

بررسی آزمایشگاهی امکان استفاده مصالح بازیافتی برای بهبود مشخصات مکانیکی فصل مشترک ژئوتکستایل و خاک ماسه‌ای

مهدی حسین‌زاده ستوبادی^۱، احد اوریا^{۲*}، امین قلیزاد^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۲ استاد دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

^۳ استاد دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۷/۲۶

چکیده

با استفاده از مصالح بازیافتی ناشی از تخریب ساختمان‌ها جهت تقویت فصل مشترک بین مسلح‌کننده و ماسه سست، علاوه بر این که می‌توان از مصالح بازیافتی ساختمانی مجدداً استفاده نمود، می‌توان از روش تسلیح برای افزایش ظرفیت باربری خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه و سست نیز استفاده نمود. در این تحقیق، سه نوع مصالح بازیافتی حاصل از تخریب ساختمان‌ها شامل سفال، کاشی و سرامیک جهت بهبود خواص مقاومتی فصل مشترک ماسه و مسلح‌کننده و افزایش مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده از ماسه استفاده شده است. برای مطالعه تأثیر مواد درشت‌دانه حاصل از تخریب ساختمان‌ها در بهبود مشخصات مکانیکی فصل مشترک ماسه و مسلح‌کننده، آزمایشات بیرون کشیدگی انجام شده است. برای این منظور مصالح بازیافتی درشت‌دانه به صورت لایه‌هایی با ضخامت‌های ۲، ۴ و ۸ سانتی‌متر در فصل مشترک مسلح‌کننده و ماسه قرار داده شده است. آزمایش‌های بیرون کشیدگی صورت گرفته در این تحقیق در تنش‌های عمودی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال انجام شد. نتایج آزمایش نشان‌دهنده بهبود قابل ملاحظه مقاومت فصل مشترک و ظرفیت بیرون کشیدگی خاک ماسه‌ای می‌باشد. مقاومت برشی فصل مشترک خاک و ژئوتکستایل کاملاً به ضخامت لایه‌های درشت‌دانه‌های مورد استفاده و سطح تنش عمودی مورد استفاده بستگی دارد. ظرفیت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده با افزایش ضخامت لایه‌های بازیافتی تا ۲۰۰ درصد در مقایسه با ماسه افزایش یافته است. براساس داده‌های آزمایشگاهی بیشترین مقدار افزایش مقاومت بیرون کشیدگی برای نمونه‌های تهیه شده از سرامیک مشاهده شده است.

کلیدواژه‌ها: مصالح بازیافتی، خاک مسلح، فصل مشترک، ژئوتکستایل.

۱- مقدمه

برای حفظ، نگهداری و کاهش تقاضا برای استفاده از این منابع باید تمهیداتی اندیشیده شود تا بتوان با مصالح موجود بیشترین کارایی را کسب کرد. مواد بازیافتی از ساختمان از جمله کاشی و سرامیک و بلوک سفالی از عمده مصالح ساختمانی می‌باشد که در هر پروژه ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Savadkoohi و Reisi، ۲۰۲۰). این مواد در سال‌های اخیر به صورت بی‌سابقه‌ای در صنعت ساخت‌وساز به کار گرفته می‌شود، که این حجم از مصالح در آینده نزدیک می‌تواند برای محیط زیست مشکلات بسیاری را به وجود آورد. امروزه برای تولید مصالح ساختمانی مورد استفاده در کارهای عمرانی به حجم عظیمی از انرژی و هزینه نیازمند می‌باشد که برای طبیعت تهدید بسیار جدی محسوب می‌شود (Nidheesh و Kumar، ۲۰۱۹).

مصالح ساختمانی مورد استفاده در ساخت‌وساز از منابع موجود در طبیعت به دست می‌آیند. حفاظت و نگهداری از منابع طبیعی موجود لازمه توسعه و پیشرفت هر جامعه‌ای می‌باشد. با افزایش روزافزون جمعیت میزان نیاز به استفاده از این منابع و مصرف آن‌ها روزبه‌روز به صورت شتابان در حال افزایش می‌باشد. به موازات استفاده فزاینده از این منابع، نخاله‌های ساختمانی حاصل از ساخت و ساز باعث به وجود آمدن مشکلات عدیده‌ای در سطح جهانی شده است. کاهش منابع طبیعی و دفن زباله‌های ساختمانی از عمده مشکلات به وجود آمده به وسیله صنعت مدرن برای بشر می‌باشد (Mistri و همکاران، ۲۰۲۰).



مانند ژئوتکستایل‌ها به دلیل سهولت تولید و استفاده متداول‌تر است (Ouria و همکاران، ۲۰۱۹). پایداری سیستم خاک مسلح تابع سه عامل گسیختگی برشی خاک، گسیختگی کششی مسلح-کننده و لغزش بین مسلح‌کننده و خاک می‌باشد (Yin و Shukla، ۲۰۰۶).

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، انواع مسلح‌کننده‌ها با مقاومت‌های کششی بسیار بالا موجود می‌باشد. یکی از مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین پارامترهای طراحی سیستم‌های خاک مسلح، مقاومت اصطکاکی فصل مشترک بین خاک و مسلح‌کننده می‌باشد که تابع سطح تنش محصورکننده، مشخصات خاک، جنس و زبری سطح مسلح‌کننده است. فصل مشترک ضعیف بین خاک و مسلح‌کننده مانع استفاده از مسلح‌کننده‌های قوی بوده و باعث افزایش طول مهاری مسلح‌کننده می‌شود. نیاز به طول مهاری بزرگ مانع استفاده از خاک مسلح در بسیاری از پروژه‌ها می‌شود. در دیوارهای خاک مسلح، با افزایش طول مهاری، حجم عملیات خاکی به شدت افزایش یافته و هزینه‌های استفاده از خاک مسلح را بیشتر می‌کند. در بسیاری از پروژه‌ها محدودیت زمین باعث ایجاد محدودیت در طول مهاری شده و استفاده از خاک مسلح را دشوار می‌کند (Ouria و همکاران، ۲۰۲۱؛ Ouria و همکاران، ۲۰۲۲).

استفاده از مسلح‌کننده‌های مجوف باعث افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده از خاک می‌شود ولی روش تولید پرهزینه این مسلح‌کننده‌ها باعث ایجاد محدودیت در استفاده وسیع آن‌ها شده است (Racana و همکاران، ۲۰۰۳). مسلح‌سازی خاک‌ها معمولاً در خاک‌های دانه‌ای که اندرکنش مناسب‌تری با مسلح‌کننده انجام می‌شود. نیروی بیرون‌کشش سیستم مورد استفاده را می‌توان با افزایش سطح تماس بین دانه‌های خاک و ژئوسنتتیک‌ها^۱ افزایش داد (Ouria و همکاران، ۲۰۲۰؛ Ouria و Heidary، ۲۰۲۱).

مهار کردن مسلح‌کننده یکی از روش‌های افزایش کارایی استفاده از ژئوسنتتیک‌ها می‌باشد که سبب می‌شود ظرفیت بیرون‌کشش، به صورت قابل‌توجهی افزایش یابد (Ouria و Sadeghpour، ۲۰۲۲).

Ebadi و همکاران (۲۰۱۵)، Ouria و Mahmoudi (۲۰۱۸) و Ouria و همکاران (۲۰۱۹) و (۲۰۲۱)، تقویت مشخصات مکانیکی محل تماس مسلح‌کننده و خاک با استفاده از سیمان را روشی برای کاهش طول بهینه مسلح‌کننده پیشنهاد داده‌اند.

Toufigh و همکاران (۲۰۱۶) استفاده از رزین اپوکسی را برای تقویت مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌های الیاف کربنی را پیشنهاد داده‌اند. نتایج بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده تأثیر ضخامت ناحیه فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده در



شکل ۱- مصالح بازیافتی ساختمانی رها شده در طبیعت

در شکل (۱)، آلودگی محیطی ناشی از رهاسازی مصالح حاصل از تخریب ساختمان‌ها در اطراف شهر تبریز نشان داده شده است. استفاده مجدد از مصالح بازیافتی ساختمانی می‌تواند سبب تحول اقتصادی و طبیعی بسیار خوبی باشد که می‌تواند مشکل دفن این مصالح را حل کرده و هم سبب کاهش هزینه ساخت‌وساز شود. در سال‌های اخیر توجه به استفاده از مصالح حاصل از تخریب ساختمان‌ها در صنعت آسفالت، دیوارهای خاک مسلح، تولید موج-شکن‌ها و بتن‌هایی که سازگار با طبیعت شناخته می‌شود بسیار بیشتر شده است (Santos و همکاران، ۲۰۱۳؛ Nidheesh و Kumar، ۲۰۱۹؛ Tavakoli Mehrjardi و همکاران، ۲۰۲۰؛ Thakur و همکاران، ۲۰۱۲).

رشد روزافزون جمعیت در مناطق شهری و صنعتی، با توجه به پارامترهای اقتصادی و طبیعی سبب شده است استفاده از زمین‌های با ظرفیت باربری و برشی نامناسب نیز امری اجتناب‌ناپذیر باشد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در خاک‌ها همانند سایر مصالح دانه‌ای توسط اندرکنش بین دانه‌ها تولید می‌شود. زمانی که مقاومت برشی، خصوصیات مکانیکی و ظرفیت باربری خاک مورد استفاده نامناسب باشد، می‌توان با استفاده از مسلح‌سازی خاک به مقاومت مورد نظر دست یافت (Ouria و همکاران، ۲۰۱۶). در دهه‌های اخیر نیز استفاده از انواع مسلح‌کننده‌ها در سازه‌های خاکی بسیار متداول شده است. استفاده از مسلح‌کننده می‌تواند باعث افزایش ضریب ایمنی، بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز شود. ژئوسنتتیک‌ها مصالحی می‌باشد که به صورت عمده جهت مسلح‌سازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Toufigh و همکاران، ۲۰۱۴). برای تسلیح خاک با مسلح‌کننده‌ها چندین روش متفاوت وجود دارد که هرکدام از روش‌ها براساس نوع پروژه و شرایط آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. مسلح کردن خاک می‌تواند با استفاده از المان‌های صفحه‌ای مانند ژئوتکستایل^۱، المان‌های رشته‌ای مانند الیاف شیشه یا کربن و المان‌های سه‌بعدی مانند ژئوسل‌ها^۲ صورت گیرد. استفاده از مسلح‌کننده‌های صفحه‌ای

جدول ۱- خصوصیات خاک ماسه‌ای مورد استفاده

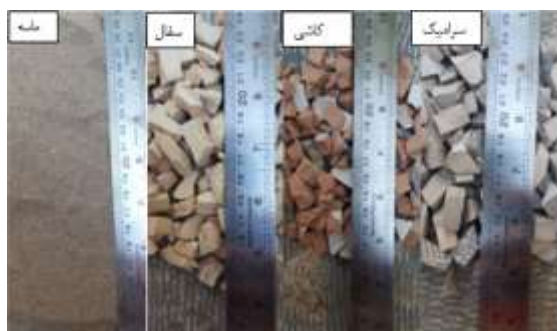
استاندارد	مقدار	کمیت
ASTM D ۱۱-۲۴۸۷	۰/۱۰۸	D10mm
ASTM D ۱۱-۲۴۸۷	۰/۱۵	D30mm
ASTM D ۱۱-۲۴۸۷	۰/۲۴۳	D60mm
ASTM D ۱۱-۲۴۸۷	۲/۲۵	ضریب یکنواختی
ASTM D ۱۱-۲۴۸۷	۰/۸۶	ضریب انحنای
ASTM D ۱۱-۳۰۸۰	۶/۵	چسبندگی
ASTM D ۱۱-۲۴۸۷	۳۵/۶۴°	زاویه اصطکاک داخلی
ASTM S ۷-۱۲۷	۱۵/۷۵ کیلونیوتن بر مترمکعب	وزن مخصوص خشک حداکثر
ASTM S ۷-۱۲۷	۱۳/۴۵ کیلونیوتن بر مترمکعب	وزن مخصوص خشک حداقل
ASTM S ۷-۱۲۷	۰/۸۱۴	نسبت تخلخل حداکثر
ASTM S ۷-۱۲۷	۰/۵۲۲	نسبت تخلخل حداقل

جدول ۲- خصوصیات مسلح کننده

استاندارد	مقدار	کمیت
ASTM D ۱۱-۴۵۹۵	۱۱۱/۸۳	ظرفیت کششی (کیلونیوتن بر متر)
ASTM D ۱۱-۴۵۹۵	۱۲/۲۳	تغییر طول نظیر گسیختگی (%)
ASTM D ۱۱-۴۵۹۵	۹۱۴/۳۹	ظرفیت کششی (کیلونیوتن بر مترمربع)
ASTM D ۱۱-۴۵۹۵	۰/۹۳۸	جرم واحد سطح (کیلونیوتن بر مترمربع)

۲-۳- مصالح بازیافت شده

مصالح بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق از مصالح ساختمانی زاید شامل کاشی، سفال و سرامیک که غیرقابل استفاده بوده‌اند، تأمین شده است. مصالح بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۲) نشان داده شده است. مصالح ساختمانی مورد استفاده در این آزمایشات از سفال، سرامیک و کاشی مورد استفاده در ایران بوده که با چکش خرد شده‌اند و همگی گذرنده از الک ۳/۸ بوده و مقاومت برشی و خصوصیات فصل مشترک نمونه‌ها با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس با ابعاد ۳۰×۳۰ سانتی‌متر براساس استاندارد (ASTM D3080-11 2011) با تنش عمودی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلوپاسکال تعیین شده است.



شکل ۲- مصالح مورد استفاده

مشخصات مکانیکی تماس بین آن‌ها می‌باشد (Ouria و همکاران، ۲۰۱۹).

خواص فصل مشترک بین مصالح درشت‌دانه به‌دست آمده از مصالح بازیافتی ساختمانی و ژئوسنتتیک‌ها توسط Vieira و همکاران (۲۰۱۵) مورد مطالعه قرار گرفته است. اندرکنش بین ژئوسنتتیک‌ها و مصالح به‌دست آمده از نخاله‌های ساختمانی به-اندازه و شکل دانه‌های این مصالح بستگی دارد. در سال‌های اخیر، با توجه آثار زیست‌محیطی مصالح مصنوعی مورد استفاده در خاک مسلح و نخاله‌های تولید شده از ساخت‌وساز، استفاده از مصالح بازیافتی و نخاله‌ای در خاک مسلح و تأمین بیشترین پایداری و ظرفیت باربری با کمترین مسلح‌کننده مورد توجه قرار گرفته‌است. (Vieira و همکاران، ۲۰۱۶). از طرفی گرچه هزینه مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در سازه‌های خاک مسلح زیاد نیست، ولی حجم عملیات خاکی شامل خاکبرداری، خاکریزی و کوبیدن خاکریز متناسب با طول و تعداد لایه‌های مسلح‌کننده بوده و هزینه عملیات خاکی بیشتر از هزینه مسلح‌کننده‌ها است. از این‌رو، استفاده بهینه از مسلح‌کننده‌های مورد استفاده در سازه‌های خاک مسلح دارای اهمیت زیست محیطی و اقتصادی می‌باشد (Savadkoochi و Reisi، ۲۰۲۰).

در این تحقیق امکان استفاده از مصالح بازیافت شده حاصل از تخریب ساختمان‌ها برای تقویت فصل مشترک مسلح‌کننده با خاک بررسی شده است. برای این منظور از سه نوع مصالح بازیافتی که از تخریب مصالح ساختمانی پرکاربرد در ایران شامل کاشی، سفال و سرامیک به‌عنوان تقویت‌کننده فصل مشترک بین ماسه و مسلح‌کننده استفاده شده است. با انجام آزمایشات بیرون-کشیدگی در ماسه، مصالح بازیافتی و ماسه تقویت شده با لایه‌های مصالح بازیافتی، مشخصات فصل مشترک بین مصالح و مسلح‌کننده و مقاومت بیرون‌کشیدگی آن تعیین و مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ماسه

ماسه استفاده شده در این آزمایش از شمال اردبیل جمع‌آوری شده‌است که براساس سیستم متحد، از نوع ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) بوده است. ویژگی‌های ماسه مورد استفاده در این پژوهش جدول (۱)، آورده شده‌است.

۲-۲- مسلح‌کننده

مسلح‌کننده استفاده شده در این پژوهش از نوع ژئوتکستایل بافته‌شده پرمقاومت بوده است. ویژگی‌های مسلح‌کننده مورد استفاده در این آزمایش‌ها، در جدول (۲)، نشان داده شده است.

۲-۴- دستگاه کشش مسلح کننده

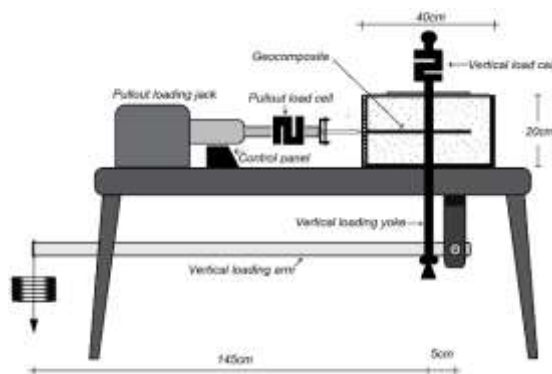
در این تحقیق مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده مصالح بازیافتی ساختمانی از خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، کلیه آزمایش‌ها در دستگاه کشش ژئوتکستایل صورت گرفته است. دستگاه مورد استفاده دارای سیستم بارگذاری قائم و افقی مستقل می‌باشد. جعبه بارگذاری به ابعاد $20 \times 40 \times 40$ سانتی‌متر (طول، عرض و ارتفاع) بوده که نوار مسلح کننده در وسط آن قرار می‌گیرد. دیواره‌های جعبه تا حد امکان صاف و صیقلی شده و همچنین طول و عرض جعبه کشش به اندازه کافی بزرگ نظر گرفته شده تا فاصله کافی جهت از بین رفتن اثر اصطکاک دیواره‌ها در توزیع تنش قائم وجود داشته حدود 10 cm خاک در زیر و بالای مسلح کننده قرار می‌گیرد. سیستم بارگذاری کششی این دستگاه از یک جک الکترومکانیکی گیربکس‌دار تشکیل شده است. این سیستم به صورت کنترل جابه‌جائی عمل کرده و حداکثر دامنه جابه‌جائی قابل اعمال برابر 15 cm می‌باشد.

دو نیروسنج 5 تنی برای اندازه‌گیری نیروهای کشش افقی و نیروی قائم اعمال شده تعبیه شده است. جهت سهولت جای‌گذاری مسلح کننده‌ها در داخل جعبه، دیواره سمت سیستم بارگذاری جعبه با استفاده از مفتول‌های فولادی به صورت تطبیق پذیر ساخته شده است. این دیواره از روی هم قرار گرفتن مفتول‌های فولادی تشکیل شده که امکان تنظیم و تغییر محل قرارگیری مسلح کننده‌ها را فراهم می‌سازد. دستگاه مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- دستگاه مورد استفاده

ارزیابی قرار گرفتند. مهم‌ترین پارامتر در یک مطالعه آزمایشگاهی، توانایی تولید نمونه‌های مشابه است. در خلال آزمایش‌های انجام شده تلاش شده است که نمونه‌های ساخته شده کاملاً مشابه یکدیگر بوده و دارای شرایط ضخامت و تراکم یکسانی باشند. وزن واحد ماسه استفاده شده در جعبه $14/7 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$ بوده است. این وزن مخصوص براساس آزمایش‌های انجام شده تعیین شد که با در نظر گرفتن تنش قائم اعمالی، محل قرارگیری مسلح کننده از تراز محل کشش خارج نشود. عرض نوار مسلح کننده 5 سانتی‌متر بوده و مدفون مسلح کننده در داخل جعبه کشش 30 سانتی‌متر بوده است. نرخ سرعت بیرون کشیده شدن ژئوتکستایل از داخل نمونه‌ها $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ و تنش‌های عمودی انجام آزمایش 25 ، 50 و 75 کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. در شکل (۴)، مقطع نمونه‌ها و محل قرارگیری مسلح کننده، ماسه و لایه مصالح بازیافتی که برای تقویت فصل مشترک استفاده شده است، نشان داده شده است.



شکل ۴- شماتیک آماده‌سازی نمونه

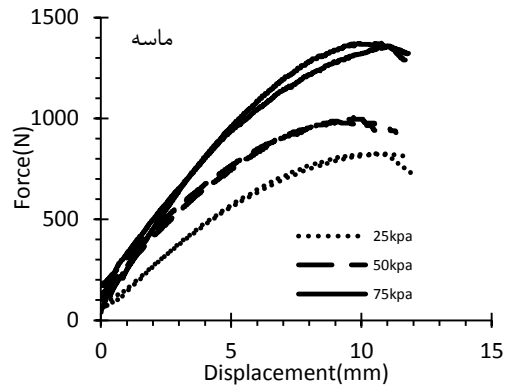
۳- نتایج

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه، سفال، کاشی و سرامیک در شکل (۵) نشان داده شده است. در این آزمایش‌ها مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده از ماسه و سه نوع مصالح بازیافتی انجام شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده در مصالح بازیافتی به مراتب بیشتر از مقاومت بیرون کشیدگی آن در ماسه ریز بوده است. مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده در مصالح حاصل از بازیافت سفال به ترتیب حدود $2/22$ ، $2/08$ و $1/8$ برابر مقاومت بیرون کشیدگی همان مسلح کننده در ماسه برای تنش‌های عمودی 25 ، 50 و 75 کیلوپاسکال بوده است. نسبت مقاومت بیرون کشیدگی مسلح کننده در مصالح حاصل از بازیافت کاشی و سرامیک نیز به ترتیب حدود $2/65$ ، $2/54$ و $2/19$ برابر ماسه و $3/03$ ، $3/44$ و $3/07$ برابر ماسه در تنش‌های عمودی 25 ، 50 و 75 کیلوپاسکال بوده است.

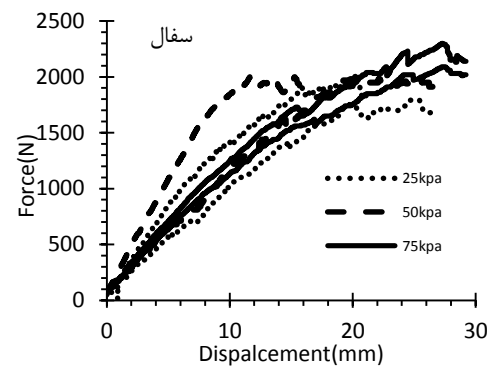
۲-۵- آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت بررسی تأثیر ارتفاع و نوع مصالح بازیافتی در قدم اول مقاومت بیرون کشیدگی خاک ماسه‌ای بدون استفاده از هیچ‌گونه مصالح بازیافتی ساختمانی تعیین و در قدم بعدی هریک از مصالح درشت‌دانه در ضخامت‌های 2 ، 4 و 8 سانتی‌متری و در نهایت زمانی که جعبه آزمایش از مصالح بازیافتی پر شده است، مورد

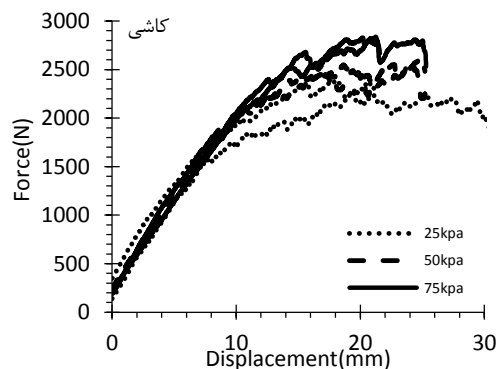
همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت بیرون‌کشیدگی به ترتیب در سفال، کاشی و سرامیک مشاهده شده است. همچنین مشاهده می‌شود که نسبت مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده در مصالح مختلف مقدار ثابتی نبوده و با تغییر سطح تنش قائم تغییر کرده است. در هر حال بیشترین مقاومت بیرون‌کشیدگی برای سرامیک بوده و حدود ۲/۸۵ برابر مقاومت بیرون‌کشیدگی همان مسلح‌کننده در ماسه بوده است.



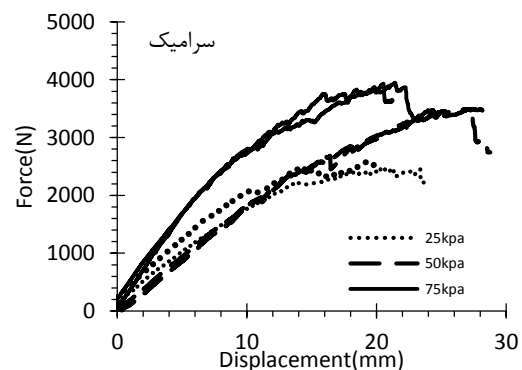
(الف)



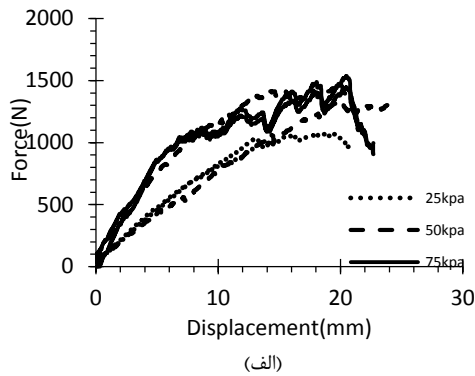
(ب)



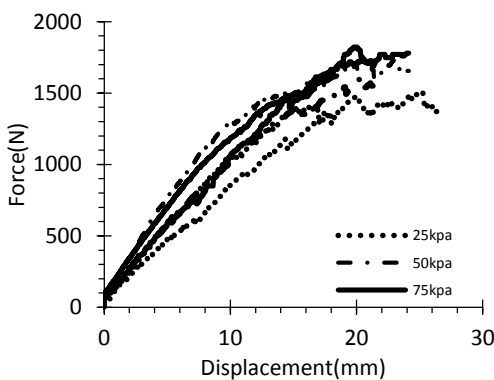
(ج)



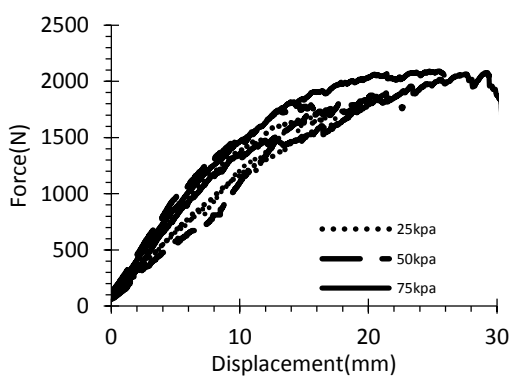
(د)



(الف)



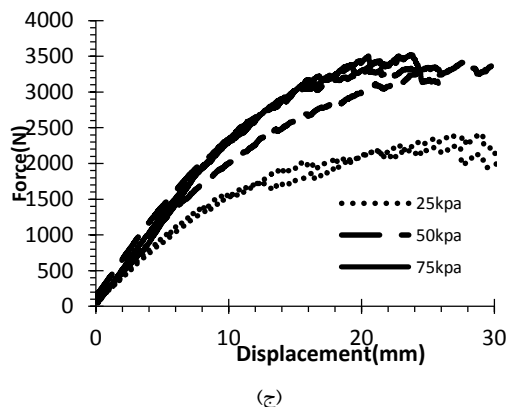
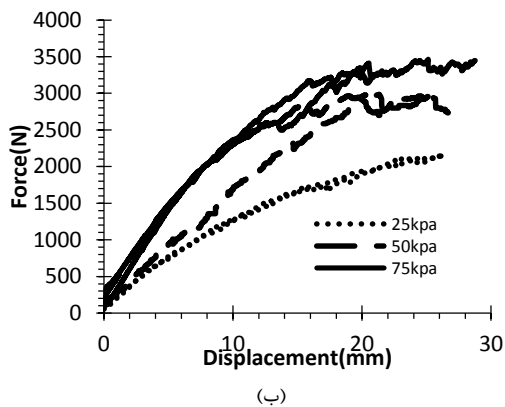
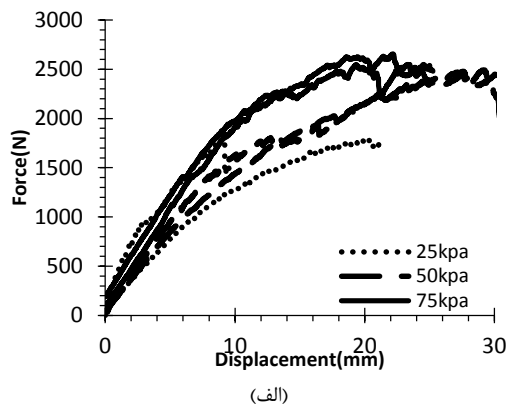
(ب)



(ج)

شکل ۶- نمودار نیروی بیرون‌کشیدگی - جابه‌جایی مسلح‌کننده در ماسه با فصل مشترک تقویت‌شده با لایه‌های سفال بازیافتی با ضخامت‌های: الف) ۲، ب) ۴، ج) ۸ سانتی‌متر

شکل ۵- نمودار نیروی بیرون‌کشیدگی - جابه‌جایی مسلح‌کننده در: الف) ماسه، ب) سفال، ج) کاشی، د) سرامیک

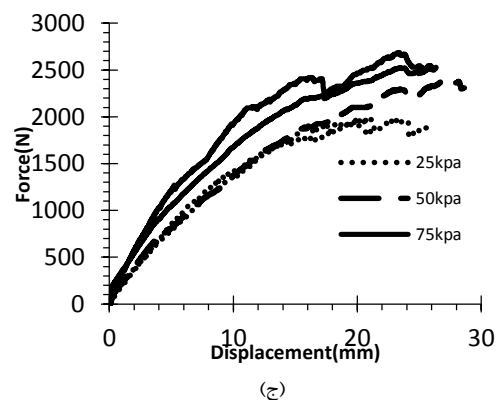
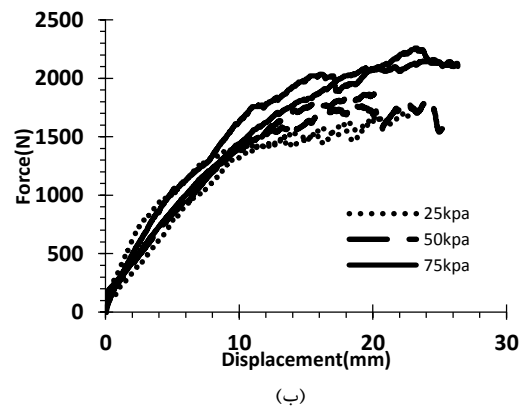
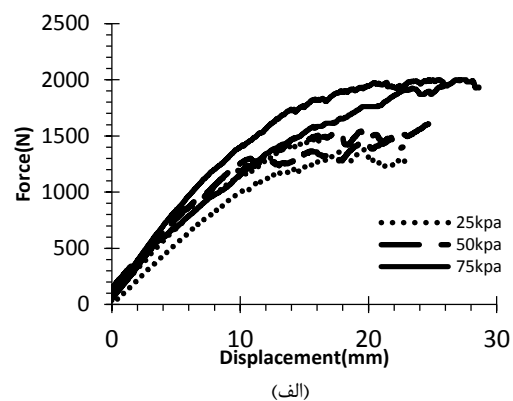


شکل ۸- نمودار نیروی بیرون کشیدگی - جابه‌جایی مسلح‌کننده در ماسه با فصل مشترک تقویت شده با لایه‌های سرامیک باز یافتی با ضخامت‌های: الف) ۲، ب) ۴، ج) ۸ سانتی‌متر

این افزایش به‌صورتی است که نرخ افزایش مقاومت بیرون کشیدگی با ضخامت لایه تقویت‌کننده رابطه خطی نداشته و با افزایش ضخامت لایه تقویت‌کننده کاهش می‌یابد. این روند کاهش نرخ بهبود مقاومت بیرون کشیدگی برای هر سه نوع مصالح باز یافتی مشابه می‌باشد.

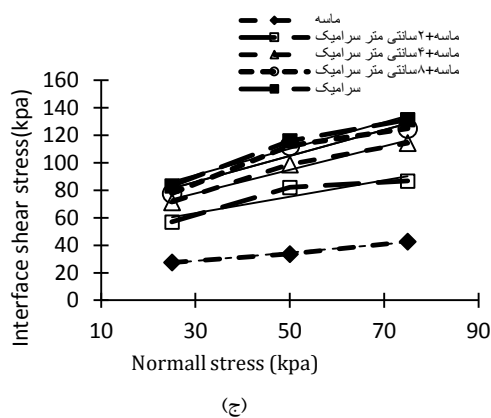
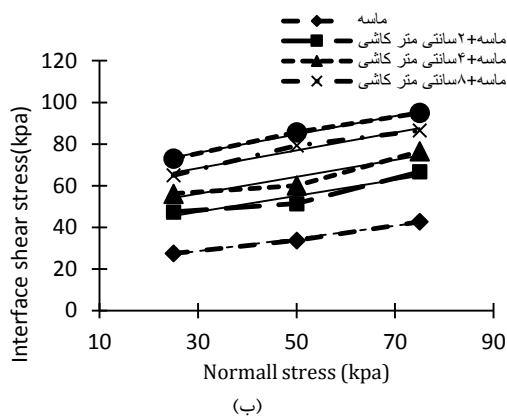
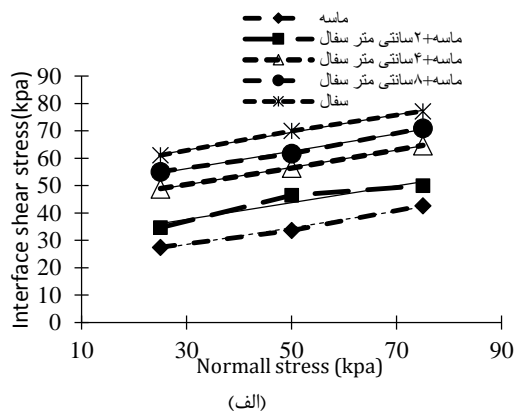
در شکل (۹)، مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده در داخل ماسه با فصل مشترک تقویت شده با سه نوع مصالح حاصل از باز یافت سفال، کاشی و سرامیک به‌صورت تابعی از ضخامت لایه تقویت‌کننده فصل مشترک نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر استفاده از لایه‌های مصالح باز یافتی در فصل مشترک ماسه و مسلح‌کننده در مقاومت بیرون کشیدگی، مصالح باز یافتی به‌صورت لایه‌هایی به ضخامت‌های ۲، ۴ و ۸ سانتی‌متر در هر دو طرف مسلح‌کننده قرار داده شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مدل‌های دارای فصل مشترک تقویت شده با مصالح به‌دست آمده از باز یافت سفال، کاشی و سرامیک با ضخامت‌های مختلف به‌ترتیب در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، برای هر سه نوع مصالح باز یافتی، افزایش ضخامت لایه تقویت‌کننده فصل مشترک باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی می‌شود.

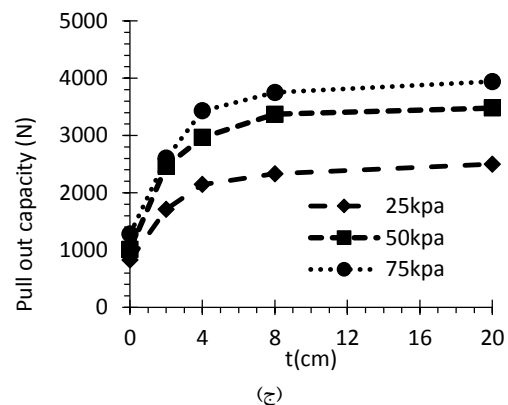
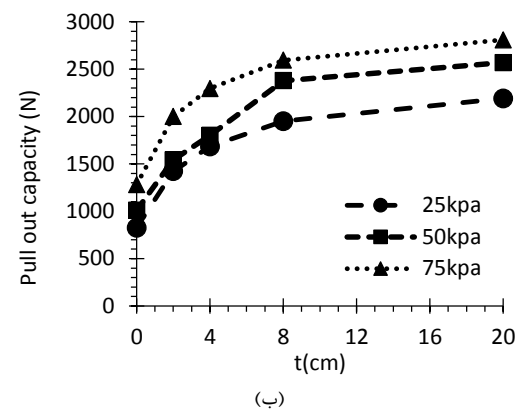
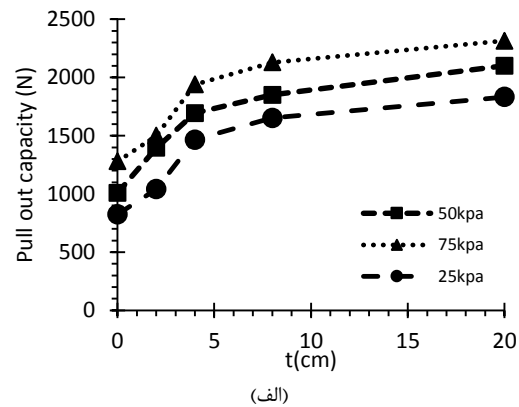


شکل ۷- نمودار نیروی بیرون کشیدگی - جابه‌جایی مسلح‌کننده در ماسه با فصل مشترک تقویت شده با لایه‌های کاشی باز یافتی با ضخامت‌های: الف) ۲، ب) ۴، ج) ۸ سانتی‌متر

لایه تقویتی ۴ سانتی‌متری با لایه ۱۰ سانتی‌متری در سه مصالح بازیافتی نشان می‌دهد که اختلاف مقاومت بیرون کشیدگی در این ضخامت‌ها برای سفال حدود ۹ درصد، برای کاشی حدود ۸ درصد و برای سرامیک حدود ۵ درصد بوده است. در شکل (۱۰) پوش گسیختگی موهر- کولمب برای فصل مشترک مسلح‌کننده و ماسه ضخامت‌های مختلف سه نوع مصالح بازیافتی تقویت شده، نشان داده شده است.



شکل ۱۰- پوش گسیختگی فصل مشترک تقویت شده با مصالح حاصل از بازیافت: الف) سفال، ب) کاشی، ج) سرامیک با ضخامت‌های مختلف



شکل ۹- تأثیر ضخامت‌های مختلف تقویت‌کننده فصل مشترک با مصالح حاصل از بازیافت: الف) سفال، ب) کاشی، ج) سرامیک در مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده در ماسه

ضخامت لایه تقویت‌کننده نظیر صفر برای بیان مقاومت بیرون کشیدگی در ماسه خالص و ضخامت نظیر ۱۰ سانتی‌متر برای بیان مقاومت بیرون کشیدگی در مصالح بازیافتی استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، برای هر سه نوع مصالح بازیافتی، افزایش ضخامت لایه تقویت‌کننده فصل مشترک باعث افزایش مقاومت بیرون کشیدگی تا اندازه مشخصی شده و بیش از آن اندازه، افزایش بیشتر ضخامت تقویت‌کننده فصل مشترک تأثیر چندانی در در افزایش مقاومت بیرون کشیدگی نداشته است. مقایسه مقاومت بیرون کشیدگی مسلح‌کننده دارای

برای بررسی احتمال آسیب‌پذیری مسلح‌کننده‌ها توصیه می‌شود مقاومت کششی مسلح‌کننده‌ها بعد از انجام آزمایش بیرون-کشیدگی با مقاومت کششی اولیه مسلح‌کننده‌ها مقایسه گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر استفاده از مصالح بازیافتی ساختمانی در افزایش ظرفیت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده‌های مسطح در درون خاک ماسه‌ای به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. در عصر جدید، به‌واسطه توسعه چشمگیر فعالیت‌های صنعتی و ساختمانی، منابع طبیعی با سرعت زیادی مصرف شده و حجم زیادی از زباله‌ها و نخاله‌های ساختمانی تولید می‌شود. رهاسازی این مواد زائد، باعث بروز مسائل زیست‌محیطی شده است. استفاده از مصالح بازیافتی ساختمانی در پروژه‌های مختلف سبب کاهش در میزان خاک‌برداری و خاکریزی می‌شود که این عمل موجب حفظ هرچه بیشتر محیط زیست و صرفه‌جویی در منابع اقتصادی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مصالح بازیافتی می‌تواند به بهبود مشخصات مکانیکی فصل مشترک خاک و مسلح‌کننده کمک کند. در این تحقیق سه نوع مصالح ناشی از بازیافت مصالح ساختمانی رایج در ایران مورد مطالعه قرار گرفت.

استفاده از یک لایه نازک مصالح بازیافتی با ضخامت حدود ۱ سانتی‌متر در هر دو طرف مسلح‌کننده (برابر درشت‌ترین اندازه مصالح بازیافتی) باعث افزایش بین ۲۰ تا ۲۰۰ درصد مقاومت بیرون‌کشیدگی آن شد که کمترین مقدار مربوط به مصالح بازیافت ناشی از سفال و حداکثر مقدار آن مربوط به مصالح ناشی از بازیافت سرامیک بوده است.

میزان افزایش مقاومت بیرون‌کشیدگی مسلح‌کننده تابع نوع مصالح بازیافتی، ضخامت لایه تقویت‌کننده فصل مشترک و نیز سطح تنش قائم اعمال شده بستگی دارد.

با افزایش ضخامت لایه بازیافتی در فصل مشترک مسلح‌کننده و ماسه مقاومت بیرون‌کشیدگی تا حد معینی افزایش یافته و سپس ثابت می‌ماند.

با افزایش سطح تنش، تأثیر لایه بازیافتی در بهبود مشخصات فصل مشترک کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

- ASTM C127-07, Standard test method for density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
<https://doi.org/10.1520/C0127-07>
 ASTM D2487-1, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA., 2011.

چنان‌که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، پوش گسیختگی حاکم بر فصل مشترک مسلح‌کننده با ماسه که با مصالح بازیافتی تقویت شده است، تا حدود زیادی از معیار گسیختگی موهر-کولمب تبعیت می‌کند. در جدول (۳) پارامترهای مقاومتی فصل مشترک مسلح‌کننده با ماسه که با ضخامت‌های مختلف مصالح حاصل از بازیافت مصالح ساختمانی تقویت شده، نشان داده شده است.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مقاومتی فصل مشترک تقویت شده با مصالح بازیافتی

نوع مصالح	ضخامت لایه تقویت‌کننده (سانتی‌متر)	زاویه اصطکاک ظاهری (درجه)	چسبندگی ظاهری (کیلوپاسکال)
ماسه	۰	۱۶/۸۵	۱۹/۴۴
ماسه با لایه سفال	۲	۱۷/۰۳	۲۸
	۴	۱۷/۵	۴۰/۸
	۸	۱۷/۶	۴۶
	۲۰	۱۷/۸	۵۳
ماسه با لایه کاشی	۲	۲۱/۰۸	۳۵/۸۵
	۴	۲۲/۱۶	۴۳/۸۵
	۸	۲۳/۲۶	۵۵/۴۳
	۲۰	۲۳/۷۴	۶۲/۵۶
ماسه با لایه سرامیک	۲	۳۰/۷۸	۴۵/۳۳
	۴	۴۰/۳۶	۵۲
	۸	۴۳/۲۲	۵۷/۴۴
	۲۰	۴۳/۸۳	۶۲/۲۱

با توجه به نمودارهای شکل (۱۰) و جدول (۳) می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد یک لایه مصالح درشت‌دانه حاصل شده از بازیافت مصالح ساختمانی باعث افزایش پارامترهای مقاومت برشی فصل مشترک مسلح‌کننده و ماسه خواهد شد. در مورد سفال افزایش مقاومت فصل مشترک بیشتر به‌صورت افزایش چسبندگی ظاهری نمود پیدا کرده است درحالی‌که برای مصالح ناشی از بازیافت کاشی و سرامیک، افزایش مقاومت برشی فصل مشترک ناشی از افزایش زاویه اصطکاک ظاهری و چسبندگی ظاهری بوده است. گرچه مصالح بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق دانه‌ای بوده و طبیعتاً فاقد چسبندگی بوده‌اند، چسبندگی ظاهری ایجاد شده به‌دلیل فرورفتگی گوشه‌های تیز مصالح بازیافتی در مسلح‌کننده انعطاف‌پذیر بوده است. استفاده از مصالح بازیافتی با گوشه‌های تیز می‌تواند باعث ایجاد بریدگی و آسیب دیدن مسلح‌کننده گردد. در این تحقیق از مسلح‌کننده بافته شده پرمقاومت با بافت متراکم استفاده شده بود که در برابر بریدگی ناشی از گوشه‌های تیز مصالح بازیافتی مقاوم بوده است. با این حال ذکر این نکته نیز ضروری می‌باشد که تقویت فصل مشترک بین مسلح‌کننده و خاک برای تأمین طول مهاری لازم برای مسلح‌کننده‌های پرمقاومت، کاربرد دارد. در عمل

- 37.2 (4.1), 93-104.
- Ouria A, Toufigh V, Desai C, Toufigh V, Saadatmanesh H, "Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall", *Geomechanics and Engineering*, 2016, 10 (6), 757-774.
<https://doi.org/10.12989/gae.2016.10.6.757>
- Racana N, Grédiac M, Gourvès R, "Pull-out response of corrugated geotextile strips", *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, 21 (5), 265-288.
[https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00031-1)
- Santos ECG, Palmeira EM, Bathurst RJ, "Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation", *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier Ltd, 2013, 39, 9-19.
- Savadkoochi MS, Reisi M, "Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete", *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266, 121973.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121973>
- Shukla SK, Yin JH, *Fundamentals of geosynthetic Engineering*, CRC Press, 2006. ISBN 9780415394444
- Tavakoli Mehrjardi G, Azizi A, Haji-Azizi A, Asdollafardi G, "Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction", *Transportation Geotechnics*, 2020, 23, 100349.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349>
- Thakur JK, Han J, Pokharel SK, Parsons RL, "Performance of geocell-reinforced recycled asphalt pavement (RAP) bases over weak subgrade under cyclic plate loading", *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, 35, 14-24.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.06.004>
- Toufigh V, Ouria A, Desai CS, Javid N, Toufigh V, Saadatmanesh H, "Interface behavior between carbon-fiber polymer and sand", *Journal of Testing and Evaluation*, 2016, 44 (1), 20140153.
<https://doi.org/10.1520/JTE20140153>
- Toufigh V, Saeid F, Toufigh V, Ouria A, Desai CS, Saadatmanesh H, "Laboratory study of soil-CFRP interaction using pull-out test", *Geomechanics and Geoengineering*, 2014, 9 (3), 208-214.
<https://doi.org/10.1080/17486025.2013.813650>
- Vieira CS, Pereira PM, "Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review", *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 103, 192-204.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.023>
- Vieira CS, Pereira PM, Lopes MDL, "Recycled construction and demolition wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures, interface properties", *Journal of Cleaner Production*, 2016, 124, 299-311.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.115>
- <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- ASTM D3080-11. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2011. <https://doi.org/10.1520/D3080-17E01>
- ASTM D4595-11, Standard test method for tensile properties of geotextiles by the wide-width strip method. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2011. <https://doi.org/10.1520/D4595-11>
- Ebadi M, Habibagahi G, Hataf N, "Effect of cement treatment on soil non-woven geotextile interface", *Scientia Iranica*, 2015, 22 (1), 69-80.
- Mistri A, Bhattacharyya SK, Dharmi N, Mukherjee A, Barai SV, "A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials", *Construction and Building Materials*, 2020, 233, 117894.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117894>
- Nidheesh PV, Kumar MS, "An overview of environmental sustainability in cement and steel production", *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231, 856-871.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.251>
- Ouria A, Emami S, Karamzadegan S, "Laboratory Investigation of the Effect of the Cement Treatment of Interface on the Pullout Capacity of Reinforcements", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2019, 52 (11), 2831-2846.
<https://doi.org/10.22060/CEEJ.2019.16191.6149>
- Ouria A, Heidarli E, Karamzadegan S, "Utilization of Recycled Concrete Aggregates as Coarse Material Sandwich to Improve the Pullout Strength of Geosynthetics in a Fine Sand", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2022, 8 (5), 55. <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00401-2>
- Ouria A, Heidarly E, "Laboratory Investigation of the Effect of the Geotextile Placement Pattern on the Bearing Capacity of Footing on Reinforced Sand", *Mdrsjrns, University of Mohegan Ardabili*, 2021, 21 (3), 21-34.
- Ouria A, Karamzadegan S, Emami S, "Interface properties of a cement coated geocomposite", *Construction and Building Materials*, 2021, 266, 121014.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121014>
- Ouria A, Mahmoudi A, "Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface", *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, 46 (1), 29-39.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.09.003>
- Ouria A, Mahmoudi A, Sadeghpour H, "Effect of the Geotextile Arrangement on the Bearing Capacity of a Strip Footing", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, Springer International Publishing, 2020, 6 (36).
<https://doi.org/10.1007/s40891-020-00219-w>
- Ouria A, Sadeghpour H, "Laboratory and numerical simulation of the effect of wraparound anchorage of reinforcements on the bearing capacity of spread footing", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2022,