

# رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت

حسین سلطانی جیغه<sup>i</sup>؛ عباس سروش<sup>ii</sup>

چکیده

خاک‌های رسی مخلوط (Mixed Clayey Soils) متشکل از مصالح چسبنده و دانه‌ای به وفور در طبیعت یافت می‌شوند و به علت تفاوت در درصد نسبی مصالح چسبنده و دانه‌ای موجود در آنها بافت و ساختار متفاوتی دارند. با توجه به گسترش کاربرد این خاک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک، شناخت رفتار مکانیکی و تعیین خواص آنها ضروری است. بدین منظور، آزمایش‌های سه‌محوری یکنواخت (Monotonic) زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های متراکم رس خالص، مخلوط رس - ماسه<sup>۱</sup> و رس - شن<sup>۲</sup> انجام یافت. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در نمونه‌ها، به درصد مصالح دانه‌ای (ماسه یا شن) در خاک مخلوط و اندازه آنها بستگی دارد. به طوری که با افزایش درصد مصالح دانه‌ای و کوچکتر شدن اندازه دانه‌ها فشار آب حفره‌ای بیشتری در مخلوط ایجاد می‌شود. همچنین نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که مدول تغییرشکل سکانت نیز تابعی از درصد مصالح دانه‌ای بوده و با افزایش درصد مصالح دانه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی

خاک‌های رسی مخلوط، آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده، بارگذاری یکنواخت

## *Behavior of Mixed Clayey Soils under Monotonic Loading*

H. Soltani-Jigheh; A. Soroush

### ABSTRACT

Mixed clayey soils comprising cohesive and granular materials exist extensively in nature. The fabric of these soils depends very much on the relative volume of granular materials to cohesive soils. Considering broad application of such soils in geotechnical engineering projects, their mechanical behavior and characteristics should be studied and identified. For this purpose, a set of undrained isotropically consolidated triaxial tests with monotonic loading carried out on a number of mixed clayey soil samples with different percentages of sands and gravels. The results of the tests showed that shear strength and excess pore water pressures increase as the sand/gravel content in the specimens increases. For the specimens with equal volume granular contents, shearing-induced excess pore water pressures are higher when the size of the grains decreases (sand versus gravel). The results also showed that the secant modulus of deformation of the specimens increases with increasing the sand (gravel) content.

### KEYWORDS

Mixed clayey soils, undrained triaxial test, monotonic loading

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تلفن: ۰۹۱۲-۲۲۰۴۷۳۳ و

hsoltani@aut.ac.ir، پست الکترونیکی: ۰۲۱-۶۴۵۴۳۰۷۳

<sup>ii</sup> عباس سروش، دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تلفن: ۰۲۱-۶۶۴۰۰۲۳۳، نمابر:

soroush@aut.ac.ir، پست الکترونیکی: ۰۲۱-۶۶۴۱۴۲۱۳

بر روی نمونه‌های مخلوط ماسه توپورا و رس کاوازاکی انجام دادند. شکل (۱-الف) نشان می‌دهد که نسبت فشار آب حفره‌ای به تنش محصورکننده ( $\Delta u/\sigma'_v$ ) برای نسبت تنش برشی به مقاومت برشی زهکشی‌نشده استاتیکی ( $\tau/c_u$ ) کوچکتر از ۰/۵ مستقل از نشانه خمیری ( $I_p$ ) (یا به عبارتی درصد ماسه) و تقریباً ثابت است؛ اما مقدار  $\Delta u/\sigma'_v$  برای نسبت  $\tau/c_u = ۰/۶۵$  و  $I_p < ۲۰$  (درصد ماسه زیاد) سریعاً افزایش می‌یابد. شکل (۱-ب) نیز نمودار فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ ) تراز شده به فشار تحکیمی مؤثر ( $\sigma'_{ve}$ ) برحسب کرنش محوری در آزمایش‌های سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده (CIUC) و کششی زهکشی‌نشده (CIUE) انجام یافته توسط کامی و ناکاسه (۱۹۸۳) [۴] را نشان می‌دهد. در این شکل M نشانگر Mixture و عدد بعد از آن نشانه خمیری نمونه است. مشاهده می‌شود که در آزمایش‌های فشاری، رابطه مشخصی بین  $\Delta u/\sigma'_{ve}$  و  $I_p$  وجود ندارد و حداکثر مقدار فشار آب حفره‌ای در کرنش محوری ۸٪ است. در آزمایش‌های کششی، فشار آب حفره‌ای حداکثر در کرنش محوری ۴٪ ایجاد می‌شود و با کاهش  $I_p$  افزایش می‌یابد. نامبرندگان نشان دادند که رفتار نمونه‌های M-20 و M-30 (به ترتیب با ۱۶٪ و ۳۴٪ ماسه) شبیه به رفتار معمول رس‌ها بوده ولی رفتار نمونه‌های M-15 و M-10 (به ترتیب با ۴۷٪ و ۶۰٪ ماسه) متفاوت بوده و می‌توان گفت که رفتار این نمونه‌ها نشانگر رفتار خاک‌های مخلوط است. کیمورا و همکاران (۱۹۹۴) [۵] نیز آزمایش‌هایی مشابه بر نمونه‌های مخلوط ماسه توپورا و رس کاوازاکی انجام دادند.

بی‌اوگلو (۱۹۹۵) [۶] آزمایش‌های ادنومتري، برش مستقیم و سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده بر روی مخلوط‌های رس - ماسه عادی تحکیم‌یافته، برای تعیین پارامترهای مقاومتی و تراکم‌پذیری آنها انجام داد. وی نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی مؤثر مخلوط‌های رس - ماسه تا وقتی که مقدار ریزدانه (ذرات کوچکتر از ۰/۰۷۵mm) کمتر از ۵۰٪ باشد بین ۲۰ تا ۲۸ درجه است. در مقدار ریزدانه بیشتر از ۵۰٪، زاویه اصطکاک به طور قابل‌توجهی کم شده و تا ۱۰ درجه نیز می‌رسد. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده نشان داد که رابطه‌ای مشخص بین زاویه اصطکاک زهکشی‌نشده و درصد مصالح ریزدانه وجود ندارد.

والزو و مابی (۲۰۰۰) [۷] با آزمایش‌های برش مستقیم بر روی مخلوط‌های ماسه اتاوا - رس کائولن دریافتند که مقاومت برشی مخلوط‌ها به مقدار ماسه بستگی دارد. به طوری که اگر مقدار ماسه بیشتر از ۷۵٪ باشد، مقاومت برشی مخلوط با مقاومت برشی ماسه خالص برابر است. در صورتی که مقدار ماسه کمتر از ۴۰٪ باشد، مقاومت برشی مخلوط با مقاومت

مهندسی ژئوتکنیک اغلب با خاک‌های مخلوط مواجهند که محدوده وسیعی از خاک‌های چسبنده تا دانه‌ای را دربر دارند. برخی از آبرفت‌های رودخانه‌ای و یخرفت‌ها و رس‌های مخلوط با مصالح دانه‌ای مورد استفاده در هسته سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، به ترتیب نمونه‌هایی از خاک‌های مخلوط طبیعی و مصنوعی هستند. این خاک‌ها دانه‌بندی گسترده‌ای دارند و بسته به درصد نسبی ذرات رس و مصالح دانه‌ای، ساختار و بافت متفاوتی دارند. در صورتی که درصد رس زیاد باشد، مصالح دانه‌ای با هم تماس نداشته و به حالت غوطه‌ور در بخش چسبنده قرار می‌گیرند. با افزایش مصالح دانه‌ای، تماس بین دانه‌ها برقرار شده و بافت دانه‌ای شکل می‌گیرد.

با توجه به اینکه خاک‌های مخلوط از ذرات چسبنده و مصالح دانه‌ای تشکیل شده‌اند، رفتار مکانیکی آنها بین رفتار مصالح رسی و مصالح دانه‌ای است و به درصد حجمی این دو بخش، نحوه قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر و اندرکنش بین آنها بستگی دارد. با توجه به گسترش کاربرد خاک‌های مخلوط در مهندسی ژئوتکنیک، شناخت دقیق‌تر رفتار مکانیکی این مصالح در شرایط مختلف بارگذاری نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارد.

در این مقاله، رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت با آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته همسان زهکشی‌نشده (CIU) بر روی نمونه‌های متراکم رس خالص، مخلوط رس - ماسه و رس - شن مطالعه شده، و اثر درصد مصالح دانه‌ای و اندازه دانه‌ها بر رفتار تنش - کرنش، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ابتدا تاریخچه مختصری از مطالعات گذشته ارائه می‌شود، و سپس مصالح مورد آزمایش و روش آزمایش‌ها معرفی می‌شوند. در نهایت نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر حسب پارامترهای مختلف ارائه شده و مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرند.

## ۲- تاریخچه

هولتز و ویلارد (۱۹۵۶) [۲] آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط رس و شن، با مقدار شن بین ۰٪ تا ۶۵٪، انجام دادند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که با زیاد شدن درصد شن در خاک مخلوط، زاویه اصطکاک زیاد شده و چسبندگی ظاهری کاهش پیدا می‌کند. ناکاسه و همکاران (۱۹۷۸) [۳] آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته همسان زهکشی‌نشده

مقایسه رفتار نمونه‌های مشابه رس‌های ماسه‌دار و رس‌های شن‌دار از نظر درصد حجمی، نتیجه گرفتند که اندازه دانه‌ها تأثیر چندانی بر فشار آب حفره‌ای ندارد.

مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه رفتار خاک‌های مخلوط، که خلاصه‌ای از مهم‌ترین آنها قبلاً به وسیله نویسندگان این مقاله جمع‌آوری شده است [۱]، نشان می‌دهد که اثر درصد مصالح دانه‌ای بر روی مقاومت برشی، پارامترهای تغییرشکل و تغییرات فشار آب حفره‌ای به طور جامع بررسی نشده است. همچنین اثر اندازه دانه‌ها بر روی رفتار خاک‌های رسی مخلوط مشخص نیست.

### ۳- برنامه آزمایش و مصالح استفاده شده

#### ۳-۱- دستگاه آزمایش سه‌محوری

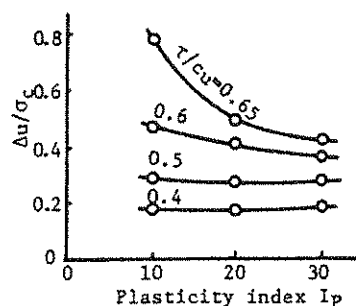
برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه سه‌محوری پیشرفته ساخت شرکت GCTS<sup>۲</sup> استفاده شد. در این دستگاه برای بارگذاری نمونه از سیستم خودکار مدار بسته الکتریکی - هیدرولیکی استفاده می‌شود. فشار جانبی موردنیاز به وسیله کمپرسوری با ظرفیت حداکثر ۱۰۰۰ کیلوپاسکال تأمین شده و بار محوری بوسیله پمپ هیدرولیکی اعمال می‌شود. تمام اندازه‌گیری‌ها به صورت خودکار و با دقت بالا انجام می‌شود. این سیستم قابلیت اجرای آزمایش‌های تناوبی در تعیین روان‌گرایی<sup>۲</sup>، اندازه‌گیری مدول تغییرشکل و مقاومت تناوبی را دارد. اعمال بار به دو صورت کنترل تنش و کنترل کرنش امکان‌پذیر است.

#### ۳-۲- مصالح

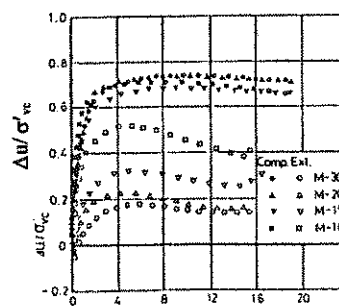
خاک مورد آزمایش شامل نمونه‌های مختلف خاک با ترکیب رس - ماسه<sup>۳</sup> و رس - شن<sup>۳</sup> و رس خالص<sup>۳</sup> بود. برای کاهش ریسک تغییرات خمیری، از خاک رس تجاری بال‌کلی ترکیه<sup>۴</sup> استفاده شد. توده ویژه این رس ۲/۷۲ و حد روانی و نشانه خمیری آن به ترتیب ۴۲ و ۱۹ بوده است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکنواخت خاک‌ها [۹]، این خاک در گروه خاک‌های رسی با خصوصیات خمیری پائین (CL) قرار می‌گیرد. منحنی توزیع اندازه ذرات خاک رس که از آزمایش هیدرومتری بدست آمد، نشان داد که اندازه حدود ۵۷/۲٪ ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۲mm است. مصالح دانه‌ای استفاده شده در نمونه‌ها، ماسه و شن طبیعی منطقه خلیج (مسیل کن) در اطراف شهر تهران با دانه‌بندی یکنواخت و تقریباً از نوع گردگوشه تا نیمه-گرد<sup>۵</sup> انتخاب و توده ویژه آنها به ترتیب ۲/۶۴ و ۲/۵۶ تعیین شد. متوسط اندازه ذرات ماسه و شن به ترتیب ۱/۵۹۵mm و ۵/۷۵mm بوده است.

برشی رس برابر می‌شود. با افزایش مقدار ماسه از ۴۰٪ تا ۷۵٪، مقاومت برشی از مقاومت رس به مقدار متناظر ماسه خالص کاهش پیدا می‌کند؛ این کاهش در تنش‌های نرمال بالا چشم‌گیر است. نامبردگان همچنین با ارائه نتایج تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده به وسیله دیگر محققین بر مخلوط‌های رس - مصالح دانه‌ای نتیجه گرفتند که در خاک‌های مخلوط با میزان مصالح دانه‌ای بین ۵۶٪ و ۷۶٪، مقاومت برشی مخلوط ترکیبی از مقاومت اصطکاکی مصالح دانه‌ای و مقاومت برشی رس است. برای مخلوط‌های با مقادیر مصالح دانه‌ای کمتر از ۵۶٪ و بیشتر از ۷۶٪، مقاومت برشی مخلوط‌ها به ترتیب با مقاومت برشی رس و مقاومت اصطکاکی مصالح دانه‌ای برابر است.

جعفری و شفیع (۲۰۰۴) [۸] نیز با انجام آزمایش‌های سه-محوری فشاری زهکشی‌نشده با تنش‌های محصورکننده مختلف بر روی نمونه‌های رس کائولن - ماسه<sup>۳</sup>، رس کائولن - شن<sup>۳</sup> و رس کائولن خالص نشان دادند که در تنش محصورکننده ثابت، با افزایش درصد مصالح دانه‌ای از ۰٪ به ۶۰٪، فشار آب حفره‌ای بیشتری ایجاد می‌شود و زاویه اصطکاک داخلی حدود ۱۰ درجه بیشتر می‌شود. نتایج این مطالعات نشان داد که هر چه تنش محصورکننده بیشتر باشد، با زیاد شدن درصد مصالح دانه‌ای افزایش فشار آب حفره‌ای بیشتر می‌شود. آنان با



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) رابطه  $\Delta u/\sigma'_c$  و  $I_p$  [۳]، (ب) نمودار فشار آب حفره‌ای در آزمایش‌های سه‌محوری فشاری و کششی [۴].

جدول (۱): درصد‌های مختلف خاک رس و مصالح دانه‌ای در نمونه‌های مختلف و مشخصه‌های آنها

نام نمونه	رس (%)	ماسه یا شن (%)	دانسیتة خشک (kN/m <sup>3</sup> )	درصد رطوبت (%)	نسبت تخلخل		
					نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل در انتهای تحکیم $\sigma'_v=100$ kPa	نسبت تخلخل در انتهای تحکیم $\sigma'_v=200$ kPa
	۱۰۰	۰	۱۵/۹۰	۲۲/۹۰	۰/۶۸۰	۰/۶۶۰	۰/۶۲۰
T100	۸۰	۲۰	۱۶/۶۰	۱۸/۳۲	۰/۵۹۹	۰/۵۶۸	۰/۵۴۴
ST80	۶۰	۴۰	۱۶/۹۵	۱۶/۹۲	۰/۵۰۹	۰/۴۷۰	۰/۴۴۵
ST60	۴۰	۶۰	۱۸/۱۰	۱۵/۲۶	۰/۴۱۲	۰/۳۸۴	۰/۳۷۹
ST40	۶۰	۴۰	۱۷/۶۰	۱۶/۷۲	۰/۵۰۸	۰/۴۷۵	۰/۴۵۲
GT60	۴۰	۶۰	۱۸/۵۸	۱۴/۲۴	۰/۴۰۹	۰/۳۸۲	۰/۳۷۹

بارگذاری برشی، سرعت بارگذاری ۰/۰۸ /min، انتخاب شد. مشخصه‌های نمونه‌های مختلف در جدول (۱) آورده شده است.

#### ۴- نتایج

منحنی تنش- کرنش، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیرتنش (در صفحه  $q':p'$ ) برای نمونه‌های ST80، ST60 و ST40 در تنش‌های محصورکننده مختلف به ترتیب در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) نشان داده شده است. در نمودارهای تنش- کرنش و فشار آب حفره‌ای، محور قائم به ترتیب تنش تفاضلی ( $q'=\sigma'_1-\sigma'_3$ ) و فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ )، و محور افقی هر دو نمودار کرنش محوری ( $\epsilon_a$ ) می‌باشد. در نمودارهای مسیرتنش، محور افقی تنش مؤثر میانگین ( $p'=(2\sigma'_3+\sigma'_1)/3$ ) و محور قائم تنش تفاضلی است. یادآور می‌شود که نتایج مشابهی برای نمونه‌های GT60 و GT40 بدست آمد، که در ادامه مقاله بررسی می‌شود. خطوط مستقیم در منحنی‌های مسیر تنش، مسیرتنش کل را نشان می‌دهد.

#### ۵- بحث بر روی نتایج

##### ۵-۱- اثر مصالح دانه‌ای

##### ۵-۱-۱- رفتار تنش- کرنش

شکل‌های (۲ الف)، (۳ الف) و (۴ الف) نشان می‌دهند که در تمامی تنش‌های محصورکننده، با افزایش درصد مصالح دانه‌ای، روند کلی تغییرات مقاومت برشی افزایشی است. برای ارزیابی بهتر اثر مصالح دانه‌ای، تغییرات مقاومت برشی بر حسب درصد مصالح دانه‌ای برای تنش‌های محصورکننده مختلف در شکل (۵) ارائه شده است. نقاط توپر در شکل مربوط به رس‌های ماسه‌دار و نقاط توخالی با رس‌های شن‌دار ارتباط دارد. مشاهده می‌شود که افزایش مصالح دانه‌ای تا ۴۰٪ تأثیر چندانی بر مقاومت برشی ندارد، لیکن با افزایش آن از ۴۰٪ به ۶۰٪ مقاومت برشی به طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر می‌شود. علت این افزایش در مقاومت، با وجود افزایش فشار آب حفره‌ای را

برای تهیه نمونه‌ها، خاک رس با درصد‌های مختلف ماسه و شن مخلوط شد (جدول (۱)). کلیه درصد‌های اختلاط به صورت حجمی تعیین شده و نمونه‌ها با عنوان‌های ST80، ST60، ST40، GT60 و GT40 نامگذاری شدند. حرف اول نشانگر نوع مصالح دانه‌ای (S برای ماسه و G برای شن)، حرف دوم (T) نشانگر خاک چسبیده (Turkey Bal-clay) و عدد بعد از حروف درصد حجمی رس را در نمونه‌ها نشان می‌دهد.

##### ۳-۳- تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

از آنجا که در این تحقیق رفتار خاک رس مخلوط از دیدگاه کاربرد آنها در هسته سدهای خاکی مورد نظر بود، نمونه‌ها با رطوبت ۲ درصد بیشتر از رطوبت بهینه و درصد تراکم استاندارد پروکتور متناظر با آن تهیه شدند [۹]. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به ترتیب ۷/۱ و ۱۵ سانتیمتر بود. نمونه‌ها در شش لایه تهیه و به منظور ثابت ماندن درصد اختلاط مصالح در لایه‌ها، هر لایه جداگانه با آب مخلوط شد. برای اطمینان از پخش یکنواخت رطوبت، هر نمونه حدود ۲۴ ساعت بعد از آماده‌سازی لایه‌ها ساخته می‌شد. همچنین برای ایجاد اتصال بهتر بین لایه‌های متوالی در حین تراکم، سطح هر لایه پس از تراکم خراش داده می‌شد.

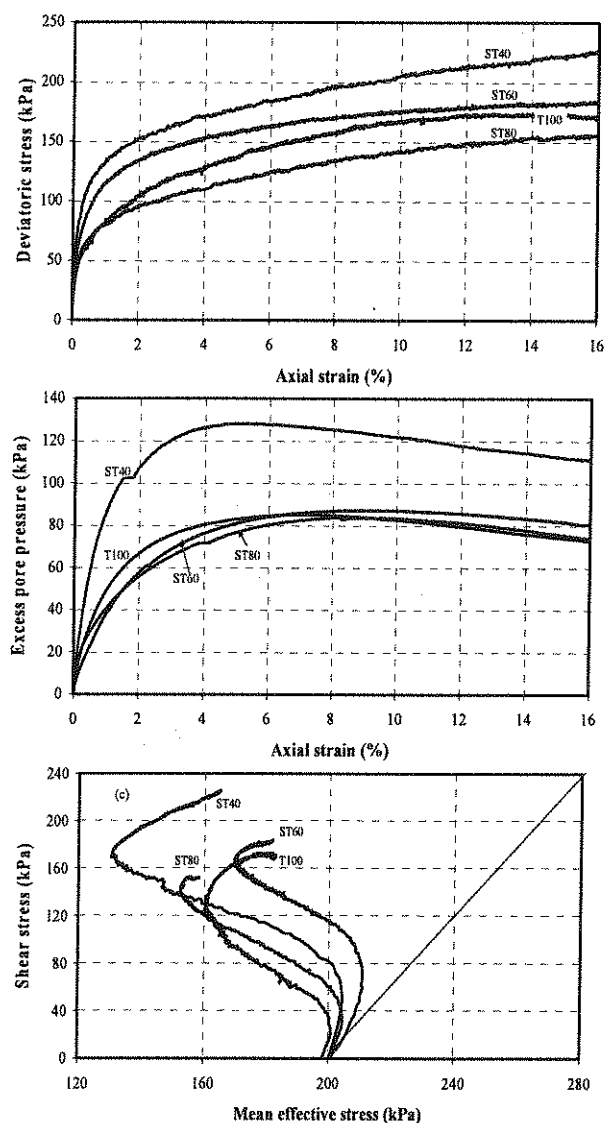
نمونه‌ها پس از آماده‌سازی درون محفظه سه‌محوری قرار داده شدند. به منظور تسریع در مرحله اشباع نمونه‌ها، حداقل به مدت ۲ ساعت گاز CO<sub>2</sub> از داخل نمونه عبور داده شد. سپس آب بدون هوا از پائین نمونه در آن جریان یافته و نهایتاً با اعمال تدریجی پس‌فشار از بالای نمونه اشباع شد. پس از اینکه مقدار B به بیشتر از ۰/۹۷ رسید نمونه‌ها اشباع فرض می‌شدند. پس از اشباع شدن، نمونه‌ها تحت تنش‌های مؤثر محصورکننده همسان ۱۰۰ kPa، ۲۰۰ kPa و ۳۵۰ kPa تحکیم شدند. پس از پایان مرحله تحکیم، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده از نوع کنترل کرنش بر روی نمونه‌ها انجام شد. کلیه آزمایش‌ها تا کرنش ۱۶٪ ادامه یافته و برای اطمینان از ایجاد فشار آب حفره‌ای یکسان در سراسر نمونه در حین

برشی می‌شود. البته در تنش محصورکننده ۲۵۰ kPa چنین روندی مشاهده نشد که می‌تواند به این دلیل باشد که در تنش‌های بالا در انتهای تحکیم امکان تماس برخی دانه‌ها با هم وجود دارد و این به افزایش مقاومت کمک می‌کند.

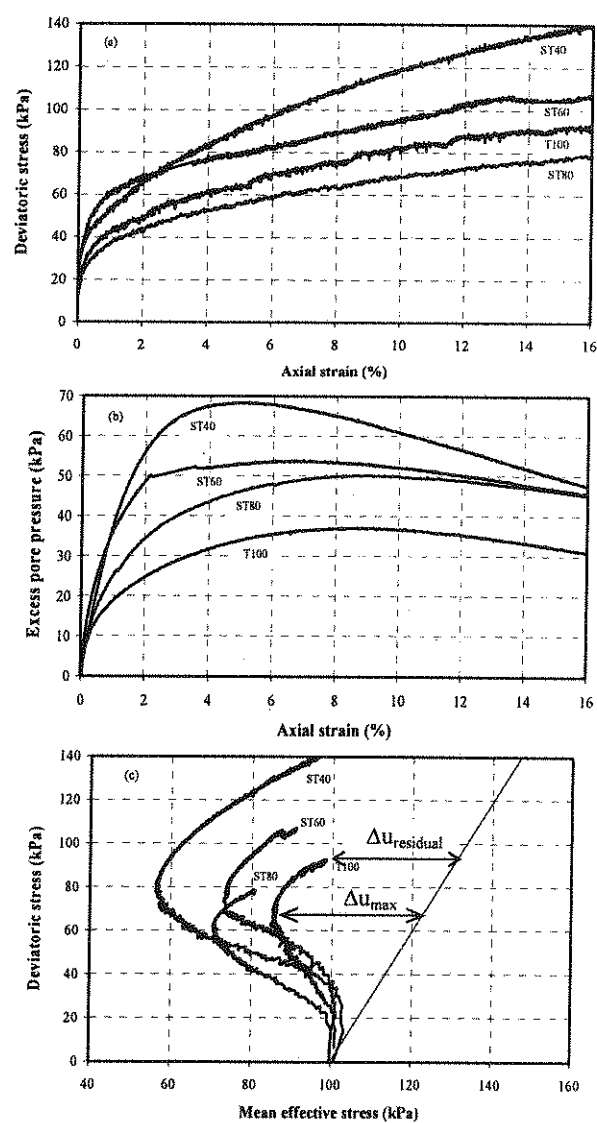
تغییرات مدول تغییرشکل سکانت ( $E_{50}$ ) بر حسب درصد ماسه برای تنش‌های محصورکننده مختلف در شکل (۶) ارائه شده است. از این شکل چنین برداشت می‌شود که افزودن مصالح دانه‌ای تا ۲۰٪ تأثیری بر مدول تغییرشکل سکانت نمونه‌ها ندارد، اما با زیاد شدن آن از ۲۰٪ تا ۶۰٪ مدول تغییرشکل سکانت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که شیب کلی این افزایش برای آزمایش‌هایی با تنش‌های محصورکننده بالاتر، بیشتر است.

می‌توان به بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی با افزایش درصد مصالح دانه‌ای نسبت داد. البته هر چه درصد مصالح دانه‌ای در مخلوط بیشتر باشد نسبت تخلخل در انتهای تحکیم نمونه کمتر می‌شود (جدول (۱)) و این خود از علل بیشتر شدن مقاومت برشی است.

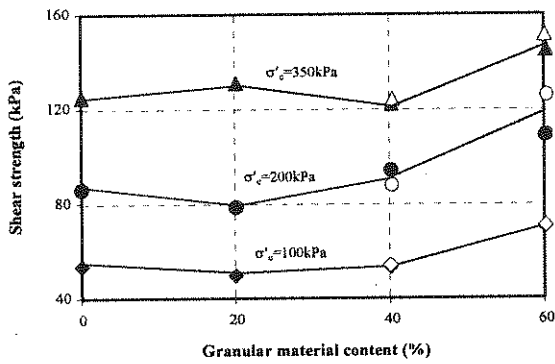
برای تنش‌های محصورکننده کمتر، در نمونه‌های ST80 اندکی کاهش در مقاومت نسبت به نمونه T100 مشاهده می‌شود. این کاهش احتمالاً به این دلیل است که در نمونه‌های ST80 ساختار غالب رسی بوده و دانه‌ها در بخش رسی غوطه‌ور هستند و تأثیری در زاویه اصطکاک داخلی مخلوط ندارند، لیکن وجود مصالح دانه‌ای سبب افزایش فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ ) شده و این افزایش در  $\Delta u$  موجب کاهش مقاومت



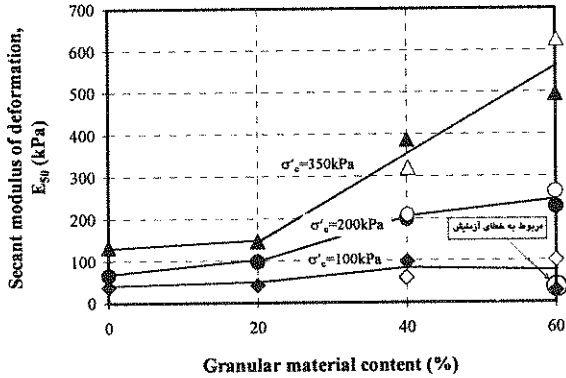
شکل (۳): نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط رس - ماسه در تنش محصورکننده ۲۰۰ kPa (الف): منحنی تنش - کرنش، (ب): تغییرات فشار آب حفره‌ای و (ج) مسیر تنش



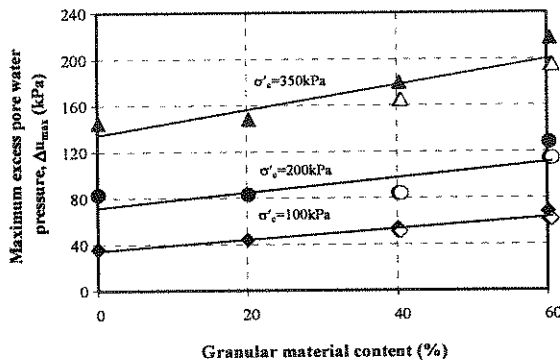
شکل (۲): نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط رس - ماسه در تنش محصورکننده ۱۰۰ kPa (الف): منحنی تنش - کرنش، (ب): تغییرات فشار آب حفره‌ای و (ج) مسیر تنش



شکل (۵): تغییرات مقاومت برشی بر حسب درصد مصالح دانه‌ای

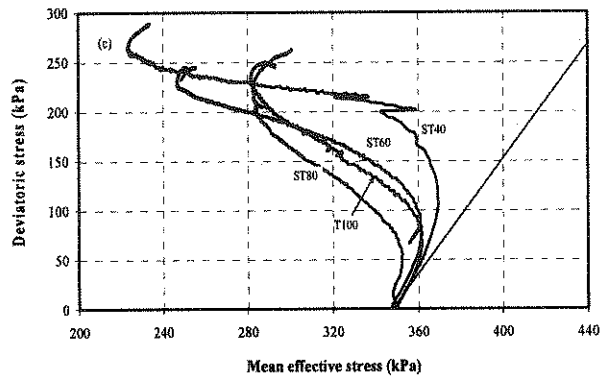
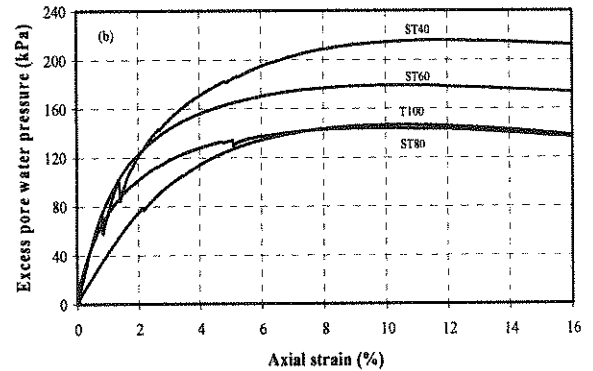
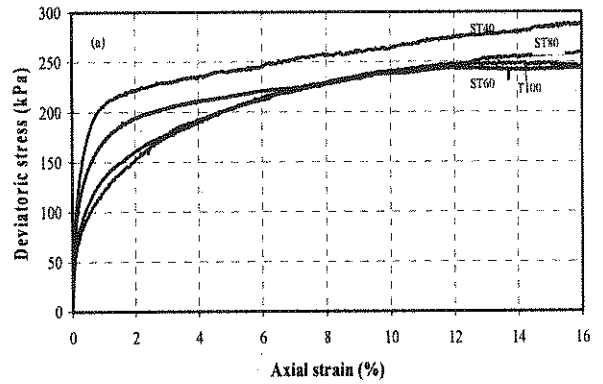


شکل (۶): تغییرات مدول تغییر شکل سکانت بر حسب درصد مصالح دانه‌ای



شکل (۷): تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر با درصد مصالح دانه‌ای مشاهده می‌شود که در تنش‌های محصورکننده کمتر ( $100 \text{ kPa}$ ) و  $200 \text{ kPa}$ ،  $\Delta u$  پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود دوباره کاهش پیدا می‌کند و این نشان می‌دهد که رفتار آنها کمتر انقباضی است، در حالی که در تنش محصورکننده بالا ( $350 \text{ kPa}$ ) کاهش  $\Delta u$  دیده نمی‌شود و رفتار آنها بیشتر انقباضی است.

با توجه به جدول (۱) و آنچه از رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای در شرایط زهکشی نشده می‌دانیم، انتظار می‌رود که با کاهش تخلخل،  $\Delta u$  ناشی از برش کاهش یابد، ولی در این نمونه‌های مخلوط روند متفاوتی مشاهده می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مخلوط، بیشتر شدن  $\Delta u$  با افزایش درصد مصالح دانه‌ای (با وجود کاهش تخلخل)



شکل (۴): نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط رس - ماسه در تنش محصورکننده  $350 \text{ kPa}$ : الف) منحنی تنش - کرنش، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیر تنش

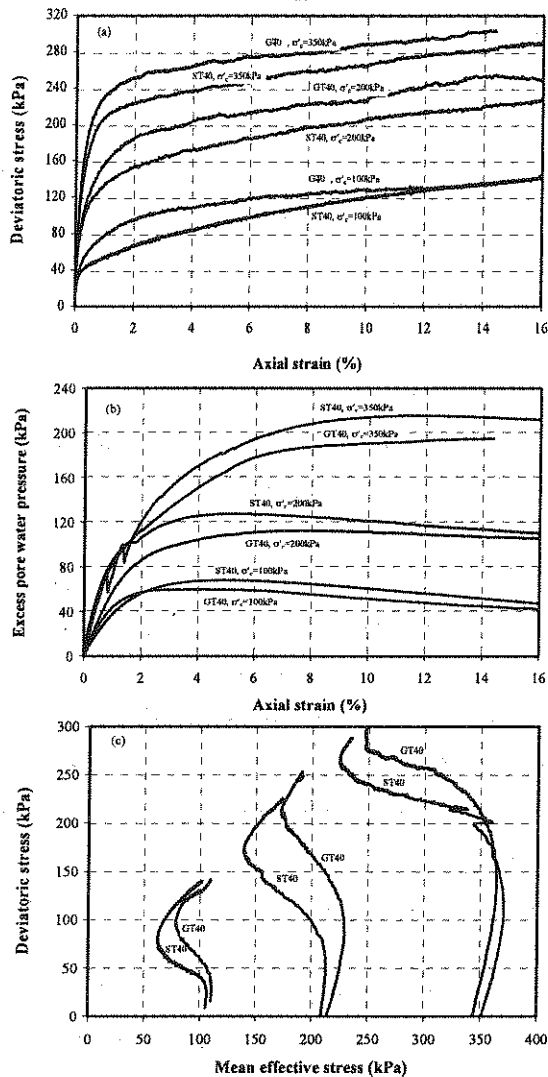
### ۵-۱-۲- فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ ) ناشی از برش

تغییرات فشار آب حفره‌ای ناشی از برش (شکل‌های ۲ ب، ۳ ب و ۴ ب) نشان می‌دهند که با افزایش درصد مصالح دانه‌ای، به طور کلی فشار آب حفره‌ای بیشتری در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. به طوری که در نمونه‌های دارای  $60\%$  ماسه (ST40)،  $\Delta u$  به حداکثر مقدار ممکن می‌رسد. نتایج بدست آمده با آنچه که در ادبیات فنی گزارش شده سازگار است [۲]، [۵] و [۸].

برای ارائه بهتر روند این افزایش، تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی حداکثر ( $\Delta u_{max}$ ) با درصد ماسه در تنش‌های محصورکننده مختلف در شکل (۷) رسم شده است. توجه شود که نزدیک بودن  $\Delta u$  نمونه‌های ST60، ST80، T100 در تنش محصورکننده  $200 \text{ kPa}$  به دلیل خطای اندازه‌گیری است.

دانه‌های یکسان ولی با اندازه دانه‌های متفاوت (نمونه‌های GT60 با ST60 و GT40 با ST40) در تنش‌های محصورکننده مختلف با هم مقایسه شدند. با فرض کروی بودن دانه‌ها، قطر متوسط ماسه‌ها و شن‌ها به ترتیب  $1/595\text{mm}$  و  $5/75\text{mm}$  بود. در نتیجه، قطر دانه‌های شن تقریباً  $2/6$  برابر قطر دانه‌های ماسه می‌باشد و سطح تماس مصالح ماسه‌ای با رس در درصد حجمی ثابت  $2/6$  برابر سطح تماس مصالح شنی شد.

شکل (۸) نشان‌دهنده نتایج آزمایش‌ها برای نمونه‌های با  $60\%$  مصالح دانه‌ای در تنش‌های محصورکننده مختلف است. نتایج مشابهی برای نمونه‌های با  $40\%$  مصالح دانه‌ای نیز بدست آمد. همانگونه که از این شکل‌ها دیده می‌شود مقاومت برشی رس‌های شن‌دار اندکی بیشتر از مقاومت برشی رس‌های ماسه‌دار است. برعکس، فشار آب حفره‌ای در کرنش‌های متناظر در رس‌های ماسه‌دار بیشتر از رس‌های شن‌دار است.



شکل (۸): مقایسه رفتار نمونه‌های ST40 و GT40 در تنش‌های محصورکننده مختلف: الف) منحنی تنش - کرنش، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیر تنش

می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد: با توجه به اینکه تغییر شکل-پذیری رس خیلی بیشتر از دانه‌ها است، هنگام تحکیم نمونه‌های مخلوط، به دلیل تمرکز تنش، بخش عمده‌ای از تنش تحکیمی به دانه‌ها منتقل شده و بخش کمتری به ذرات رس انتقال پیدا می‌کند. در حالی که در نمونه‌های رس خالص تمامی تنش تحکیمی به طور یکنواخت به ذرات رس منتقل می‌شود. بنابراین، در انتهای مرحله تحکیم، بخش رسی نمونه‌های مخلوط ساختار سست‌تری نسبت به بخش رسی نمونه‌های رس خالص دارد. ساختار سست‌تر در حین بارگذاری برشی تمایل بیشتری به انقباض دارد و در نتیجه فشار آب حفره‌ای بیشتری در آنها ایجاد می‌شود.

علاوه بر این، هر چه تماس بین دانه‌های ماسه (شن) بیشتر باشد، رس محبوس در فضای بین دانه‌ها سهم کمتری از تراکم خواهد داشت. به عبارت دیگر، هر چه نمونه خاک ساختار دانه‌ای بیشتری داشته باشد، امکان محبوس شدن رس بیشتر است و تنش موضعی بر روی آن کمتر می‌شود. در نهایت ساختار رس در مخلوط‌های دارای مصالح دانه‌ای بیشتر، نسبتاً سست‌تر بوده و حین برش فشار آب حفره‌ای بیشتری در آن ایجاد می‌شود. جعفری و شفیع [۸] دلیل مشابهی را برای ساختار ناهمگن در مصالح مخلوط مطرح نموده، اما تفسیر متفاوتی را ارائه کرده‌اند. آنان عنوان کرده‌اند که در خاک مخلوط به دلیل تغییر شکل‌پذیری خیلی پایین دانه‌ها، کرنش اعمالی به نمونه، کلاً به بخش رسی مخلوط منتقل می‌شود و این باعث می‌شود تغییر شکل در بخش رسی بین دانه‌ها در مخلوط‌ها بیشتر از بخش متناظر در رس خالص باشد؛ در نتیجه حین برش فشار آب منفذی بیشتری در آنها ایجاد می‌شود.

### ۵-۱-۳- منحنی‌های مسیر تنش

در شکل‌های (۲ ج)، (۳ ج) و (۴ ج) که مسیر تنش را در صفحه  $q': p'$  نشان می‌دهند نکات زیر قابل ملاحظه است:

- به طور کلی برای هر کدام از تنش‌های محصورکننده ( $\sigma'_c$ ها)، با افزایش درصد ماسه، اندازه حداقل تنش میانگین نرمال مؤثر ( $p'$ ) کاهش می‌یابد (یعنی  $\Delta u_{max}$  بیشتری ایجاد می‌شود).
- با افزایش تنش محصورکننده، رفتار نمونه‌ها به رفتار انقباضی بیشتر نزدیک می‌شود و در نتیجه  $\Delta u$  نهایی ( $\Delta u_{residual}$ ) تقریباً معادل با  $\Delta u_{max}$  است. در تنش‌های محصورکننده کمتر (به ویژه  $\sigma'_c = 100\text{kPa}$ ) ملاحظه می‌شود که برای همه نمونه‌ها  $\Delta u_{residual}$  از  $\Delta u_{max}$  کمتر است.

### ۵-۲- اثر اندازه مصالح دانه‌ای

برای مطالعه اثر اندازه مصالح دانه‌ای موجود در خاک مخلوط، رفتار نمونه‌های مخلوط با درصد حجمی مصالح

علت اختلاف رفتار می‌تواند ناشی از این باشد که در مصالح مخلوط ماسه‌دار و شن‌دار مشابه به لحاظ درصد مصالح دانه‌ای، فاصله دانه‌ها در رس‌های ماسه‌دار کمتر از رس‌های شن‌دار بوده، در نتیجه اثر محبوس‌شدگی در رس‌های ماسه‌دار بیشتر و بخش رسی موجود در آنها نسبت به رس‌های شن‌دار ساختار سست‌تری دارد. در نتیجه  $\Delta u$  بیشتری در رس‌های ماسه‌دار ایجاد شده و  $\Delta u$  بیشتر نیز سبب کاهش مقاومت برشی می‌شود. همچنین هر چه درصد مصالح دانه‌ای در مخلوط بیشتر شود اثر پدیده فوق بیشتر می‌شود؛ یعنی تفاوت رفتار بین مصالح مخلوط ماسه‌ای با مصالح مخلوط شنی، در مخلوط‌های حاوی درصد مصالح دانه‌ای بیشتر، مشهودتر است.

## ۶- خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله مطالعات انجام شده بر روی رفتار مکانیکی خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت مرور گردید. این مطالعات نشان داد که رفتار این خاک‌ها، بویژه اضافه فشار آب حفره‌ای تابعی از درصد دانه‌ها و نشانه خمیری خاک است. همچنین مشاهده شد که اثر پارامترهای مختلف، بویژه درصد و اندازه مصالح دانه‌ای، بر روی مقاومت برشی و تغییرات فشار آب حفره‌ای کاملاً مشخص نیست. بدین منظور آزمایش‌های سه‌محوری یکنواخت زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های رس مخلوط با درصد‌های مختلف ماسه و شن در تنش‌های محصور کننده متفاوت انجام شد. از این آزمایش‌ها نتیجه گرفته شد که: ۱- به طور کلی افزایش درصد مصالح دانه‌ای تا ۴۰٪ تأثیر چندانی بر مقاومت برشی ندارد، اما با افزایش آن از ۴۰٪ به ۶۰٪ مقاومت برشی بیشتر می‌شود. علت افزایش مقاومت، علیرغم زیاد شدن فشار آب حفره‌ای، به بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی با افزایش درصد مصالح دانه‌ای مربوط است. همچنین با زیاد شدن درصد مصالح دانه‌ای از ۲۰٪ تا ۶۰٪، مدول تغییرشکل سکانت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. ۲- با افزایش درصد مصالح دانه‌ای، فشار آب حفره‌ای بیشتری در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. افزایش فشار آب حفره‌ای با افزایش درصد مصالح دانه‌ای به ساختار خاک مخلوط در انتهای مرحله تحکیم بستگی دارد. با توجه به سازوکار انتقال تنش در بخش‌های مختلف مخلوط، در انتهای مرحله تحکیم بخش رسی نمونه‌های مخلوط ساختار سست‌تری نسبت به بخش رسی نمونه‌های رس خالص دارد. هر چه درصد مصالح دانه‌ای بیشتر می‌شود رس محبوس در فضای بین دانه‌ها ساختار سست‌تری خواهد یافت. ساختار سست‌تر در حین بارگذاری برشی تمایل بیشتری به انقباض

دارد و در نتیجه فشار آب حفره‌ای بیشتری در آنها ایجاد می‌شود.

۳- در نمونه‌های با درصد حجمی مصالح دانه‌ای مساوی، با کوچکتر شدن اندازه دانه‌ها مقاومت برشی کمتر شده و فشار آب حفره‌ای بیشتری ایجاد می‌شود. نرخ تغییرات در درصد مصالح دانه‌ای بالا (۶۰٪) مشهود می‌باشد. علت احتمالی این اختلاف رفتار این است که اثر محبوس‌شدگی رس در رس‌های ماسه‌دار بیشتر از رس‌های شن‌دار بوده و بخش رسی آنها نسبت به رس‌های شن‌دار ساختار سست‌تری داشته و تمایل به انقباض در بخش رسی مخلوط‌های ماسه‌ای در حین بارگذاری برشی بیشتر است.

## ۷- مراجع

- [۱] سلطانی جیقه، حسین؛ سروش، عباس؛ (۱۳۸۴) 'مروری بر رفتار مکانیکی خاک‌های مخلوط'، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲۰-۲۲ اردیبهشت‌ماه
- [۲] Holtz, W.G., and Willard, M. 1956 *Triaxial shear characteristics of clayey gravel soils*, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.82 pp.143-149
- [۳] Nakase, A., Nakanodo, H. and Kusakabe, O. 1978. *Influence of soil type on pore pressure response to cyclic loading*, Proc. 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp 593-600
- [۴] Nakase, A. and Kamei, T. 1983. *Undrained shear strength anisotropy of normally consolidated cohesive soils*, Soils and foundations, Vol.23, No.1, pp 91-101
- [۵] Kimura, T., Takemura, J., Hiro-Oka, A., and Okamura, M. 1994. *Mechanical behavior of intermediate soils*, Proc. of International Conference Centrifuge, A.A. Balkema, Rotterdam
- [۶] Bayoglu, E. 1995. *Shear strength and compressibility behavior of sand-clay mixtures*, MSc Thesis., Dept. of Civil Engineering, Middle-East Technical University, Ankara, Turkey
- [۷] Vallejo, L. E., and Mawby, R. 2000 *Void ratio influence on the shear strength of granular material-clay mixtures*, Engineering Geology, Vol.58, pp.125-136
- [۸] Jafari, M.K. and Shafiee, A. 2004 *Mechanical behavior of compacted composite clays*, Canadian Geotechnical Journal, Vol.41 pp 1152-1167
- [۹] *Annual Book of ASTM Standards*, 1997, Vol04.08



