شده است. شکل (۱۳-الف) یک نمونه کائولن خالص به ارتفاع L که باندازه ΔL بصورت محوری تغییر شکل داده را نشان می‌دهد. بنابراین برای این نمونه کرنش



شکل ۱۳- نحوه ایجاد کرنش محوری در کائولن خالص و مصالح مخلوط کائولن سنگدانه. (الف) کائولن خالص، (ب) مصالح مخلوط، (پ) مدل ایده‌آل مصالح مخلوط (فرض می‌گردد که اسکلت دانه‌ای دچار تغییر شکل نمی‌گردد).

محوری برابر با $\frac{\Delta L}{L}$ می‌باشد. همچنین برای یک نمونه از مصالح مخلوط با درصد حجمی کائولن برابر K (شکل ۱۳-ب) که تحت همان تغییر شکل محوری ΔL قرار می‌گیرد نیز مقدار کرنش محوری برابر $\frac{\Delta L}{L}$ می‌باشد. حال اگر فرض گردد که سنگدانه‌های موجود در مصالح مخلوط در محیط چسبنده غوطه‌ور بوده (که البته این فرض برای مصالح مخلوط مورد آزمایش در این تحقیق صادق می‌باشد [۱۲]) و علاوه بر این کلیه تغییر شکل‌های نمونه بصورت همگن در محیط چسبنده بوقوع بپیوندد (بدلیل تراکم ناپذیر بودن سنگدانه‌ها در مقایسه با کائولن)، آنگاه می‌توان نمونه نشان داده شده در شکل (۱۳-ب) را بصورت شکل (۱۳-پ) مدل نمود. در شکل (۱۳-ب) باید به این نکته توجه داشت که کل تغییر شکل اعمالی یعنی ΔL در محیط چسبنده بوقوع می‌پیوندد. مطابق شکل (۱۳-ب)، مقدار کرنش محوری ایجاد شده در محیط چسبنده برابر است با $\frac{\Delta L}{KL}$ و چون $K < 1$ می‌باشد، مقدار کرنش محوری ایجاد شده در محیط چسبنده یک مصالح مخلوط بیشتر از کرنش ایجاد شده در کائولن خالص (یعنی $\frac{\Delta L}{L}$) می‌باشد. از آنجاییکه طبق رابطه (۶) کرنش برشی رابطه مستقیمی با کرنش محوری دارد، بنابراین کرنش برشی بیشتری نیز در بخش چسبنده مصالح مخلوط حاوی سنگدانه بیشتر نسبت به بخش چسبنده مصالح

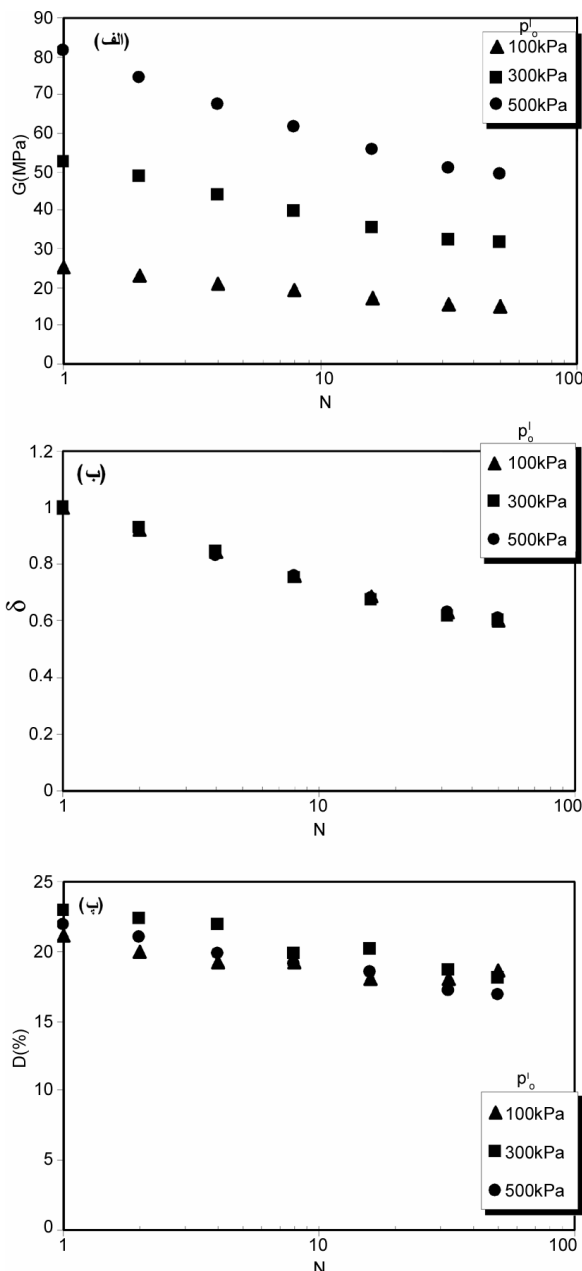
همانگونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد در انواع نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکلهای بارگذاری، فشار آب منفذی افزایش یافته است. همچنین در شکل (۱۲) یک روند کلی در رفتار مصالح مخلوط (مخصوصاً در کرنشهای بیش از ۰/۱۵٪) قابل تشخیص است بطوریکه عموماً افزودن سنگدانه‌ها به محیط چسبنده سبب افزایش فشار آب‌منفذی می‌گردد. در این حالت در نمونه‌های کائولن خالص یعنی $K100$ دارای کمترین مقدار بوده و برای نمونه‌های $K40$ دارای بیشترین مقدار می‌باشد. علاوه بر این، شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش سطح کرنش برشی روند ذکر شده از وضوح بیشتری برخوردار است.



شکل ۱۲- تغییرات فشار آب‌منفذی تراز شده پس‌ماند برحسب تعداد سیکلهای بارگذاری در کرنشهای برشی مختلف و در تنش همه جانبه اولیه $100 kPa$.

اینکه در مصالح مخلوط افزودن سنگدانه‌ها به محیط چسبنده سبب افزایش فشار آب‌منفذی می‌گردد، تعبیر ساده‌ای دارد. از آنجاییکه میزان تغییر شکل‌پذیری کائولن بسیار بیشتر از هر دانه شنی است، بنابراین در هنگام بارگذاری کلیه تغییر شکل‌های نمونه در بخش چسبنده مصالح مخلوط متمرکز

نشانه زوال ندارد. علاوه بر این شکل (۱۴-پ) نشان می‌دهد که نسبت میرایی نیز برای مصالح مخلوط آزمایش شده وابسته به تنش همه جانبه اولیه نمی‌باشد.



شکل ۱۴- تأثیر تنش همه جانبه بر مدول برشی، نشانه زوال و نسبت میرایی.

۵- کاربرد نتایج تحقیق در سدهای خاکی

براساس نتایج این تحقیق می‌توان جهت‌گیری کلی در مورد نحوه طرح و اجرای سدهای خاکی دارای هسته‌ای از جنس مصالح مخلوط را ارائه نمود. در شکل (۱۵) بعنوان نمونه مسیر تنش برای نمونه‌های کائولن خالص ($K100$) و نمونه $K40$ (به عنوان معرفی از رفتار مصالح مخلوط) برای سطح کرنش برشی $1/5\%$ و تنش همه‌جانبه اولیه $300kPa$ ارائه گردیده است.

مخلوط حاوی سنگدانه کمتر بوقوع می‌پیوندد و چون عملاً این تغییر شکل بخش چسبنده است که سبب تولید فشار آب منفذی می‌گردد بنابراین با افزایش سنگدانه‌ها در یک محیط چسبنده، فشار آب منفذی اضافی نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این می‌توان نشان داد [۱۱] که حضور دانه‌ها در یک محیط چسبنده سبب ایجاد محیطی غیرهمگن از لحاظ میدان کرنش و تنش می‌شود که این پدیده نیز به نوبه خود سبب افزایش فشار آب منفذی در مصالح مخلوط حاوی دانه‌های بیشتر می‌شود. روند تغییرات فشار آب منفذی در مصالح مخلوط (شکل (۱۲)) به خوبی با روند تغییرات مدول برشی (شکل‌های (۷-ب) و (۷-پ)) و متعاقباً نشانه زوال (شکل (۹)) همخوانی دارد. مطابق شکل (۱۲) با افزایش مقدار سنگدانه‌ها فشار آب منفذی افزایش و متعاقباً تنش مؤثر همه جانبه نیز کاهش می‌یابد. بنابراین بدیهی است که با افزایش مقدار سنگدانه‌ها، دلیل کاهش تنش مؤثر همه جانبه (در حین آزمایش) مقادیر مدول برشی و δ نیز با شدت بیشتری کاهش می‌یابند (شکل‌های (۷-ب)، (۷-پ) و (۹) مشاهده گردد). شایان ذکر است که روند تغییرات فشار آب‌منفذی در مخلوط‌های کائولن شن به گونه‌ای است که می‌توان با ارائه یک مدل ریاضی مناسب، فشار آب منفذی را بعنوان تابعی از دامنه کرنش برشی، تعداد سیکل‌های بارگذاری، درصد سنگدانه‌ها و تنش همه جانبه اولیه بیان نمود [۲۰].

۴-۳- تأثیر تنش همه جانبه اولیه بر خصوصیات تناوبی مصالح مخلوط

به منظور مشاهده تأثیر تنش همه‌جانبه اولیه بر خصوصیات تناوبی مصالح مخلوط، آزمایش‌ها در تنش‌های همه‌جانبه متفاوت $100kPa$ ، $300kPa$ و $500kPa$ انجام پذیرفت. در این بخش تأثیر تنش همه‌جانبه اولیه بر مدول برشی، نشانه زوال و نسبت میرایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا بعنوان نمونه تأثیر تنش همه‌جانبه اولیه بر خصوصیات تناوبی در نمونه $K40$ برای سطح کرنش برشی 0.75% ارائه می‌گردد (روند برای سایر نمونه‌ها و در سایر کرنش‌ها نیز مشابه می‌باشد [۱۲]). شکل (۱۴-الف) نشان‌دهنده تأثیر تنش همه‌جانبه اولیه بر مدول برشی می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، افزایش تنش همه جانبه اولیه سبب افزایش مدول برشی می‌گردد. شایان ذکر است که اگرچه با افزایش تنش همه جانبه اولیه، مدول برشی افزایش می‌یابد لیکن به همان نسبت که تنش همه جانبه اولیه افزایش می‌یابد، مدول برشی افزایش نمی‌یابد. در شکل (۱۴-ب) تأثیر تنش همه جانبه اولیه بر نشانه زوال، δ ارائه گردیده است. مطابق این شکل عملاً افزایش تنش همه‌جانبه اولیه تأثیری بر

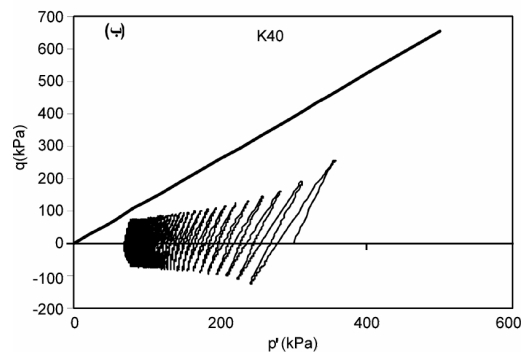
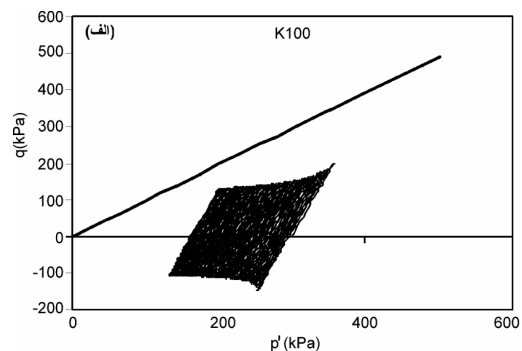
ارتفاع آزاد^{۲۹} سد گردد. علاوه بر این تولید فشار آب منفذی بیشتر در مصالح مخلوط (در مقایسه با رس خالص) می‌تواند سبب کاهش ضریب اطمینان سد در برابر لغزش در شیروانیهای بالا دست و پایین دست گردد. علیرغم اینکه برای اظهار نظر قطعی در مورد استفاده از مصالح مخلوط در هسته سدهای خاکی نیاز به کارهای تحقیقاتی گسترده‌تر (بر روی انواع دیگر مصالح مخلوط چسبیده تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی مانند مدلسازی فیزیکی) می‌باشد لیکن استفاده از مصالح مخلوط با درصد اختلاط متغیر بطوریکه با افزایش رقوم در هسته و حرکت بسمت تاج سد درصد رس آن افزایش یابد، می‌تواند بعنوان یک راه‌حل بهینه در شرایط الزام به استفاده از مصالح مخلوط در هسته سد مطرح گردد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج یک تحقیق جامع آزمایشگاهی بر روی عمدتاً خواص تغییر شکل تناوبی (شامل مدول برشی و نسبت میرایی) مصالح مخلوط متراکم معرفی گردید. جهت تحقق این برنامه تحقیقاتی نمونه‌هایی از کائولن و ترکیب ۸۰٪ کائولن با ۲۰٪ شن، ۶۰٪ کائولن با ۴۰٪ شن و ۴۰٪ کائولن با ۶۰٪ شن بصورت متراکم و در رطوبتی بیش از رطوبت بهینه تهیه و پس از اشباع، در تنشهای همه جانبه اولیه 100 kPa ، 300 kPa و 500 kPa تحکیم و مورد آزمایش سه محوری زهکشی نشده استاتیکی و تناوبی کنترل کرنش قرار گرفتند. آزمایشهای سه محوری تناوبی کنترل کرنش در سه دامنه کرنش برشی $1/15\%$ ، $1/75\%$ و $1/5\%$ انجام پذیرفت. مهمترین نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- ۱- آزمایشهای سه محوری استاتیکی مشخص ساخت که با افزودن سنگدانه‌ها به یک محیط چسبیده، زاویه مقاومت برشی در حالت بحرانی، ϕ (هرچند اندک) افزایش می‌یابد. مطابق نتایج این تحقیق با افزودن ۶۰٪ سنگدانه به یک محیط چسبیده، زاویه ϕ حدود 8° افزایش می‌یابد؛
- ۲- در کرنش برشی کم یعنی $1/15\%$ مدول برشی در انواع مصالح مخلوط وابسته به تعداد سیکلهای بارگذاری نمی‌باشد و همچنین با افزایش مقدار سنگدانه‌ها مدول برشی افزایش می‌یابد، لیکن در کرنشهای برشی بالا یعنی $1/75\%$ و $1/5\%$ اولاً مدول برشی در انواع مصالح مخلوط تابع تعداد سیکلهای بارگذاری است بطوریکه با افزایش تعداد سیکلهای مدول برشی کاهش می‌یابد و ثانیاً تا قبل از سیکل دهم بارگذاری با افزایش مقدار سنگدانه‌ها مدول برشی افزایش می‌یابد لیکن بعد از سیکل دهم عملاً مدول برشی

همانطور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌گردد اگرچه خط حالت بحرانی در نمونه K40 کمی بالاتر از خط حالت بحرانی برای نمونه K100 قرار می‌گیرد (شکل (۲) مشاهده گردد) لیکن بدلیل تولید فشار آب منفذی بیشتر در نمونه K40 نسبت به نمونه K100 (شکل (۱۲) مشاهده گردد) مسیر تنش برای نمونه K40 (شکل (۱۵-ب)) نسبت به مسیر تنش برای نمونه K100 (شکل (۱۵-الف)) خیلی سریعتر به خط حالت بحرانی نزدیک می‌گردد. این رفتار نتیجه مهمی را دربر دارد. اگرچه افزودن سنگدانه‌ها به محیط چسبیده سبب افزایش زاویه مقاومت برشی در حالت بحرانی، ϕ می‌گردد (جدول (۳) مشاهده گردد)



شکل ۱۵- مسیر تنش در بارگذاری تناوبی برای نمونه‌های K100 و K60 در کرنش برشی $1/5\%$ و تنش همه جانبه اولیه 300 kPa .

لیکن مقاومت تناوبی (نسبت تنش انحراف‌آور به تنش همه‌جانبه اولیه) نسبت به کائولن خالص کاهش می‌یابد. بنابراین با استناد به مطالعات حاضر، در صورت کاربرد مصالح مخلوط بعنوان هسته سدهای خاکی، باید توجه خاصی به رفتار این مصالح (در حالت اشباع) هنگام بارگذاریهای دینامیکی ناشی از زلزله بخصوص در رقوم بالاتر هسته که هم شرایط تنش به خط حالت بحرانی نزدیکتر است و هم بدلیل ایجاد تغییر شکلهای بیشتر، فشار آب منفذی بیشتری نیز تولید می‌شود، مبذول گردد. در این حالت این امکان وجود دارد که بدلیل تولید فشار آب منفذی زیاد در مصالح مخلوط، نشستهای ناشی از زائل شدن فشار آب منفذی (بعد از زلزله) سبب کاهش قابل ملاحظه

- Gravel”, *Journal of Geotechnical Engineering*, **111**, 987-1007.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., and Lundgren, R. (1964). “Fundamental Aspects of Atterberg Limits”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **85**, 87-128.
 - Hsu, T.S. and Saxena, S.K. (1991). “A General Formula for Determining Density of Compacted Soils with Oversized Particles”, *Soils and Foundations*, **31**, 91-96.
 - Day, R.W. (1989). “Relative Compaction of Fills Having Oversized Particles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, **115**, 1487-1491.
 - Shelly, T.L. and Daniel, D.E. (1994). “Closure to Effect of Gravel on Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners”, *Journal of Geotechnical Engineering*, **120**, 937, 1994.
 - Holtz, W.G. and Willard, M. (1956). “Triaxial Shear Characteristics of Clayey Gravel Soils”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **82**, 143-149.
 - Patwardhan, A.S., Rao, J.S., and Gaidhane, R.B. (1970). “Interlocking Effects and Shearing Resistance of Boulders and Large Size Particles in a Matrix of Fines on the Basis of Large Scale Direct Shear Tests”, *Proceedings of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Mechanics*, Singapore, 265-273.
 - Vallejo, L.E. and Zhou, Y. (1994). “The Mechanical Properties of Simulated Soil-Rock Mixtures”, *Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, India, **1**, 365-368.
 - Jafari, M.K. and Shafiee, A. (1998). “Dynamic Behavior of Mixed Materials Used for Core of Karkheh Dam”, *Proceedings of 11th European Conference on Earthquake Engineering*, France, p. 179.
 - Jafari, M.K. and Shafiee, A. (2004). “Mechanical Behavior of Compacted Composite Clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, **41**(6), 1152-1167.

در انواع مصالح مخلوط یکسان می‌گردد؛
 ۳- نرخ کاهش مدول برشی با تعداد سیکلها که با پارامتر نشانه زوال، δ (نسبت مدول برشی در سیکل N ام به مدول برشی در سیکل اول) مشخص می‌شود، برای کلیه نمونه‌ها وابسته به سطح کرنش برشی می‌باشد بطوریکه با افزایش سطح کرنش برشی δ کاهش می‌یابد. علاوه بر این افزایش مقدار سنگدانه‌ها نیز سبب کاهش مقدار δ می‌گردد بطوریکه نمونه‌های کائولن خالص ($K100$) دارای کمترین مقدار δ و نمونه‌های دارای ۶۰٪ سنگدانه ($K40$) دارای بیشترین مقدار δ می‌باشند. این گونه رفتار می‌تواند ناشی از تولید فشار آب منفذی اضافی بیشتر در مصالح مخلوط حاوی سنگدانه بیشتر باشد؛
 ۴- در انواع مصالح مخلوط، با افزایش مقدار سنگدانه‌ها نسبت میرایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این تا قبل از سیکل هشتم بارگذاری، با افزایش تعداد سیکلها نسبت میرایی به مقدار کمی کاهش می‌یابد و بعد از آن عملاً نسبت میرایی تغییری نمی‌کند؛
 ۵- با افزایش سنگدانه‌ها در مصالح مخلوط، فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. این رفتار می‌تواند ناشی از افزایش تغییر شکل بخش چسبنده مصالح مخلوط حاوی سنگدانه‌های بیشتر باشد؛
 ۶- برای انواع مصالح مخلوط آزمایش شده در این تحقیق، با افزایش تنش همه جانبه اولیه، مدول برشی افزایش می‌یابد لیکن نشانه زوال و نسبت میرایی وابسته به تنش همه جانبه اولیه نمی‌باشند؛
 ۷- با توجه به اینکه با افزودن سنگدانه به یک محیط چسبنده، فشار آب منفذی بیشتری در بارگذاریهای تناوبی تولید می‌گردد، بنابراین در صورت نیاز به استفاده از مصالح مخلوط در هسته سدهای خاکی بجای رس خالص، باید احتیاطهای لازم جهت کنترل پایداری و تغییر شکلهای ایجاد شده در سد در هنگام بارگذاریهای دینامیکی ناشی از زلزله (و بعد از آن) صورت پذیرد.

مراجع

- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1989). “Moraine as Embankment and Foundation Material”, Bulletin 69, Paris, France.
- Garga, V.K. and Madureira, C.J. (1985). “Compaction Characteristics of River Terrace

علائم

12. شفیعی، علی (1381). "بررسی رفتار استاتیکی و تناوبی رس‌های مخلوط متراکم با نگرشی ویژه به تغییرات فشار آب منفذی"، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- D : نسبت میرایی
 E : مدول الاستیسیته
 G : مدول برشی
 G_I : مدول برشی در سیکل اول بارگذاری
 G_N : مدول برشی در سیکل N ام بارگذاری
 K : درصد حجمی کائولن در مصالح مخلوط
 L : ارتفاع نمونه
 M : شیب خط حالت بحرانی
 N : شماره سیکل بارگذاری
 p'_0 : تنش همه جانبه اولیه
 p' : تنش مؤثر میانگین
 p'_{cs} : تنش مؤثر میانگین در حالت بحرانی
 q : تنش انحراف‌آور
 q_1 : دامنه تنش انحراف‌آور
 q_2 : دامنه تنش انحراف‌آور
 q_{cs} : تنش انحراف‌آور در حالت بحرانی
 u : فشار آب منفذی
 u^* : فشار آب منفذی تراز شده به تنش همه جانبه اولیه

علائم یونانی

- AL : تغییر شکل محوری نمونه
 δ : نشانه زوال
 ϵ_a : کرنش محوری
 ϵ_{a1} : دامنه کرنش محوری
 ϵ_{a2} : دامنه کرنش محوری
 ϕ : زاویه مقاومت برشی در حالت بحرانی
 γ_c : کرنش برشی تناوبی
 ν : ضریب پواسون

واژه‌نامه‌ها

- | | |
|-----------------------|---------------------------------------|
| 1- Moraine | 2- Composite clays |
| 3- Broadly graded | 4- Arching |
| 5- Compressibility | 6- Aggregate |
| 7- Holtz | 8- Willard |
| 9- Apparent cohesion | 10- Patwardhan |
| 11- Vallejo | 12- Zhou |
| 13- Cyclic strength | 14- Plasticity index |
| 15- Commercial kaolin | 16- Specific gravity |
| 17- Gap graded | 18- Critical state line |
| 19- Deviatoric stress | 20- Mean effective stress |
| 21- Failure | 22- Angle of shearing resistance |
| 23- Hysteretic | 24- Cohesive matrix |
| 25- Vucetic | 26- Dobry |
| 27- Degradation index | 28- Normalized residual pore pressure |
| 29- Free board | |

13. ASTM (1991). "Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (D698-91)", In ASTM Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa.
14. Rashidian, M. (1995). "Undrained Shearing Behavior of Gravelly Sands and Its Relation with Shear Wave Velocity", Ph.D. Thesis, University of Tokyo.
15. Matasovic, N. and Vucetic, M. (1992). "A Pore Pressure Model for Cyclic Straining of Clay", *Soils and Foundations*, **32**(3), 156-173.
16. Roscoe, K.H. and Burland, J.B. (1968). "On the Generalized Stress-Strain Behaviour of Wet Clay", In Engineering Plasticity, Edited by Heyman, J. and Leckie, F.A. Cambridge University Press, Cambridge, 535-609.
17. ASTM (1999). "Standard Test Method for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus (D3999-91)", In ASTM Annual Book of Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa.
18. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**, 89-107.
19. Idriss, I.M., Dobry, R., and Singh, R.D. (1978). "Nonlinear Behavior of Soft Clays during Cyclic Loading", *Journal of Geotechnical Engineering*, **104**, 1427-1447.
20. Shafiee, A. and Jafari, M.K. (2004). "A Pore Pressure Model for Cyclic Straining of Composite Clays", *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, University of California, Berkeley, **1**, 516-523.