

## رفتار مکانیکی خاک‌های رسی مخلوط با خرده لاستیک\*

امین ارثی‌زاد<sup>(۱)</sup> حسین سلطانی جیقه<sup>(۲)</sup> محرم اسدزاده<sup>(۳)</sup>

**چکیده** امروزه از مخلوط خاک رس خالص با خرده لاستیک به‌عنوان مصالح ساخت در برخی از پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود. با توجه به گسترش کاربرد این خاک‌ها، شناخت رفتار مکانیکی و تعیین خواص آنها ضروری است. بدین منظور، آزمایش‌های سه‌محوری یکنواخت (Monotonic) زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های متراکم رس خالص و مخلوط «رس-خرده لاستیک» انجام می‌شود. نمونه‌های مخلوط از اختلاط دو نوع رس خالص با خرده لاستیک با درصد وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تهیه شدند. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در نمونه‌ها، به درصد خرده لاستیک در خاک مخلوط و نوع رس بستگی دارد. به‌طوری‌که بسته به نوع رس مورد استفاده در مخلوط، درصد اختلاط بهینه‌ای برای خرده لاستیک وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی** مخلوط رس-خرده لاستیک، آزمایش سه‌محوری زهکشی‌نشده، مقاومت برشی، فشار آب حفره‌ای.

## Behavior of Clayey Soils Mixed with Tire Chips

A. Ersizad H. Soltani-Jigheh M. Asadzadeh

**Abstract** Recently, mixtures of clay-tire chips are used as construction material in civil engineering projects. With respect to the tending for using these materials, it is necessary to know their mechanical behavior. Thereby, a number of undrained monotonic triaxial tests are carried out on the specimens of pure clay and clay-tire chip mixtures. Mixed specimens prepared by mixing pure clay with 10%, 20%, and 30% tire chips in weight. The results of the tests indicate that shear strength and pore water pressure due to shearing depend on the amount of tire-chips and clay type. As dependent on the clay type used in the mixtures, there is an optimum content for tire-chips to mix with the clay.

**Keywords** Clay-Tire Chip Mixtures, Undrained Triaxial Test, Shear Strength, Pore Water Pressure.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۲/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۵ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان.

(۲) استادیار گروه عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

(۳) کارشناس ارشد خاک و پی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان.

## مقدمه

هر سال در جهان حجم زیادی از لاستیک تایرها به‌عنوان زباله‌های غیرقابل تجزیه بر روی هم انباشته شده و یا در حجم وسیعی داخل زمین دفن می‌گردند. این توده‌های لاستیک نه تنها سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند بلکه باعث به خطر افتادن سلامتی انسان و ایجاد آتش‌سوزی نیز می‌شوند. علاوه بر این، لاستیک‌ها نسبت به سایر زباله‌ها از چگالی کمتری برخوردارند و در نتیجه حجم زیادی را در مدفن‌های زباله اشغال می‌کنند. با توجه به مطالب گفته شده و غیرقابل تجزیه بودن لاستیک تایرها، لازم است توجه ویژه‌ای به مدیریت این مواد داده شود.

مطابق با نظر هامفری [1] استفاده از خرده‌لاستیک در مهندسی عمران مزایای زیادی دارد که از آن جمله می‌توان به چگالی کم لاستیک، قابلیت دوام و سازگاری بالا، عایق حرارتی بالا و در بسیاری از موارد هزینه‌ی تمام شده‌ی پایین در مقایسه با سایر مصالح خاکی اشاره نمود. بدین علت اخیراً امکان استفاده از خرده‌لاستیک در خاکریزی بزرگراه‌ها، خاکریزی پشت سازه‌های حائل قرار گرفته بر روی خاک‌های سست یا قابل تراکم توسط محققان بررسی شده است. بنابراین، شناخت دقیق‌تر رفتار مکانیکی این مصالح در شرایط مختلف بارگذاری نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارد.

در این تحقیق، رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت با انجام آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته همسان زهکشی‌نشده (CIU) بر روی نمونه‌های متراکم رس خالص، مخلوط «رس-خرده‌لاستیک» مطالعه شده است، و اثر درصد خرده‌لاستیک و اثر نوع رس بر رفتار تنش- کرنش، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش مطالعه می‌شود. در این مقاله، ابتدا تاریخچه‌ی مختصری از مطالعات انجام شده ارائه و سپس مصالح و برنامه‌ی آزمایش‌ها معرفی می‌شوند. در نهایت نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر حسب پارامترهای مختلف ارائه و مورد ارزیابی و

تحلیل قرار می‌گیرند.

## تاریخچه

اخیراً نتایج مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی تسلیح خاک رس با مصالح دانه‌ای نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت خاک‌های دانه‌ای بر روی مقاومت رس می‌باشد [6, 2]. هور و همکاران [7] با انجام آزمایش‌های تراکم و CBR بر روی مخلوط ماسه‌ی شکسته و مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن نشان دادند که افزودن الیاف به ماسه انرژی مورد نیاز برای رسیدن به یک تراکم مشخص را افزایش می‌دهد و باعث افزایش CBR می‌شود. عبدی و پارساژوه [8] با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری و تحکیم بر روی نمونه‌های رسی مسلح‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن، خواص نفوذپذیری و نشست‌پذیری این مخلوط‌ها را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد الیاف در مخلوط مقدار نشست کم می‌شود؛ به‌طوری‌که در نمونه‌ی مخلوط حاوی ۸ درصد الیاف به طول ۵ میلی‌متر کمترین نشست دیده شد. هم‌چنین میزان نفوذپذیری با افزایش درصد الیاف تا چند برابر افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام گرفته توسط عبدی و همکاران [9] بیانگر این است که کاربرد الیاف طبیعی و مصنوعی به‌طور محسوس مقاومت برشی و شکل‌پذیری نمونه‌های مسلح شده کائولینیت را افزایش می‌دهد.

درصد وزنی و عرض خرده‌لاستیک‌ها، وضعیت ظاهری آنها، میزان تراکم و تنش نرمال وارد از عوامل مؤثر بر روی مقاومت برشی مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک می‌باشند. نمونه‌های مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک وقتی که درصد خرده‌لاستیک بیشتر باشد و نمونه‌ها متراکم‌تر باشند، رفتار اتساعی تری دارند. با افزایش درصد خرده‌لاستیک‌ها و درصد تراکم مخلوط‌ها، زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌های مخلوط بیشتر می‌شود [10].

در تحقیق به عمل آمده توسط قضاوی و برمکی

مقاومت برشی و شکل‌پذیری مخلوط می‌گردد و جاذبه‌ی بین ذرات رس و الیاف، باعث ایجاد پیوندی مناسب برای انتقال بار می‌گردد. هم‌چنین این محققان دریافته‌اند که الیاف باعث افزایش مقاومت برشی زهکشی‌نشده‌ی خاک می‌شود. تحقیقی دیگر نشان داد که افزایش میزان مقاومت فشاری تحت تأثیر دو فاکتور مقدار الیاف و میزان رطوبت تراکم می‌باشد [16].

چتین و همکاران [17] با مقایسه‌ی نتایج آزمایش تراکم مخلوط‌های رس-خرده‌لاستیک و رس خالص نشان دادند که وزن مخصوص خشک مخلوط‌ها کمتر از وزن مخصوص خشک خاک رس می‌باشد. یعنی اینکه پتانسیل خوبی برای استفاده از خرده‌لاستیک‌ها به‌عنوان مصالح خاک‌ریز سبک وجود دارد. آنها هم‌چنین با انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی مخلوط‌های رس-خرده‌لاستیک دریافته‌اند که با افزایش درصد خرده‌لاستیک مخلوط، در تنش‌های نرمال کمتر، کرنش قائم قابل‌ملاحظه‌ای در نمونه ایجاد نمی‌شود و یا تغییر حجم مشخصی در طول آزمایش برش در نمونه دیده نمی‌شود. ولی در تنش‌های نرمال زیاد افزودن خرده‌لاستیک کرنش قائم نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. هم‌چنین میزان نفوذپذیری مخلوط‌ها با افزایش میزان خرده‌لاستیک و کاهش تنش نرمال وارد افزایش می‌یابد. نفوذپذیری هر دو نوع خرده‌لاستیک ریز و درشت به‌تنهایی همانند انواع ماسه‌ها می‌باشد که این بیانگر این است که می‌توان از خرده‌لاستیک‌ها به‌تنهایی یا ترکیب‌شان با ماسه، به‌عنوان مصالح خاک‌ریز استفاده نمود. از طرف دیگر، پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌ها برش مستقیم نشان می‌دهد با افزودن لاستیک ریز و درشت به خاک رس، مقادیر چسبندگی افزایش و زاویه‌ی اصطکاک کاهش می‌یابند این روند تا جایی ادامه می‌یابد که درصد اختلاط لاستیک به ۴۰٪ برسد. با افزایش درصد لاستیک از ۴۰٪ به ۵۰٪ و ۱۰۰٪ میزان چسبندگی کاهش و زاویه‌ی اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد.

کومار و همکاران [18] به‌منظور بررسی اثر الیاف پلی‌استر بر روی رس، آزمایش‌های فشاری تک‌محوری

[۱۱] اثر افزودن خرده‌لاستیک به بنتونیت در خواص انقباضی و مقایسه‌ی آن با مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک مورد بررسی قرار گرفت. تحقیق با انجام تعداد قابل‌توجهی از آزمایش‌های حد انقباض بر روی نمونه‌های مخلوط با درصدهای مختلف حجمی صورت گرفته است. نتایج حاکی از اثرات قابل‌ملاحظه‌ی اصلاح خواص انقباضی بنتونیت با خرده‌لاستیک می‌باشد. به طوری که با افزایش درصد خرده‌لاستیک حد انقباض مخلوط بنتونیت-خرده‌لاستیک افزایش می‌یابد، و ترک‌های ایجاد شده حاصل از انقباض از نظر طول و عرض کاهش می‌یابند. در مقایسه‌ی این نتایج با رفتار مخلوط مشابه بنتونیت-ماسه ملاحظه می‌گردد که از لحاظ اثرگذاری بر حد انقباض، تفاوت چندانی وجود ندارد.

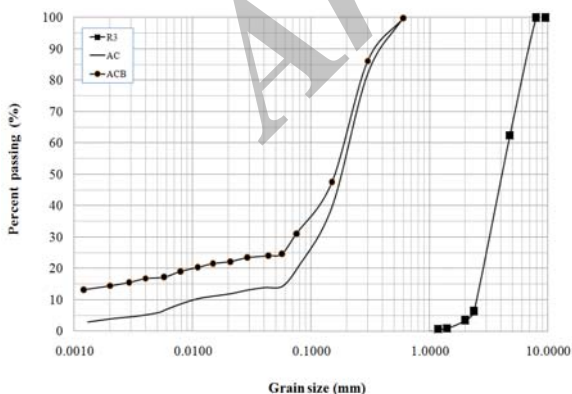
اینگلد و میلر [12] با انجام آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌شده بر روی رس کائولینیت مسلح با صفحه‌ی پلاستیکی مشبک نشان دادند که مقاومت رس مسلح نسبت به رس خالص بیشتر است و نرخ افزایش در مقاومت صفحات اندازه‌ی چشمه‌های کوچک بیشتر است. آنان با انجام آزمایش سه‌محوری زهکشی‌شده بر روی نمونه‌های رس کائولینیت و رس لندن مسلح با پلی‌اتیلن مشبک، نمود سوراخ و ژئوتکستایل تأثیر جنس مسلح‌کننده را بر مقاومت خاک مسلح بررسی نمودند. اینگلد [13] با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی خاک‌های چسبیده نشان داد که مسلح‌کننده‌های شبکه‌ای بیشترین اثر را در افزایش مقاومت و کرنش گسیختگی نسبت به مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای و نواری دارند.

بوسچر و همکاران [14] گزارش کردند که خاک‌ریز ساخته شده با مخلوط ماسه و خرده‌لاستیک، حتی زمانی که در معرض بارهای سنگین قرار می‌گیرد، رفتار رضایت‌بخشی نسبت به ماسه‌ی خالص دارد. اندرزلند و ختک [15] تأثیر افزودن نوعی الیاف سلولزی بر مقاومت برشی و رفتار تنش-کرنش رس کائولینیت را با انجام آزمایش‌های سه‌محوری بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش

## مصالح

۸ نمونه خاک متراکم، شامل ۶ مخلوط رس-خرده‌لاستیک و دو نوع رس خالص متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه‌های مخلوط از اختلاط دو نوع رس خالص با یک نوع خرده‌لاستیک با درصد وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تهیه شدند. توده ویژه ذرات خرده‌لاستیک مصرفی ۰/۹۸۸ تعیین گردید. منحنی دانه‌بندی خرده‌لاستیک و رس‌های خالص در شکل (۱) نشان داده شده است. حد روانی و شاخص خمیری میانگین مصالح چسبنده استفاده شده اصلی به ترتیب برابر با ۳۳٪ و ۱۲، و توده ویژه آن ۲/۶۹۸ است. رس مذکور براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) در گروه CL قرار می‌گیرد [20] و در این تحقیق با علامت AC معرفی می‌گردد.

برای بررسی اثر نوع رس بر روی رفتار مکانیکی مخلوط‌های رس-خرده‌لاستیک، یک نوع رس مصنوعی از مخلوط کردن ۸۰٪ رس و ۲۰٪ رس بنتونیت تجاری تهیه شد. حد روانی و شاخص خمیری این رس مخلوط به ترتیب برابر با ۶۱٪ و ۳۳ و توده ویژه آن ۲/۶۳۹ تعیین شد که در این تحقیق با علامت ACB مشخص می‌شود. این خاک براساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) در گروه CH قرار می‌گیرد [20].



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی خرده‌لاستیک و دو نوع رس

انجام دادند و استنتاج کردند که با تسلیح خاک تراکم‌پذیر به وسیله‌ی الیاف‌های پلی‌استر، مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. مختاری و همکاران [۱۹] با انجام آزمایش‌های CBR و تراکم، اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار مکانیکی مخلوط خاک-آهک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری مخلوط خاک-آهک می‌گردند و آن را از حالت ترد و شکننده خارج می‌سازد. همچنین افزایش طول الیاف و افزایش درصد وزنی الیاف (در یک طول ثابت)، سبب بیشتر شدن CBR و رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر می‌شود.

در این تحقیق به منظور پی بردن به رفتار مکانیکی مخلوط رس-خرده‌لاستیک، ابتدا با استفاده از آزمایش‌های تراکم روی نمونه‌ها، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها تعیین می‌شود و سپس بر روی نمونه‌ها، آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده در سه فشار محصورکننده‌ی متفاوت انجام می‌گردد. برای ارزیابی اثر درصد لاستیک و نوع رس بر روی رفتار مخلوط‌ها، نمونه‌ها با درصد‌های متفاوت خرده‌لاستیک و با دو نوع رس متفاوت تهیه می‌شوند. در نهایت، بر مبنای نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، ارزیابی‌های لازم در خصوص رفتار تنش-کرنش و فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها بر حسب درصد خرده‌لاستیک و نوع رس صورت می‌گیرد.

## مصالح استفاده شده و برنامه‌ی آزمایش دستگاه آزمایش سه‌محوری

برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه سه‌محوری دیجیتالی استفاده شده است. فشار جانبی موردنیاز به وسیله‌ی یک کمپرسور با ظرفیت ۱۲ بار (۱۲۰۰ kPa) تأمین می‌گردد. بار محوری برای انجام آزمایش‌های برشی به وسیله‌ی جک هیدرولیکی اعمال می‌شود. تمام اندازه‌گیری‌ها، به‌جز تغییرات حجم نمونه، به‌صورت اتوماتیک و با دقت بالا انجام می‌گیرد.

## تهیه‌ی نمونه‌ها و انجام آزمایش

برای تهیه‌ی نمونه‌های مختلف، خاک رس با مقادیر مختلف خرده‌لاستیک مخلوط گردید که فهرست این نمونه‌ها به همراه برخی از مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است. در نام‌گذاری نمونه‌ها علامت R3 اشاره به خرده‌لاستیک دارد و علائم AC و ACB نوع رس را نشان می‌دهند. عدد نوشته شده در کنار نام نمونه‌ها، بیانگر درصد وزنی رس در نمونه‌ها می‌باشد. به‌عنوان مثال، نمونه‌ی ساخته شده از ۷۰٪ رس خالص AC با علامت R3-AC70 نشان داده می‌شود.

جدول ۱ درصدهای مختلف خاک رس و خرده‌لاستیک در نمونه‌های مختلف و مشخصات آنها

نام نمونه	رس (%)	خرده‌لاستیک (%)	دانسیتته خشک (kN/m <sup>3</sup> )	درصد رطوبت (%)
AC100	۱۰۰	۰	۱۶/۳۵	۱۹/۵۰
R3-AC90	۹۰	۱۰	۱۵/۲۰	۱۹/۵۴
R3-AC80	۸۰	۲۰	۱۴/۴۰	۱۸/۰۰
R3-AC70	۷۰	۳۰	۱۳/۸۰	۱۶/۲۵
ACB100	۱۰۰	۰	۱۴/۷۸	۲۱/۷۵
R3-ACB90	۹۰	۱۰	۱۳/۶۳	۲۰/۰۰
R3-ACB80	۸۰	۲۰	۱۳/۴۲	۱۹/۲۵
R3-ACB70	۷۰	۳۰	۱۳/۱۰	۲۰/۲۵

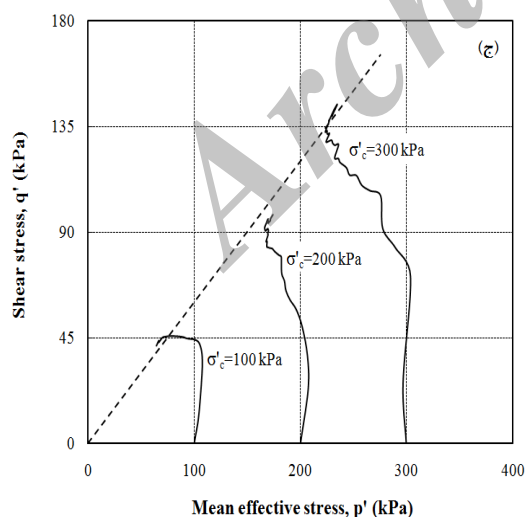
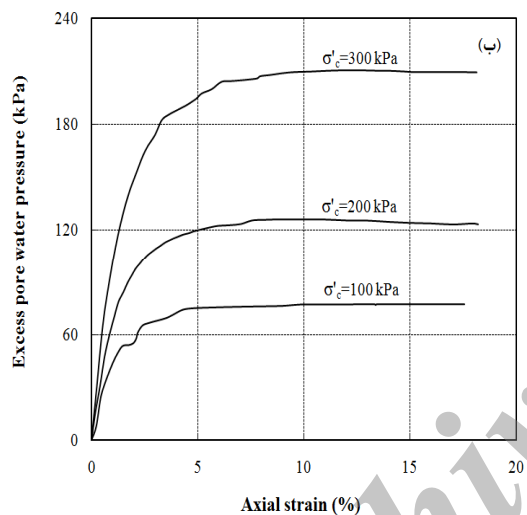
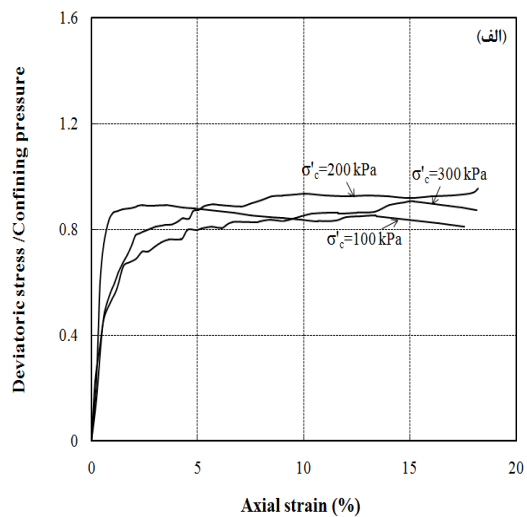
آب مخلوط شدند و برای اطمینان از پخش یکنواخت رطوبت، هر نمونه حدود ۲۴ ساعت بعد از آماده‌سازی لایه‌ها ساخته شد. هم‌چنین برای ایجاد اتصال بهتر بین لایه‌های متوالی در حین تراکم، سطح هر لایه پس از تراکم خراش داده شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی درون محفظه‌ی سه‌محوری قرار داده شدند. سپس به‌منظور اشباع نمونه‌ها، آب مقطر از داخل آنها عبور داده شده و سپس با اعمال تدریجی پس‌فشار از بالای نمونه‌ها اشباع گردیدند. پس‌فشار نهایی برای اشباع نمونه‌ها ۳۳۵kPa در نظر گرفته شد و پس از این‌که مقدار B به بیشتر از ۰/۹۷ رسید نمونه‌ها اشباع فرض شدند.

بعد از اشباع شدن، نمونه‌ها تحت تنش‌های مؤثر محصورکننده‌ی ۱۰۰kPa، ۲۰۰kPa و ۳۰۰kPa تحکیم شدند. پس از پایان مرحله‌ی تحکیم، آزمایش‌های سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده از نوع کنترل کرنش بر روی نمونه‌ها انجام شد. کلیه‌ی آزمایش‌ها تا کرنش ۱۸٪ ادامه یافت و برای اطمینان از ایجاد فشار آب حفره‌ای یکسان در سراسر نمونه در حین بارگذاری برشی، سرعت بارگذاری ۰/۰۵/min انتخاب شد.

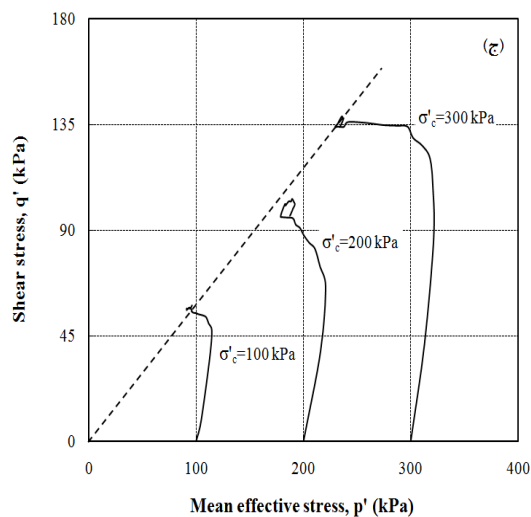
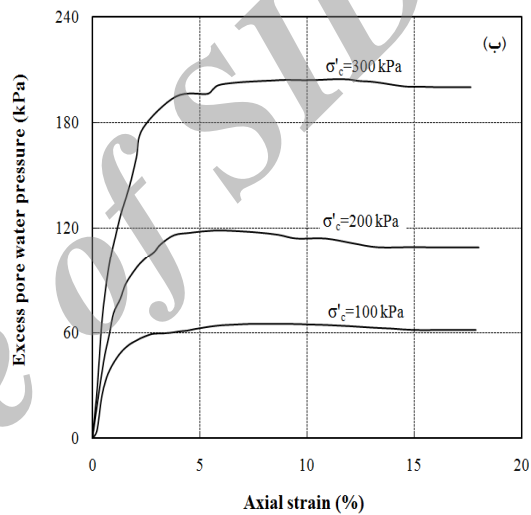
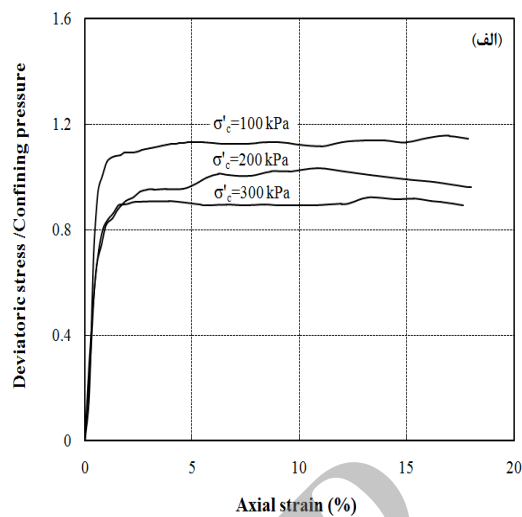
## نتایج

منحنی تنش انحرافی، فشار آب حفره‌ای و مسیرتنش (در صفحه‌ی  $q':p'$ ) برای نمونه‌ها و تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف در شکل‌های (۲) تا (۵) نشان داده شده است. در نمودارهای تنش انحرافی و فشار آب حفره‌ای، محور قائم به‌ترتیب نسبت تنش انحرافی به فشار همه‌جانبه ( $\Delta\sigma'_h/\sigma'_3$ ) و فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ )، و محور افقی هر دو نمودار کرنش محوری ( $\epsilon_h$ ) می‌باشد. در نمودارهای مسیرتنش، محور افقی تنش مؤثر میانگین ( $p'=(\sigma'_3+\sigma'_1)/2$ ) و محور قائم تنش برشی ( $q'=(\sigma'_1-\sigma'_3)/2$ ) است.

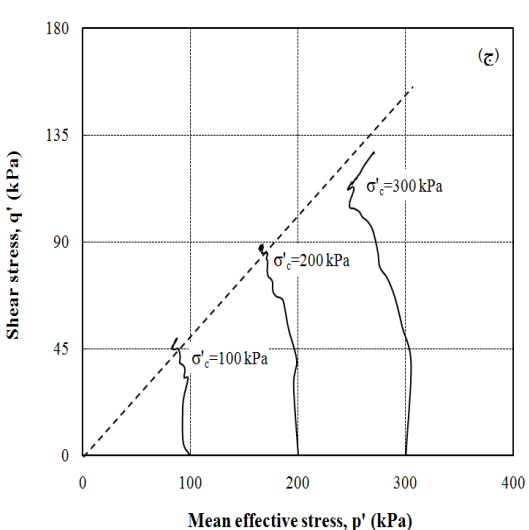
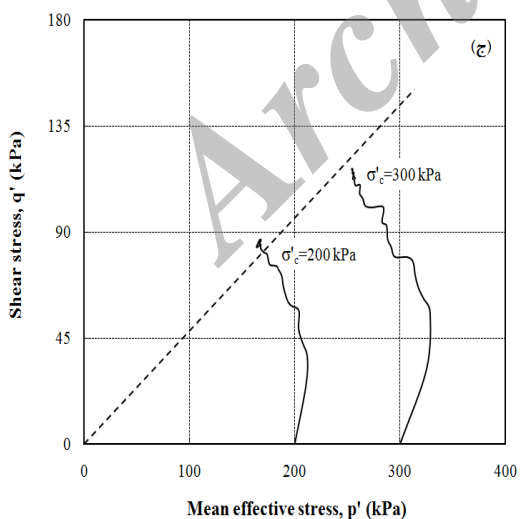
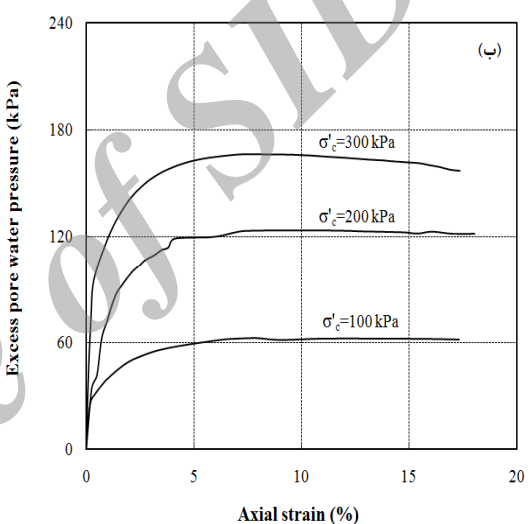
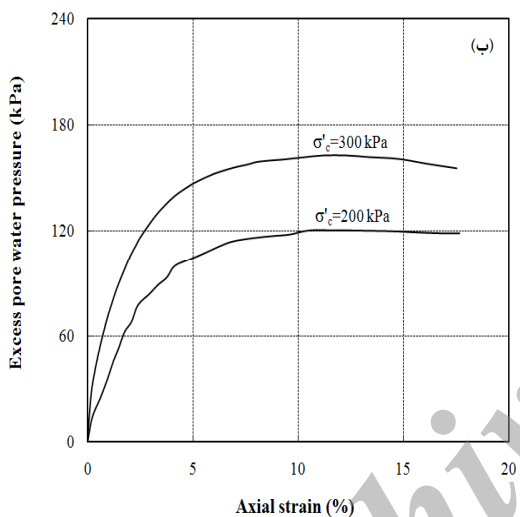
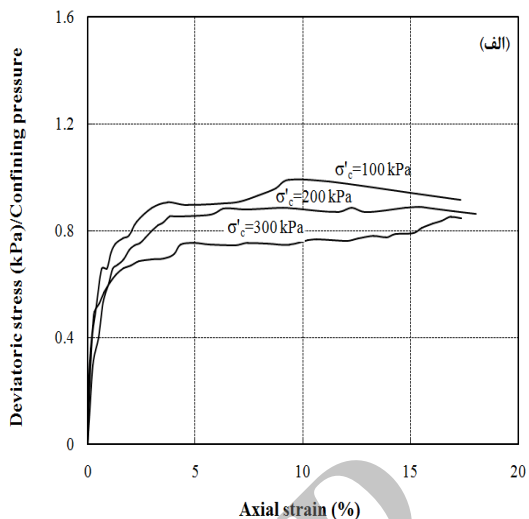
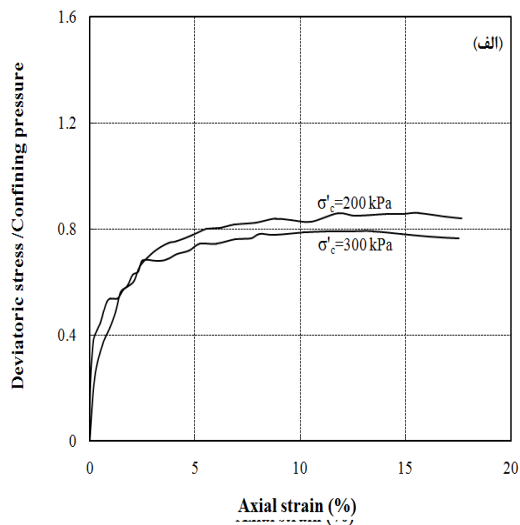
از آنجایی که در این تحقیق رفتار خاک رس مخلوط از دیدگاه کاربرد آنها در خاکریزهای متراکم مورد نظر است، نمونه‌ها با رطوبت یک درصد بیشتر از رطوبت بهینه و دانسیته‌ی معادل با ۹۵٪ وزن مخصوص خشک حداکثر حاصل از آزمایش پروکتور استاندارد تهیه شدند [21]. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به‌ترتیب ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بود. نمونه‌ها در سه لایه تهیه شدند و به‌منظور ثابت ماندن درصد اختلاط مصالح در لایه‌ها، مصالح هر لایه جداگانه در داخل کیسه پلاستیکی با



شکل ۳ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط R3-AC90 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیر تنش



شکل ۲ نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های رس AC100 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیر تنش



شکل (۵): نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های مخلوط R3-ACB90 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیر تنش

شکل ۴: نتایج آزمایش‌های سه‌محوری بر روی نمونه‌های رس ACB100 در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف: الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره‌ای و ج) مسیر تنش

مخلوط رس ACB (با نشانه‌ی خمیری بالا) ملاحظه می‌گردد که یک رابطه‌ی نزولی مابین مقاومت برشی و درصد لاستیک وجود دارد به گونه‌ای که هر چه درصد خرده‌لاستیک بیشتر می‌شود میزان مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت به رس خالص کاهش می‌یابد.

به منظور ارزیابی بهتر اثر درصد خرده‌لاستیک بر روی مقادیر پارامترهای مقاومت برشی، منحنی زاویه‌ی اصطکاک داخلی در برابر درصد خرده‌لاستیک در شکل (۸) ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بیانگر این است که افزودن خرده‌لاستیک به خاک رس AC و ACB دو اثر کاملاً متفاوت دارد. به این صورت که با افزودن ۱۰٪ خرده‌لاستیک به خاک رس نوع AC زاویه‌ی اصطکاک داخلی افزایش یافته و سپس هر چه درصد خرده‌لاستیک به خاک زیاد می‌شود زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزودن ۱۰٪ خرده‌لاستیک به خاک رس نوع ACB زاویه‌ی اصطکاک نسبت به رس خالص کاهش و سپس با افزایش درصد خرده‌لاستیک، زاویه‌ی اصطکاک داخلی افزایش می‌یابد.

هم‌چنین با توجه به شکل ملاحظه می‌گردد که هم‌گرایی مقادیر زاویه‌ی اصطکاک در نمونه‌های مخلوط رس - خرده‌لاستیک برای دو نوع رس با افزایش درصد خرده‌لاستیک بیشتر می‌گردد به طوری که پیش‌بینی می‌شود تقریباً با افزودن ۳۵٪ خرده‌لاستیک به هر دو نوع رس، مقدار زاویه‌ی اصطکاک نمونه‌ها مساوی شود.

### فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ ) ناشی از برش

برای بررسی اثر خرده‌لاستیک بر روی فشار آب حفره - ای، تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر ( $\Delta u_{max}$ ) با درصد خرده‌لاستیک در تنش‌های محصورکننده‌ی مختلف در شکل (۹) رسم شده است.

### بحث بر روی نتایج

در این بخش به بررسی اثر درصد خرده‌لاستیک بر روی نوع رس بر روی رفتار تنش - کرنش، فشار آب حفره - ای و مقاومت برشی نمونه‌ها پرداخته می‌شود.

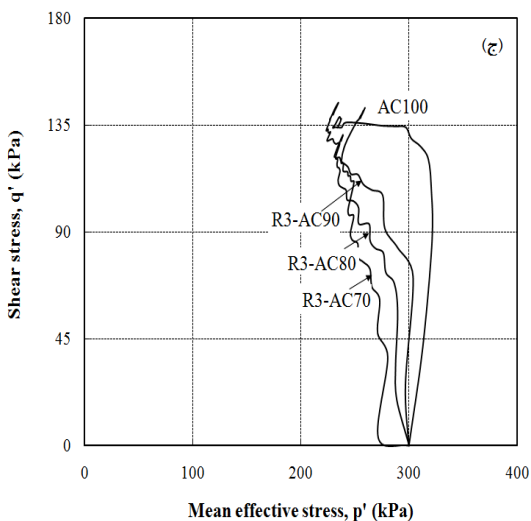
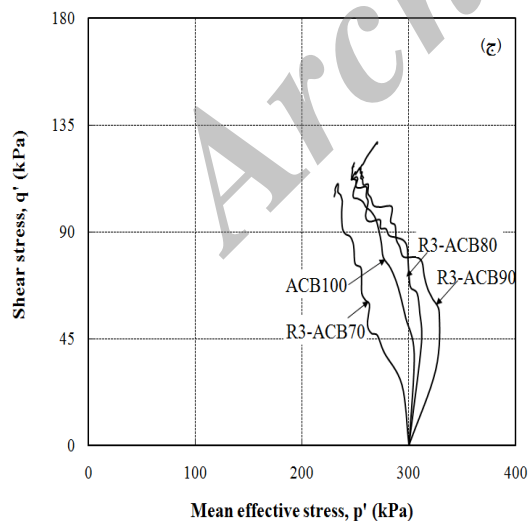
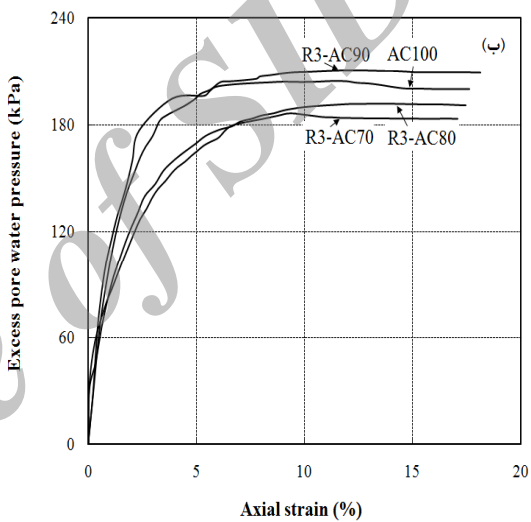
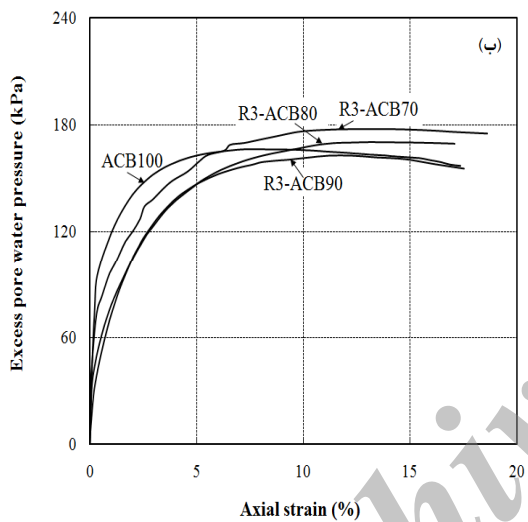
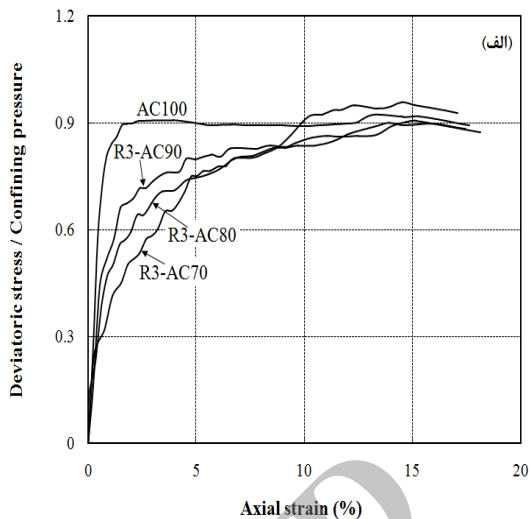
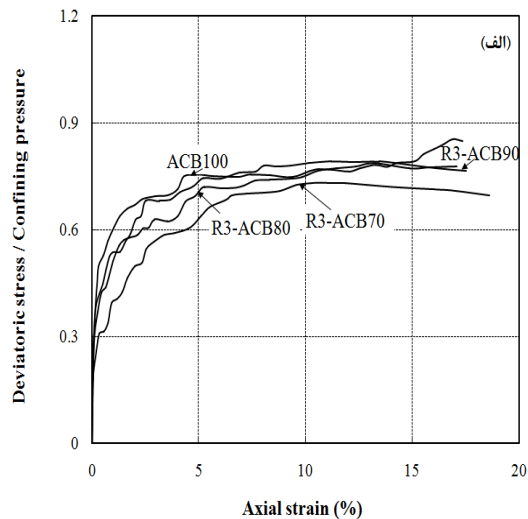
### اثر درصد خرده‌لاستیک

**رفتار تنش - کرنش.** برای بررسی اثر درصد خرده‌لاستیک بر روی رفتار نمونه‌ها، منحنی‌های تنش انحرافی، تغییرات فشار آب حفره‌ای و مسیر تنش نمونه‌های با مقادیر مختلف خرده‌لاستیک برای نمونه‌های مخلوط رس AC و ACB با خرده‌لاستیک R3 به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه می‌شود. این شکل‌ها نشان می‌دهند که در تمامی تنش‌های محصورکننده، با افزایش درصد خرده‌لاستیک، روند کلی تغییرات مقاومت برشی در سطوح کرنش پایین کاهش یافته است. در سطوح کرنش تغییرات مقاومت برشی با درصد خرده‌لاستیک برای برخی نمونه‌ها کاهش و برای برخی دیگر افزایشی است.

با بررسی تغییرات مقاومت برشی نمونه‌ها می‌توان دریافت که برای نمونه‌های مخلوط AC (با نشانه‌ی خمیری پایین) در فشار محصورکننده‌ی ۱۰۰ kPa، مقاومت برشی نمونه‌های حاوی ۱۰٪ خرده‌لاستیک نسبت به رس خالص کمتر می‌شود و با افزایش درصد خرده‌لاستیک به ۲۰٪ و ۳۰٪، میزان مقاومت برشی نیز بیشتر می‌گردد. هم‌چنین در فشارهای محصورکننده ۲۰۰ kPa و ۳۰۰ kPa، صرف‌نظر از یک استثنا، با افزایش خرده‌لاستیک در نمونه‌ها تا ۲۰٪ مقاومت برشی کاهش می‌یابد و سپس میزان مقاومت برشی نمونه‌های حاوی ۳۰٪ خرده‌لاستیک مجدداً بیشتر می‌شود و مقدار آن تقریباً برابر مقاومت برشی رس خالص است.

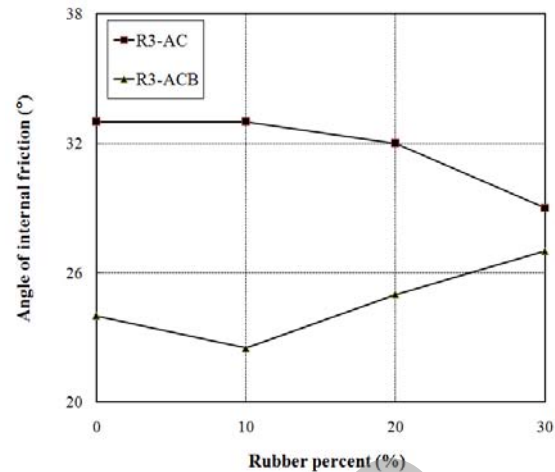
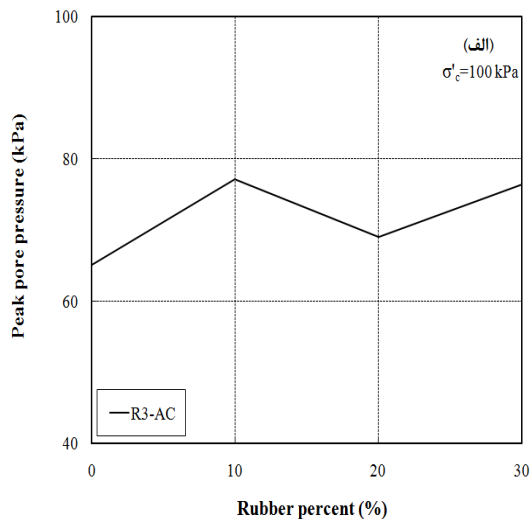
هم‌چنین با بررسی نتایج مقاومت برشی نمونه‌های



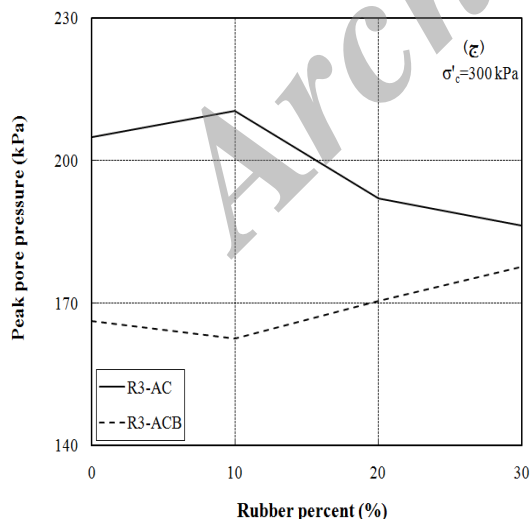
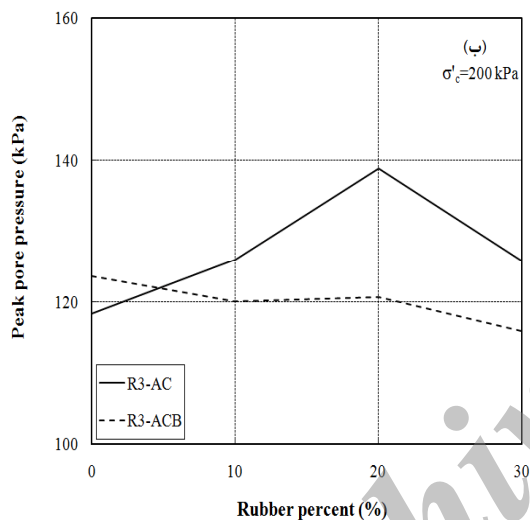


شکل ۷ نتایج آزمایش های سه محوری بر روی نمونه های مخلوط R3-ACB تحت تنش محصورکننده  $300 \text{ kPa}$ : الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره ای و ج) مسیر تنش

شکل ۶ نتایج آزمایش های سه محوری بر روی نمونه های مخلوط R3-AC تحت تنش محصورکننده  $300 \text{ kPa}$ : الف) منحنی تنش انحرافی، ب) تغییرات فشار آب حفره ای و ج) مسیر تنش



شکل ۸ تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی برحسب درصد خردده لاستیک



شکل ۹ تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر با درصد خردده لاستیک در فشارهای محصورکننده: الف) ۱۰۰ kPa، ب) ۲۰۰ kPa و ج) ۳۰۰ kPa

از این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که فشار آب حفره‌ای تولید شده در فشار محصورکننده‌ی ۱۰۰ kPa در نمونه‌های مخلوط رس AC نسبت به رس خالص زیاد می‌شود و میزان فشار آب حفره‌ای تولید شده در نمونه‌های رس-خردده لاستیک تقریباً یکسان و مستقل از درصد لاستیک است. در فشار محصورکننده‌ی ۲۰۰ kPa اضافه فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های رس مخلوط با ۱۰٪ و ۲۰٪ خردده لاستیک افزایش می‌یابد و سپس در نمونه‌های حاوی ۳۰٪ خردده لاستیک کاهش می‌یابد. در فشار محفظه‌ای ۳۰۰ kPa با افزودن خردده لاستیک به رس خالص، میزان فشار آب حفره‌ای ابتدا در ۱۰٪ لاستیک بیشتر و سپس در درصدهای بالاتر کمتر می‌شود به طوری که در نمونه‌های با ۳۰٪ خردده لاستیک فشار آب حفره‌ای کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

برای نمونه‌های به دست آمده از رس ACB دو روند متفاوت در مورد فشار آب حفره‌ای ملاحظه می‌گردد به این صورت که در فشار محفظه‌ای ۲۰۰ kPa فشار آب حفره‌ای نمونه‌ها با افزایش درصد خردده لاستیک کمتر می‌شود و در فشار محفظه‌ای ۳۰۰ kPa با افزایش درصد خردده لاستیک، میزان فشار آب حفره‌ای بیشتر می‌شود.

### اثر نوع رس

در این تحقیق از دو نوع رس با خواص خمیری متفاوت استفاده شده است، بنابراین در این بخش به بررسی اثر نوع رس بر روی پارامترهای مختلف پرداخته می‌شود.

می‌کند. برعکس در تنش تحکیمی مؤثر بالا، فشار آب حفره‌ای نمونه‌های حاوی رس با خمیری پایین، در نمونه‌ی با ۱۰٪ خرده‌لاستیک حداکثر است. در نمونه‌های رس با خمیری بالا، با افزایش درصد خرده‌لاستیک فشار آب حفره‌ای نیز بیشتر می‌گردد.

### مقاومت برشی

با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که مقاومت برشی تمامی نمونه‌های حاوی رس AC نسبت به نمونه‌های حاوی رس ACB بیشتر است، لیکن روند تغییرات مقاومت برشی با درصد خرده‌لاستیک در نمونه‌های مخلوط دو نوع رس با هم متفاوت است. به این ترتیب که در نمونه‌های مخلوط رس AC - خرده‌لاستیک به‌طور کلی با افزایش درصد خرده‌لاستیک تا حدی (حدود ۲۰٪ - ۱۰٪ خرده‌لاستیک) کاهش یافته و پس از آن با افزایش خرده‌لاستیک مقاومت برشی نیز بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، نمونه‌های حاوی ۲۰٪ - ۱۰٪ خرده‌لاستیک دارای کمترین مقاومت برشی می‌باشند. بر عکس، در نمونه‌های حاوی رس ACB، کلاً با افزایش درصد خرده‌لاستیک مقاومت برشی کمتر می‌شود.

### خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله رفتار مکانیکی نمونه‌های رسی مخلوط با خرده‌لاستیک تحت بارگذاری یکنواخت مرور گردید. برای این منظور، آزمایش‌های تراکم و سه‌محوری یکنواخت زهکشی‌نشده بر روی نمونه‌های رس مخلوط با درصدهای مختلف خرده‌لاستیک در تنش‌های محصورکننده‌ی متفاوت انجام شد. از این آزمایش‌ها نتیجه گرفته شد که:

۱- با افزودن خرده‌لاستیک به رس خالص مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه‌ی مخلوط نسبت به رس خالص کاهش می‌یابد. یعنی می‌توان از مصالح مخلوط رس - خرده‌لاستیک به‌عنوان مصالح سبک در خاکریزها استفاده نمود.

۲- در صورتی که رس دارای خمیری پایین باشد افزودن ۳۰٪ خرده‌لاستیک به رس مقاومت را کاهش نمی‌دهد، لیکن در صورتی که مقدار لاستیک کمتر باشد مقاومت نسبت به برش خالص کمتر می‌شود. در خاک رس با نشانه خمیری بالا، افزودن هر مقدار خرده‌لاستیک به رس مقاومت برشی نمونه‌ها را کاهش می‌دهد.

۳- در مورد زاویه‌ی اصطکاک داخلی می‌توان چنین استدلال کرد که چون سختی خاک رس AC از خاک رس ACB بیشتر است بنابراین افزودن خرده‌لاستیک به هر دو نوع رس، رفتار متفاوتی در آنها مشاهده می‌شود. بدین صورت می‌توان توجیه کرد که سختی ذرات رس AC بیشتر از خرده

### فشار آب حفره‌ای ( $\Delta u$ ) ناشی از برش

نتایج مربوط به تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر در شکل (۹) بیانگر آن است که نحوه‌ی تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر بسته به نوع رس متفاوت است و روند آن به مقدار تنش تحکیمی مؤثر نیز بستگی دارد. در تنش‌های تحکیمی مؤثر پایین، برای نمونه‌های مخلوط رس با خمیری پایین، فشار آب حفره‌ای در نمونه‌های با خرده‌لاستیک حدود ۲۰٪ حداکثر می‌باشد و برای نمونه‌های رس با خمیری بالا، با افزایش درصد خرده‌لاستیک فشار آب حفره‌ای اندکی کاهش پیدا

۵- در سازه‌های خاکی از قبیل خاکریزی پشت سازه‌های حائل می‌توان از مخلوط رس با نشانه خمیری پایین و خردده لاستیک با مقدار بهینه استفاده نمود که در این صورت هم مقاومت برشی خاک بیشتر می‌شود و هم فشار جانبی ناشی از خاک به علت سبک شدن مصالح کاهش می‌یابد. از این طریق می‌توان مواد زائد لاستیکی را نیز مدیریت نمود و در زمین دفن کرد.

لاستیک‌های مصرفی است، در نتیجه افزودن خردده لاستیک به رس AC باعث کاهش زاویه اصطکاک می‌گردد و در مورد مخلوط‌های رس ACB- خردده لاستیک عکس این قضیه صادق است. یعنی این‌که با افزودن خردده لاستیک به رس ACB، سختی نمونه نسبت به رس خالص افزایش می‌یابد و نهایتاً زاویه اصطکاک بیشتر می‌گردد.

۴- نحوه تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر به نوع رس و تنش تحکیمی مؤثر بستگی دارد.

## مراجع

- Humphrey, D.N., "Civil engineering applications of tire shreds", *Proceedings of the Tire Industry Conference*, Clemson University, pp. 1-16 (1999).
- سلطانی جیقه، ح.، سروش، ع.، "رفتار خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری یکنواخت"، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، شماره ۱ ج-۶۷، شماره ۱ مجله ۲۱-۲۹، (۱۳۸۶).
- سلطانی جیقه، ح.؛ "رفتار مکانیکی خاک‌های رسی مخلوط تحت بارگذاری سیکلی و پس‌سیکلی"، رساله‌ی دکتری مهندسی عمران گرایش خاک و پی (ژئوتکنیک)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (۱۳۸۵).
- Soroush, A., and Soltani-Jigheh, H., "Pre- and post-cyclic behavior of mixed clayey soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46 (2), pp. 115-128 (2009).
- Vallejo, L. E., and Mawby, R.; "Void ratio influence on the shear strength of granular material-clay mixtures", *Engineering Geology*, Vol. 58 (2), pp.125-126 (2000).
- Jafari, M.K. and Shafiee, A., "Mechanical behavior of compacted composite clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41 (6), pp. 1152-1167 (2004).
- Hoare, D.; "Synthetic Fabrics Soil Filter", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 108(10), pp. 1230-1246 (1982).
- عبدی، م. و پارسا پزوه، ع.، "بررسی خصوصیات تحکیم‌پذیری یک خاک رسی تسلیح شده توسط الیاف مصنوعی"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس تهران، (۱۳۸۵).
- عبدی، م.، فرنی، م. و پارسا پزوه، ع.، "تأثیر رطوبت بر مقاومت برشی و شکل‌پذیری کائولینیت تسلیح شده توسط الیاف طبیعی و مصنوعی"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۴).
- Ghazavi, M., Sakhi, M.A., "Optimization of aspect ratio of waste tire shreds in sand-shred mixtures using CBR tests", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28 (6), pp. 1-6, (2005).

۱۱. قضاوی، م. و برمکی، ا.، "تأثیر افزایش خرده‌لاستیک به خاک رس برای بهبود خواص انقباض‌پذیری آن"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، (۱۳۸۴).
12. Ingold, T.S., Miller, K.S., "Drained Axisymmetric Loading of Reinforced Clay". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109(7), pp. 883-898, (1983).
13. Ingold, T.S., "Reinforced clay subject to undrained triaxial loading", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109(5), pp. 738-744, (1983).
14. Bosscher, P. J., Edill, T. B., and Edlin, N. N., "Construction and performance of a shredded waste tire test embankment", Transportation Research Record 1345, Transportation Research Board, Washington, D.C, (1993).
15. Andersland OB, Khattak AS., "Shear strength of kaolinite/fiber soil mixture", *Proceedings of the first international conference on soil reinforcement*, Vol. I , pp. 11-16 Paris, (1979).
16. Nataraj, M.S., McManis, K.L., "Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers", *Geosynthetics International*, Vol. 4 (1), pp. 65-79, (1997).
17. Cetin, H., Fener, M., Gunaydin, O., "Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material", *Engineering Geology*, Vol. 88 (1-2), pp. 110-120, (2006).
18. Kumar, A, Walia, B.S., Mohan, J., "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 20 (10), pp. 1063-1068 (2006).
۱۹. مختاری، م.، پورحسینی، ر. و عبدلی، ن.، "تأثیر الیاف بر رفتار مکانیکی خاک تثبیت‌شده با آهک"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، (۱۳۸۸).
20. ASTM Standard D 2487, Standard practice for classification of soils for engineering purpose (Unified Soil Classification System), American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004).
21. ASTM Standard D 698, Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, PA, (2004).