بررسی مقاومت برشی خاک ماسه‌ای مسلح شده با ضایعات بتنی

مسعود عامل سخی[1*]، الهام طهرانی[2]

۱. استادیار ،گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۵

چکیده

در این پژوهش با استفاده از دستگاه برش مستقیم بزرگ به بررسی مقاومت برشی ماسه مسلح با استفاده از ضایعات بتنی در دو تراکم مختلف ماسه پرداخته شده است. بدین منظور از ضایعات بتنی با دانه‌بندی ۱/۲ تا ۱ اینچ استفاده شده است. در این مقاله به بررسی اثر استفاده از ضایعات بتنی با درصدهای وزنی ۰، ۱۰،۲۰ و ۳۰ بر روی خاک ماسه‌ای خشک در دو تراکم مختلف ماسه پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش برش مستقیم بزرگ، افزودن ضایعات بتنی موجب افزایش مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده‌است. نتایج آزمایشگاهی این تحقیق نشان داده است که نمونه‌های با تراکم کمتر و مسلح شده با ۳۰ درصد وزنی ضایعات بتنی دارای بیشترین تاثیر بودند به‌طوری که افزودن ۳۰ درصد ضایعات بتنی به ماسه با تراکم کمتر، زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح را ۳۲ درصد و مقاومت برشی را ۴۲ درصد افزایش داد. همچنین افزودن ۱۰ درصد ضایعات بتنی به ماسه با تراکم بیشتر، باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مسلح به میزان ۴ درصد و مقاومت برشی به میزان ۶ درصد گردید.

کلید واژه‌ها: ماسه، بهسازی خاک، نخاله بتنی، آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس.

مقدمه

استفاده از خاک به‌عنوان اصلی‌ترین مصالح در اکثر پروژه‌های عمرانی غیرقابل انکار است. توسعه چشمگیر در ایجاد فرودگاه‌ها، تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی، احداث اسکله‌های عظیم، بزرگراه‌ها، احداث سدها و سازه‌های مربوط به آن‌ها، شبکه‌های عظیم آبیاری و زهکشی و غیره، نیاز به مصالح ساختمانی را افزایش داده است. بر این اساس امروزه استفاده از مصالح جایگزین که از نظر مهندسی کیفیتی بالاتر از مصالح مورد استفاده در گذشته را داشته و همچنین از نظر اقتصادی نیز مقرون به‌صرفه باشد، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از جمله مهمترین و پرهزینه‌ترین مصالحی که در پروژه‌های مختلف عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد، خاک است. توجه به این نکته که خاک نمی‌تواند تمام خصوصیات ژئوتکنیکی مورد نیاز برای پروژه‌ها را در برداشته باشد، اهمیت استفاده از روش‌های گوناگون برای بهبود و تثبیت خاک را روشن می‌سازد (دریائی و کاشفی‌پور، ۱۳۸۹). عامل سخی به بررسی استفاده از تراشه لاستیکهای فرسوده به منظور افزایش مقاومت برشی در ماسه پرداخت و نتایج دستگاه برش مستقیم بزرگ نشان داد که افزودن این مصالح باعث افزایش زاویه اصطکاک مخلوط ماسه و لاستیکهای فرسوده

* نویسنده مسئول: mamelsakhi@yahoo.com

DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.101685

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

می‌شود(Amelsakhi, 2001) .در پژوهش انجام شده توسط بلوری‌بزاز و زنجانی، مقاومت مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی بررسی شد. پژوهش آنان بیانگر یک مطالعه آزمایشگاهی در زمینه امکان بازیافت نخاله‌های ساختمانی و به کاربردن آنها به طور مستقیم و یا پس از بهسازی و تثبیت، در لایه‌های روسازی راه و یا زیراساس می‌باشد. در این راستا، ابتدا آزمایش‌های وسیع فیزیکی و مکانیکی بر روی آجر، ملات ماسه سیمان و یا ترکیباتی از دو ماده انجام پذیرفت. نتایج آزمایش‌ها بیانگر قابل استفاده بودن این مصالح در زیر اساس و در راه‌های درجه دو هستند (بلوری‌بزاز و زنجانی،۱۳۸۹). قضاوی و عامل سخی با استفاده از تراشه لاستیکهای فرسوده به بررسی اثرات مثبت اضافه کردن انها در خاک ماسه‌ای پرداختند (Ghazavi and Amelsakhi, 2005) همچنین در مطالعه دیگری به تعیین ابعاد بهینه این مصالح ضایعاتی پرداخته شد (Ghazavi and Amelsakhi, 2005). مطالعاتی توسط صباغ‌گل و توفیق، در زمینه امکان سنجی تثبیت خاک ماسه ای با ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی و پودر شیشه انجام شد. در این مطالعه از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی برای تثبیت خاک ماسه‌ای استفاده شده است. پژوهشگران از دو نوع محلول فعال کننده: نوع یک ترکیب سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات مایع و نوع دو شامل غلظت‌های مختلف سدیم هیدروکسیدف استفاده نمودند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پوزولان و فعال کننده، همچنین با افزایش غلظت فعال کننده نوع دو، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها افزایش می‌یابند (صباغ‌گل و توفیق، ،۱۳۹۸). در مطالعه‌ای دیگر یوسفی و همکاران به بررسی و ارزیابی پارامترهای مقاومت خاک بهسازی شده با لاستیک-های بازیافتی و اثرات زیست‌محیطی آن پرداختند. نتایج تحقیقات نشان‌داد که ازاختلاط خاک وخرده لاستیک، خاک جدیدی حاصل می‌شود که رفتار مکانیکی آن با توده مواد تشکیل دهنده آن به تنهایی متفاوت است. خاک‌های مخلوط دارای وزن سبک‌ترنسبت به توده خاک بوده و همچنین تراکم پذیری کمتری مقایسه با توده دانه‌ای لاستیک (گرانول) دارند. بنابراین می‌توان از آن‌ها به عنوان مصالح پرکننده در پشت دیوارحائل و همچنین مصالح مورد نیاز برای زهکشی استفاده نمود (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهشی دیگر بیات و بحرانیان، تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج بدست‌آمده از این پژوهش می‌توان بیان کرد که اضافه شدن خاکستر بادی تا ۲۰ درصد در خاک ماسه‌ای بدون آهک، باعث افزایش بیشتری در وزن مخصوص خشک حداکثر می‌شود و این مقدار با وجود ۱۰ درصد آهک به مقدار ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که مقدار ۲۰٪ خاکستر بادی یک مقدار بهینه جهت تثبیت خاک با آهک یا بدون آن است به‌طوری‌که بیشترین مقدار نسبت باربری کالیفرنیا در این حدود خاکستر بادی بدست می‌آید (بیات و بحرانیان، ۱۳۹۸). هوشیار و رستمی دریافتند که استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای موثر است. در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از قطعات زائد پلاستیکی در بهبود ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای پرداخته شده است. متغیرهای در نظر گرفته شده دراین پژوهش شامل استفاده از یک نوع از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در درصدهای وزنی متفاوت به صورت تسلیح نامنظم (تصادفی) و تسلیح منظم (با لایه بندی مشخص)، در خاکریز دانه‌ای می‌باشد که به صورت آزمایشگاهی کوچک مقیاس بوده و از دستگاه CBR جهت آزمایش بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که با قراردادن قطعات زائد پلاستیکی (ضایعات پلاستیکی بطری‌های نوشیدنی) در خاک ماسه‌ای (ماسه سیلتی: ماسه ریزدانه بد دانه‌بندی شدهSP)، ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی یافته است مقادیر بهینه بین ۲ تا ۲/۵ درصد وزنی از قطعات پلاستیکی نسبت به ماسه، به‌دست آمده است. مشاهده شد که با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

افزایش درصد وزنی قطعات پلاستیکی به ۲ تا ۲/۵ درصد به ترتیب در شرایط توزیع نامنظم و منظم، مدول الاستیسیته خاک تا حدود ۲۳۴ و ۱۵۲ درصد افزایش می‌یابد (هوشیار و رستمی، ۱۳۹۷). در پژوهش صورت گرفته توسط جعفری و یزدی، تأثیر دانه‌های ژئوفوم و خاک بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش برش مستقیم بررسی شد. در این پژوهش به بررسی تأثیر اختلاط ژئوفوم و ۳ نوع خاک ماسه‌ای بر وزن مخصوص و پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها پرداخته شده است. خاک‌های استفاده شده، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ۱۰ درصد لای و ۲۰ درصد لای است. دانه‌های ژئوفوم همگی ریزدانه است که از الک شماره ۱۰ عبور کرده‌اند و مقادیروزنی اضافه شده آن‌ها به خاک ۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی خاک است. آزمایش‌ها در دستگاه برش مستقیم ۱۰ × ۱۰ سانتیمتر مربع تحت سه تنش قائم ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ کیلوپاسکال انجام شدند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش درصد وزنی ژئوفوم، زاویه اصطکاک داخلی در ماسه کاهش و چسبندگی ظاهری در مخلوط خاک-ژئوفوم افزایش می‌یابد. با افزایش تنش‌های قائم در مخلوط ماسه و ژئوفوم (با درصد وزنی یکسان ژئوفوم) مقاومت برشی افزایش می‌یابد. هرچه میزان چسبندگی طبیعی خود خاک کمتر باشد تأثیر افزودن ژئوفوم در افزایش چسبندگی خاک بیشتر است. همچنین در اختلاط حدود ۰/۴ درصدژئوفوم با خاک، نرخ رشد چسبندگی خاک‌ها با سرعت کندتری افزایش یافته و نرخ کاهش زاویه اصطکاک داخلی نیز کندتر می‌شود. با توجه به آزمایش‌های انجام شده می‌توان مقادیرزاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک‌های آزمایش شده را در صورت اختلاط با درصدهای دیگر ژئوفوم با تقریب مناسبی پیش‌بینی کرد (جعفری و یزدی، ۱۳۹۷). در سال ۲۰۱۳ کوبایاشی و همکاران برای بهبود مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای سیلتی از گچ بازیافتی به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده استفاده نمودند و درصدهای مختلف گچ بازیافتی و خاک ماسه‌ای سیلتی را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش مقدار گچ با افزایش رطوبت بهینه همراه است، در حالی‌که هیچ افزایش قابل توجهی در وزن واحد خشک مشاهده نشد. مقاومت فشاری و مقاومت ترک‌های کششی، با افزودن گچ بازیافت شده افزایش می‌یابد. اثر افزایش مقدار گچ بازیافتی بر مقاومت فشاری در مقایسه با مقاومت کششی قابل توجه بود. استفاده از گچ بازیافتی برای افزایش مقاومت خاک ماسه‌ای در مقایسه با خاک سیلتی تأثیر قابل توجه‌تری داشت. تأثیر زمان عمل آوری بر مقاومت نمونه‌های بهبود یافته در سنین پایین‌تر در مقایسه با سنین بالاتر بیشتر بود. در مورد نمونه‌های تهیه شده با مقدار آب در سمت مرطوب منحنی تراکم، مقاومت به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با این حال، کاهش ناچیز در مقاومت نمونه تهیه شده با مقدار رطوبت در سمت خشک منحنی تراکم مشاهده شد (Kobayashi et al.,2013). یوسفی و همکاران به مطالعه اثر آنزیم اوره آز بر روی ماسه مسلح به زئولیت پرداختند (Yousefi et al., 2021a). یوسفی و همکاران در مطالعه دیگری اثر آنزیم اوره آز بر مقاومت تک محوری خاک مسلح شده با سیمان و زئولیت را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند (Yousefi et al., 2021b). در یک مطالعه آزمایشگاهی اثرات افزودن فیبرهای پلی پروپیلن بر روی خاک مسلح با سیمان و زئولیت پرداختند (Amelsakhi et al., 2022). بابایی و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی مقاومت برشی ماسه رس‌دار اصلاح شده با دی اکسید تیتانیوم و سیمان پرداختند (Babaei et al., 2023). میری و همکاران به بررسی افزودن ضایعات EVA بر خاک ماسه‌ای به منظور کاهش اثرات زیست محیطی این مصالح و نیز افزایش زاویه اصطکاک خاک ماسه پرداخته و اثرات مثبت استفاده از این مصالح را

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

نشان دادند (Miri, et al., 2023). عامل سخی و ابراهیمی در سال ۱۴۰۱ از خاکستر باگاس، پوسته برنج و پوسته بادام به منظور افزایش مقاومت برشی ماسه استفاده کردند (عامل سخی و ابراهیمی، ۱۴۰۱).

در این مقاله با توجه به خلا مشاهده شده از مطالعات قبلی، برای اولین بار به بررسی اثر ضایعات بتنی بر افزایش زاویه اصطکاک خاک ماسه پرداخته می‌شود. در این بررسی از دستگاه برش مستقیم بزرگ بدین منظور استفاده شده است.

مواد و مصالح

مشخصات خاک

خاک استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه است. ماسه استاندارد فیروزکوه با کد تجاری ۱۶۱ شباهت زیادی به خاکهای رملی و ماسه بادی دارد که در مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار ماسه ها مورداستفاده قرار میگیرد. ماسه ۱۶۱ فیروزکوه یک ماسه شکسته سیلیسی است. پس از خشک کردن خاک در دمای اتاق، طبق طبقه بندی متحده، خاک از نوع ماسه (ریزدانه) بد دانه‌بندی شده با نماد SP طبقه‌بندی گردید. نتایج آزمایش‌های شناسایی در جدول‌های ۱و۲ و منحنی دانه‌بندی و تصاویر مصالح مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول۱. مشخصات خاک

Table 1. Soil properties

نوع خاک	وزن مخصوص سست KN/m³		زاویه اصطکاک داخلی درجه		چسبندگی kg/cm²
ماسه	32		28		0
نام خاک	e_{min}	e_{max}	C_c	C_u	G_S
۱۶۱فیروزکوه	0.617	0.97	0.61	5.56	2.56

جدول۲. مشخصات شیمیایی خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

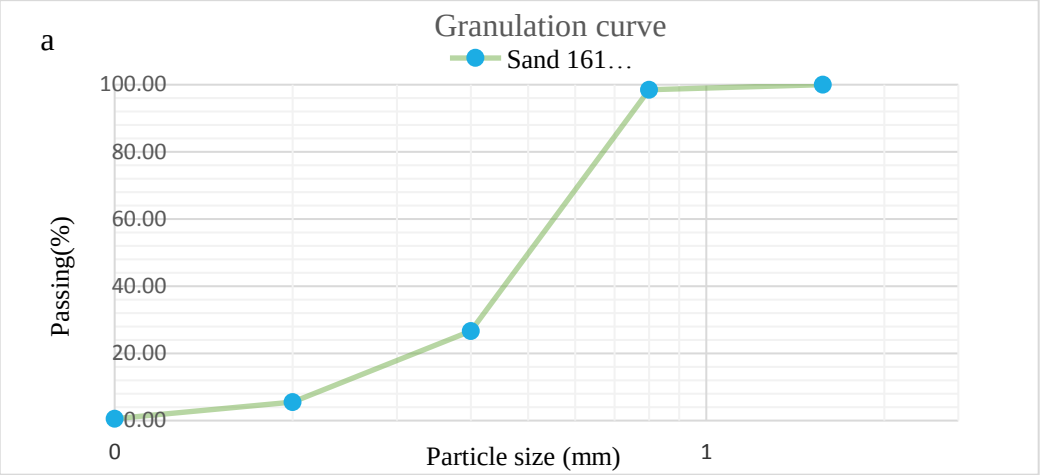
Table 2. Sand chemical properties

$\%K_2O$	$\%Na_2O$	%CaO	$\%Fe_2O_3$	$\%AL_2O_3$	$\%SiO_2$
0.022	0.03	0.28	0.89	0.2	98.41

(a)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]



شکل۱- (a) منحنی دانه‌بندی ماسه، (b) ماسه مورد استفاده، (c) ضایعات بتنی

Fig. 1. (a)Sand’s grain size distribution curve; (b the used sand; (c) concrete waste material.

مشخصات ضایعات بتنی

در پژوهش حاضر به‌منظور بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه از ضایعات بتنی استفاده شده است. برای آماده سازی ضایعات بتنی، بعد از تهیه ضایعات مذکور، پس از کوبیدن از الک ۱ اینچ عبور داده شده و نمونه مانده روی الک ۱/۲ اینچ انتخاب می‌شود.

مطالعات آزمایشگاهی

جهت بررسی تاثیر ضایعات بتنی، بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای، مجموعا تعداد ۲۴ آزمایش برش مستقیم ۳۰×۳۰ سانتیمتر مربع، تحت سه تنش قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، انجام شد. به‌منظور بهسازی خاک مذکور از ضایعات بتنی با درصدهای وزنی مختلف ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با توزیع تصادفی استفاده شده است. نمونه‌ها در دو حالت سست با وزن مخصوص ۱۳۷۰ کیلوگرم بر متر مکعب (سری A) و متراکم با وزن مخصوص ۱۴۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب (سری B) تهیه شدند. جزئیات مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در جدول۳ بیان شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

جدول۳. طرح اختلاط نمونه‌ها
Table 3. Mixing plan of samples

شماره نمونه	نسبت مواد افزودنی به ماسه	وزن ماسه (کیلوگرم)	وزن ضایعات بتنی (کیلوگرم)	وزن مخصوص (کیلوگرم / مترمکعب)
A1	0%	19.11	0	1370
A2	10%	17.37	1.74	1370
A3	20%	15.93	3.19	1370
A4	30%	14.70	4.41	1370
B1	0%	20	0	1434
B2	10%	18.18	1.82	1434
B3	20%	16.67	3.33	1434
B4	30%	15.38	4.62	1434

جدول۴ بیانگر آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر به‌همراه استانداردهای مربوط به هر آزمایش می‌باشد.

جدول۴. استانداردهای آزمایشگاهی
Table 4. Laboratory standards

طبقه‌بندی خاک‌ها	ASTM D2487
آزمایش برش مستقیم	ASTM D3080

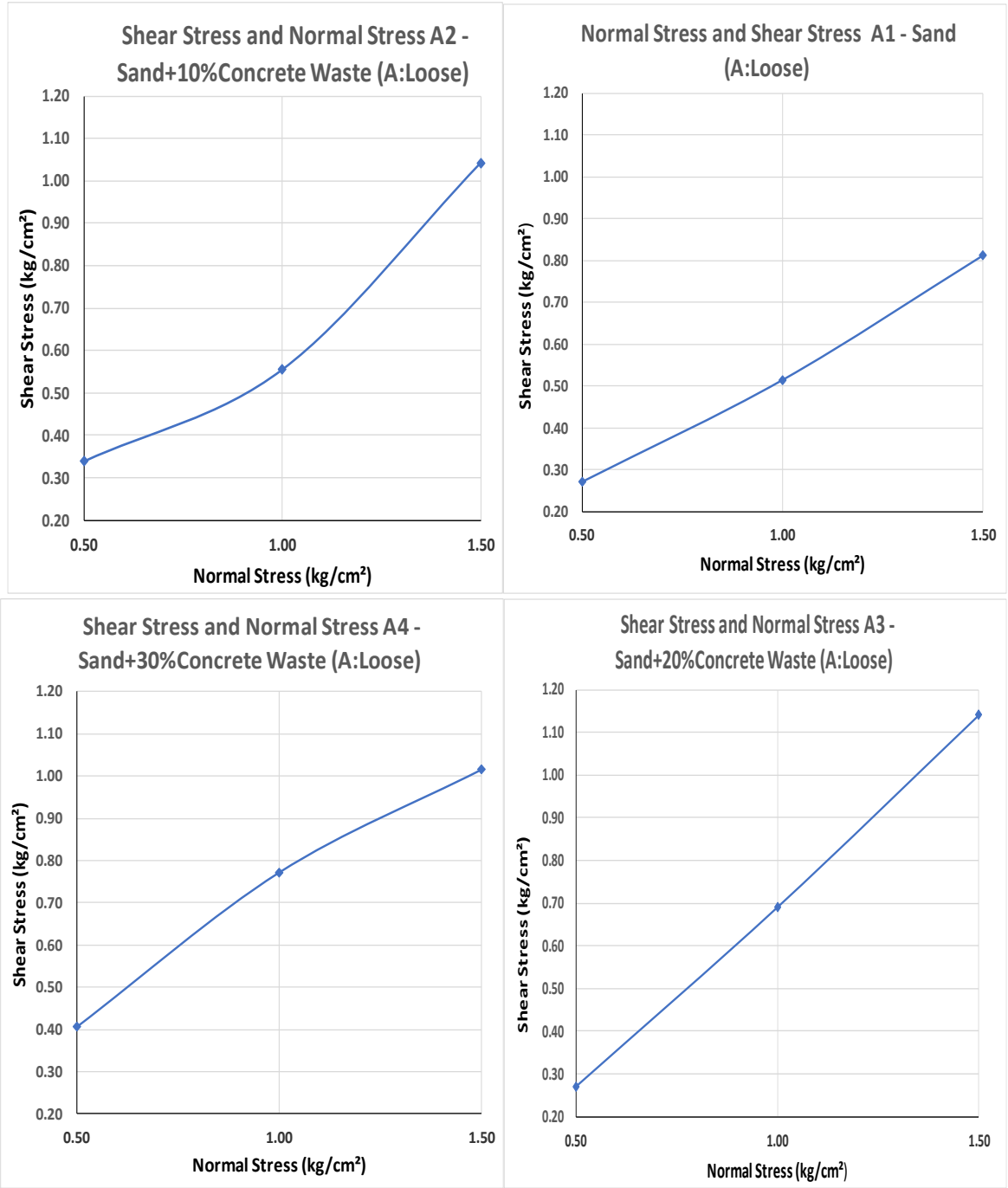
آزمایش برش مستقیم(ASTM D3080)

دستگاه برش مستقیم بزرگ ۳۰*۳۰ سانتیمتر مورد استفاده قرار گرفت. دلیل استفاده از دستگاه با این ابعاد، ابعاد به نسبت بزرگ ضایعات بتنی مورد استفاده بوده است. کلیه آزمایش‌ها در حالت خشک و به صورت زهکشی نشده انجام شده است. سرعت رانش دستگاه برش برابر با ۶/۸۸ میلیمتر در دقیقه بوده است.

نتایج آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم بر روی مخلوط خاک ماسه‌ای و ضایعات بتنی انجام گرفت. در ادامه به بررسی نمودارهای تنش و کرنش در حالات مختلف نمونه‌های سست و متراکم و بیان نتایج پرداخته می‌شود. نتایج مربوط به مقاومت برشی و زوایای اصطکاک داخلی نمونه های سست و متراکم به ترتیب در جداول شماره ۵ و ۶ ارائه شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]



شکل۲. نمودار تنش برشی - تنش قائم، حالت سست (نمونه‌های سری A)

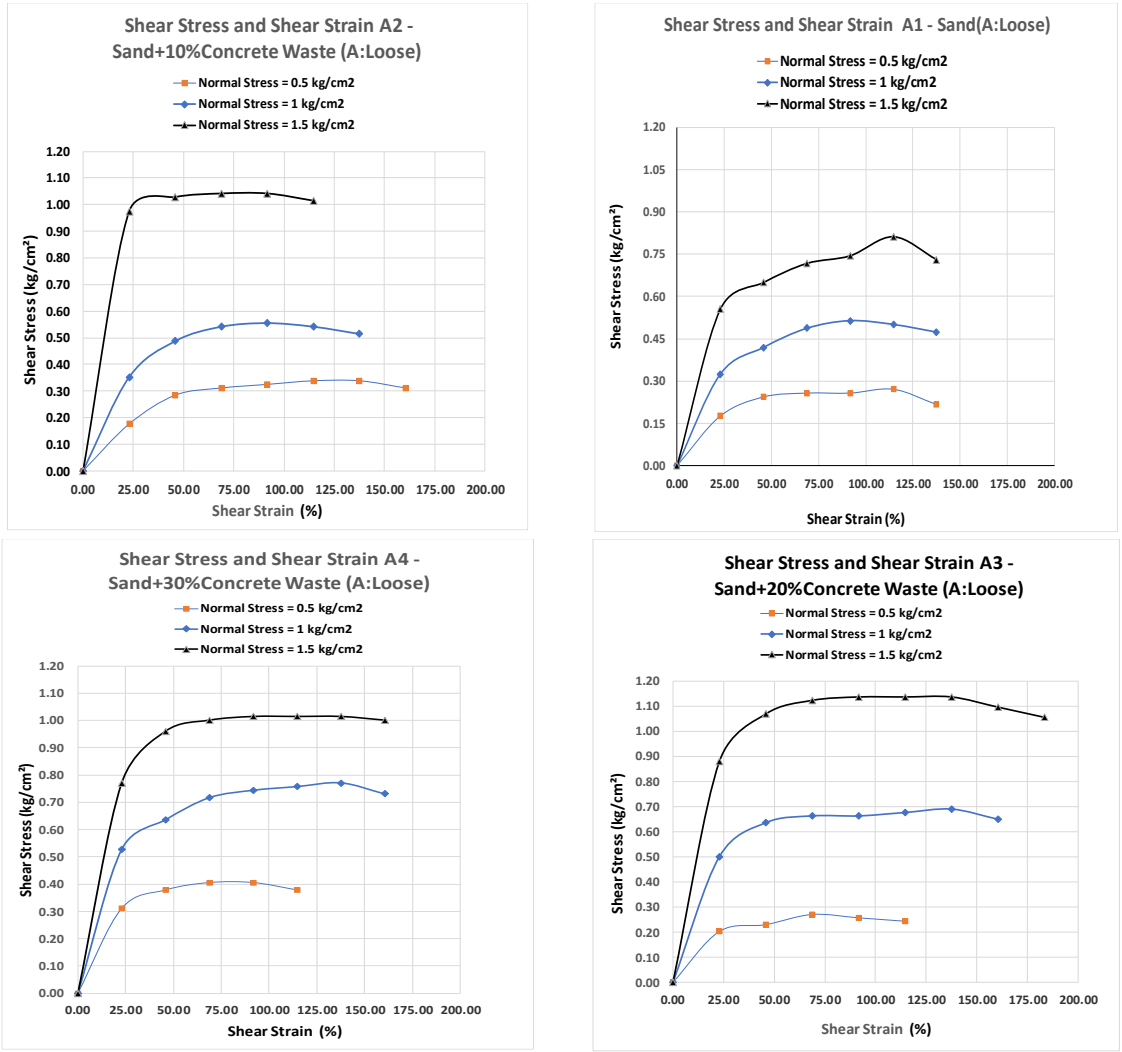
Fig. 2. Shear Stress - Normal Stress diagram for loose sand (samples A)

نمودارهای شکل ۲ تغییرات تنش برشی در برابر تغییرات تنش قائم را برای نمونه‌های سست نشان می‌دهند. نمودارهای ترسیم شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که در نمونه‌های سست (سری A) در کلیه نمونه‌های سست با افزایش تنش قائم، تنش برشی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار حداکثری برای تنش برشی در این محدوده تنش‌های قائم مشاهده نشد که پس از آن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

کاهش تنش برشی صورت گیرد. این مطلب برای نمونه‌های سست صادق است که فاقد تنش برشی حداکثر باشند. نکته قابل ذکر مهم در این نتایج این است که با افزایش ضایعات بتنی، به دلیل افزایش قفل و بست بین ذرات ماسه و نیز عنصر مسلح کننده، که ضایعات بتنی می‌باشد، زاویه اصطکاک نمونه‌های مسلح شده در مقایسه با نمونه غیرمسلح افزایش داشته است. نکته قابل ذکر دیگر این است که در تمامی موارد، مقدار چسبندگی ماسه مسلح به ضایعات بتنی نسبت به حالت غیرمسلح، افزایش داشته است. به خوبی می‌توان اثر در هم قفل شدگی ماسه مسلح به ضایعات بتنی را در نتایج آزمایش مشاهده نمود که در قالب افزایش چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی خود را نشان داده‌اند.



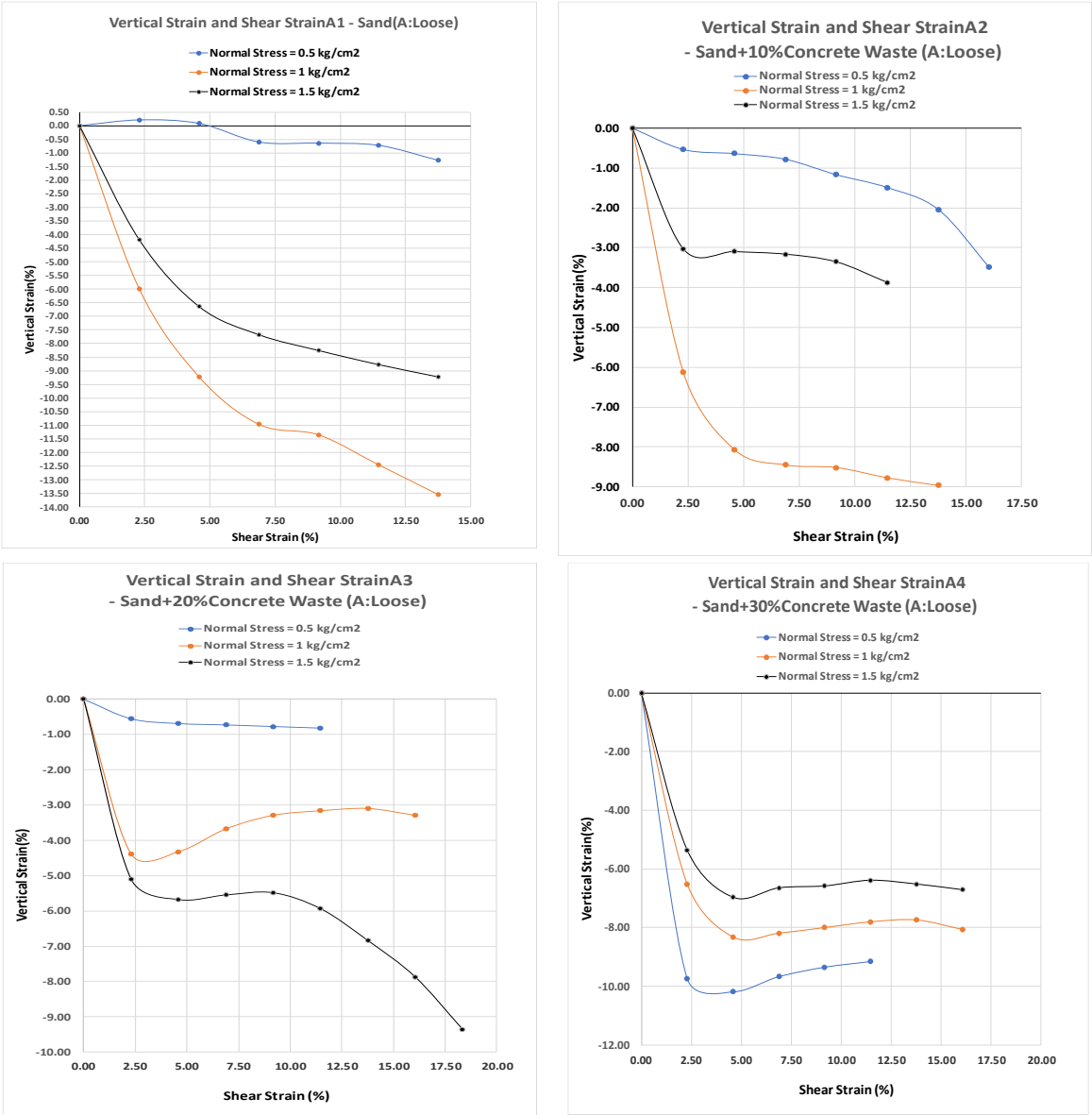
شکل۳. نمودار تنش برشی - کرنش برشی، حالت سست (نمونه‌های سری A)

Fig. 3. Stress - strain diagram for loose sand (samples A)

مشاهده نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهد که در نمونه‌های سست (سری A) در کلیه حالت‌های سست، میزان افزایش تنش برشی منجر به افزایش کرنش برشی می‌شود. به علاوه مشاهده می‌شود که میزان این افزایش در نمونه‌هایی‌که تحت تنش قائم بزرگتری هستند کمتر می‌باشد. همچنین میزان تنش برشی به طور تدریجی تا مقدار نهایی افزایش می‌یابد و مقدار حداکثری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

برای آن وجود ندارد. به عبارت دیگر در حالت سست، مقاومت برشی حداکثر کاملا واضحی وجود ندارد. البته باید توجه داشت به دلیل حضور مسلح کننده، در مواردی مقاومت برشی پس از رسیدن به یک مقدار حدی، تا حدودی کاهش داشته است. نکته قابل توجه در نمودارهای بدست آمده، افزایش مقاومت برشی ماسه مسلح به ضایعات بتنی نسبت به ماسه غیرمسلح است.



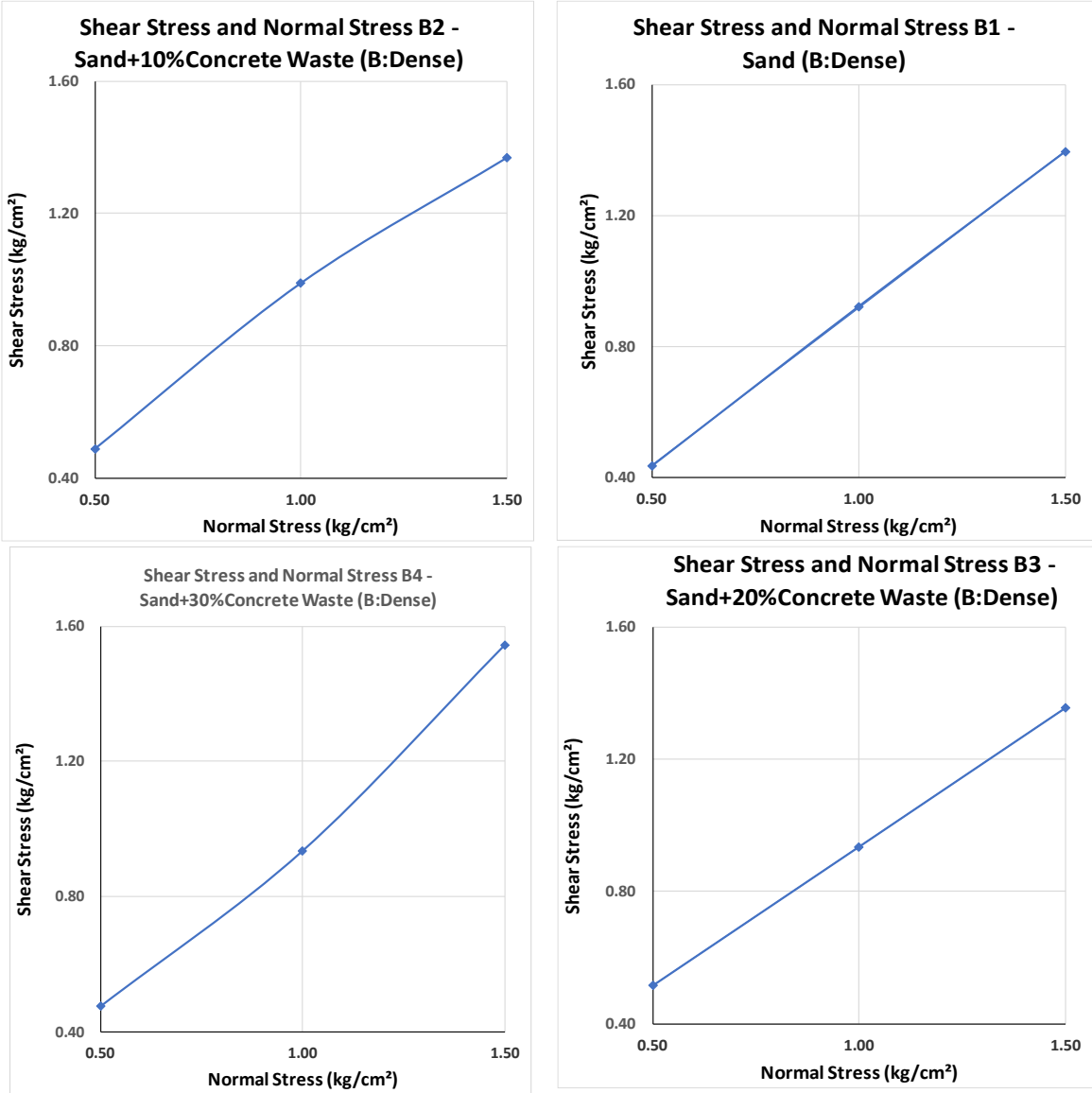
شکل۴. نمودار کرنش برشی - کرنش قائم، حالت سست (نمونه‌های سری A)

Fig. 4. Vertical Strain - Shear Strain diagram for loose sand (samples A)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

نمودارهای شکل ۴ نشان داد که در نمونه‌های سست (سری A) افزایش تنش برشی منجر به کاهش حجم نمونه می شود. به طور تقریبی ملاحظه می‌شود که مقدار کرنش برشی با افزایش تنش قائم افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با رفتار خاک ماسه سست مطابقت دارد.



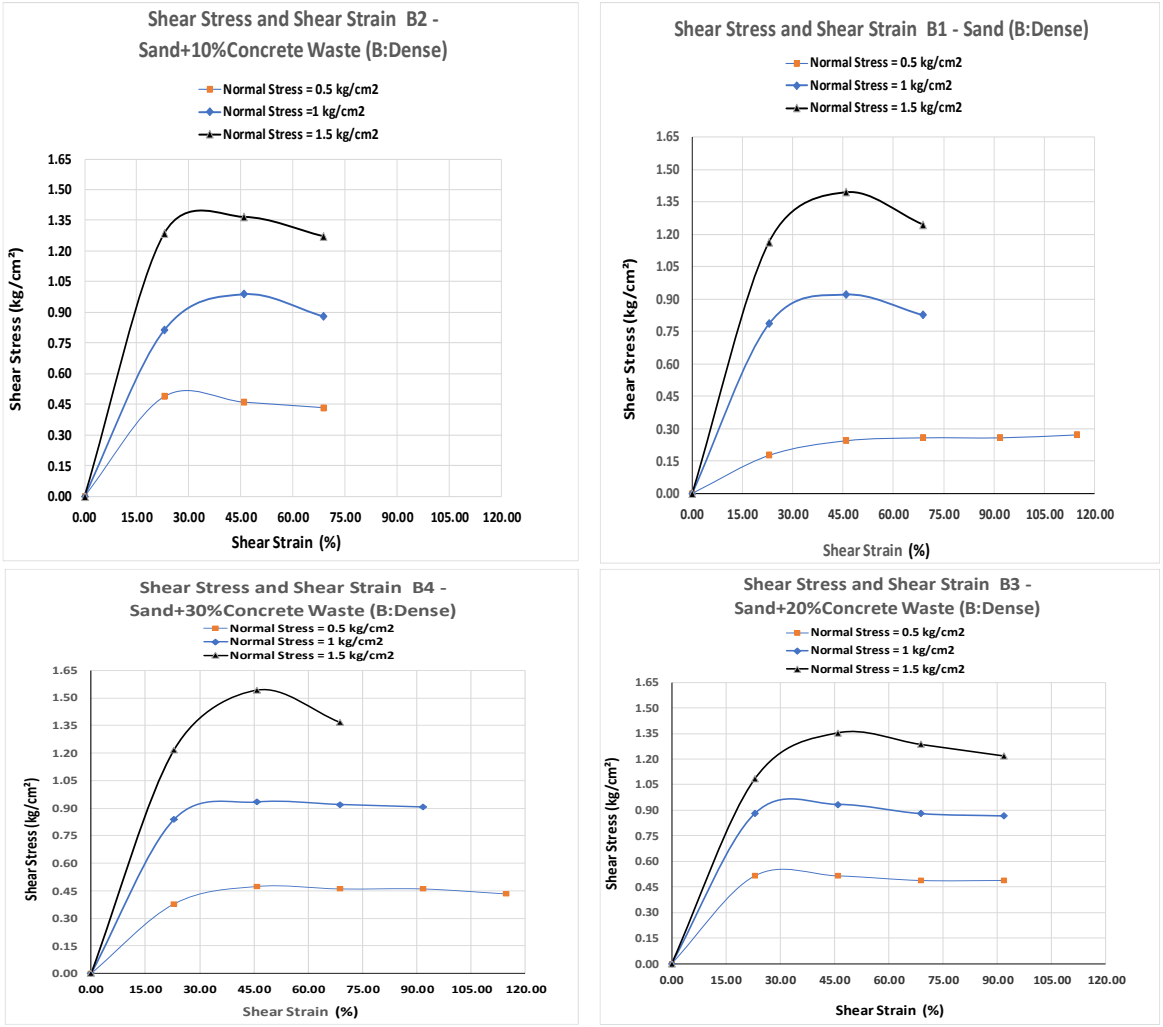
شکل۵. نمودار تنش برشی - تنش قائم، حالت متراکم (نمونه‌های سری B)

Fig. 5. Shear Stress - Normal Stress diagram for dense sand (samples B)

نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که در نمونه‌های متراکم (سری B) افزایش تنش قائم، منجر به افزایش تنش برشی می‌شود. به طور تقریبی ملاحظه می‌شود که شیب نمودار یکسان است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]



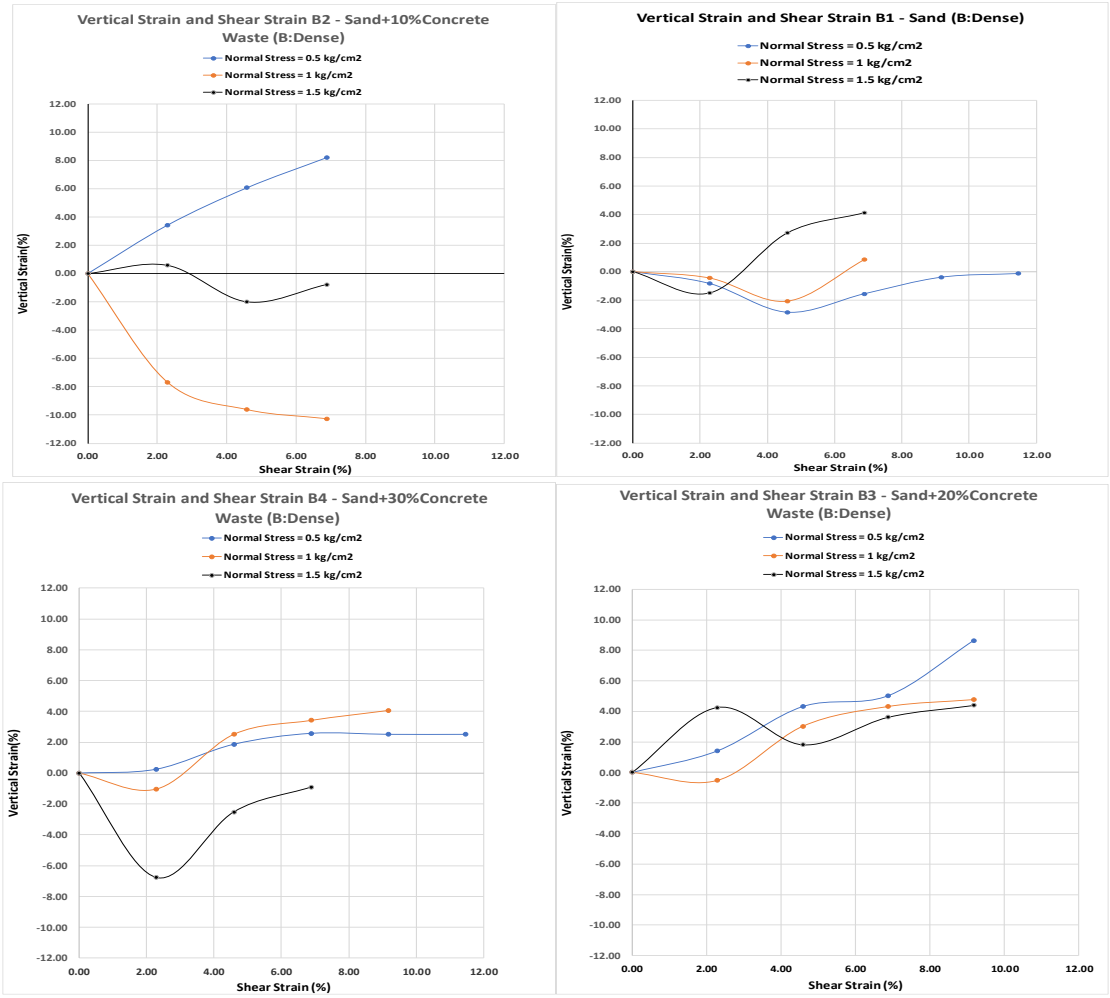
شکل۶. نمودار تنش برشی - تنش قائم، حالت متراکم (نمونه‌های سری B)

Fig. 5. Shear Stress - Normal Stress diagram for dense sand (samples B)

شکل ۶ نشان می‌دهد که در نمونه‌های با تراکم بالاتر، مقاومت برشی حداکثر زمانی به وضوح قابل مشاهده است که نمونه‌ها تحت تنشهای قائم بیشتری قرار می‌گیرند. همانطور که در تمامی نمونه‌های غیرمسلح و نیز مسلح مشاهده می‌شود، مقدار تنش برشی حداکثر که پس از آن کاهش رخ می‌دهد مربوط به تنش قائم ۱/۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بوده است. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که بیشترین تنش برشی بدست آمده مربوط به نمونه با ۳۰ درصد وزنی ضایعات بتنی و نیز مربوط به تنش قائم ۱/۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بوده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]



شکل۷. نمودار کرنش برشی - کرنش قائم، حالت متراکم (نمونه‌های سری B)

Fig. 7. Vertical Strain - Shear Strain diagram for dense sand (samples B)

نمودار ۷ نشان می‌دهد که در نمونه‌های متراکم (سری B) بیشترین کرنش برشی مربوط به نمونه ای است که بیشترین تنش قائم بر آن وارد شده است (σ = ۱/۵ kg/cm^2). در نمونه‌های متراکم با افزایش تنش قائم، نمونه ابتدا کاهش حجم و سپس افزایش حجم می‌یابد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

جدول ۵ - نتایج آزمایش برش مستقیم در حالت سست، نمونه‌های سری A

Table 5 - The results of the direct shear test for loose samples, (series A)

نمونه	نسبت مواد افزودنی به ماسه	وزن ماسه Kg	وزن ضایعات بتنی Kg	وزن مخصوص سست Kg/m³	بار قائم N Kg	بار افقی T Kg	تنش قائم Kg/Cm²	تنش برشی Kg/Cm²	زاویه اصطکاک داخلی φ	میانگین زاویه اصطکاک داخلی φ
A_1	0%	19.11	0.00	1370	450	243.6	0.5	0.27	28	28
					900	462.84	1	0.51	27	
					1350	730.8	1.5	0.81	28	
A_2	10%	17.37	1.74	1370	450	304.5	0.5	0.34	34	33
					900	499.38	1	0.55	29	
					1350	937.86	1.5	1.04	35	
A_3	20%	15.93	3.19	1370	450	243.6	0.5	0.27	28	33
					900	621.18	1	0.69	35	
					1350	1023.12	1.5	1.14	37	
A_4	30%	14.70	4.41	1370	450	365.4	0.5	0.41	39	37
					900	694.26	1	0.77	38	
					1350	913.5	1.5	1.02	34	

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

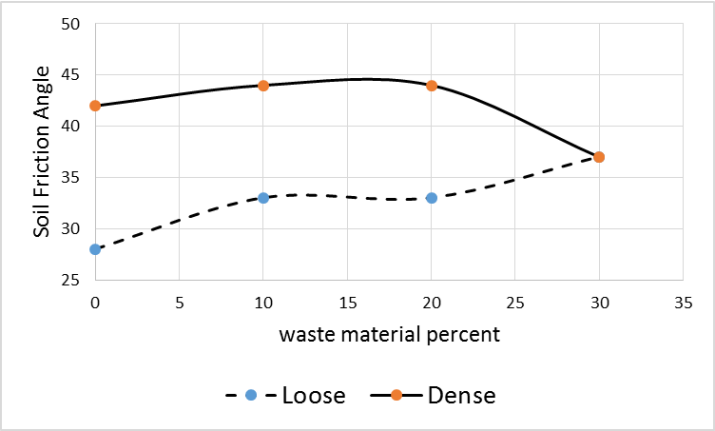
جدول ۶ - نتایج آزمایش برش مستقیم در حالت متراکم، نمونه‌های سری B

Table 6 - The results of the direct shear test for dense samples, (series B)

نمونه	نسبت مواد افزودنی به ماسه	وزن ماسه Kg	وزن ضایعات بتنی Kg	وزن مخصوص سست Kg/m³	بار قائم N Kg	بار افقی T Kg	تنش قائم Kg/Cm²	تنش برشی Kg/Cm²	زاویه اصطکاک داخلی φ	میانگین زاویه اصطکاک داخلی φ
B_1	0%	20	0	1434	450	389.76	0.5	0.43	41	42
					900	828.84	1	0.92	43	
					1350	1254.54	1.5	1.39	43	
B_2	10%	18.18	1.82	1434	450	438.48	0.5	0.49	44	44
					900	889.14	1	0.99	45	
					1350	1230.18	1.5	1.37	42	
B_3	20%	16.67	3.33	1434	450	462.84	0.5	0.51	46	44
					900	840.42	1	0.93	43	
					1350	1218	1.5	1.35	42	
B_4	30%	15.38	4.62	1434	450	426.3	0.5	0.47	43	37
					900	840.42	1	0.93	43	
					1350	1388.52	1.5	1.54	46	

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]



شکل۸. مقادیر زاویه اصطکاک نمونه‌های سست و متراکم
Fig. 8. Soil friction angles for loose and dense samples

در شکل ۸ مقایسه نتایج بین زوایای اصطکاک بدست آمده در حالتهای سست و متراکم مشاهده می‌شود. همانطور که مشخص است بیشترین اثر مثبت در خاک سست و در اضافه نمودن ۱۰ درصد ضایعات بتنی به ماسه مشاهده می‌شود. همانطور که نمودار نشان می‌دهد اثر افزایش در زاویه اصطکاک در خاک متراکم به میزان افزایش در خاک سست نبوده است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک دانه‌ای (ماسه سیلتی – ماسه ۱۶۱ فیروزکوه) و بهسازی آن با افزودن درصدهای وزنی مختلف ضایعات بتنی با دانه‌بندی ۱/۲ تا ۱ اینچ تحت آزمایش‌های برش مستقیم بزرگ مقیاس قرار گرفت و نتایج به‌شرح زیر می‌باشد:

استفاده از ضایعات بتنی با دانه بندی۱/۲ تا ۱ اینچ، در هر دو نوع خاک ماسه‌ای سست و متراکم منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود. میزان این افزایش در خاک ماسه ای سست بیشتر از متراکم می باشد.

مقدار افزایش مقاومت برشی در خاک ماسه‌ای سست برابر ۲۹ درصد و در خاک ماسه‌ای متراکم در حدود ۷ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر، بیشترین تاثیر مثبت در افزایش مقاومت برشی ماسه مسلح به ضایعات بتنی در ماسه سست مشاهده می‌شود. این نکته مهمی است که در عمل جهت مصرف این مصالح باید مورد توجه قرار گیرد. می‌توان گفت بیشترین قفل و بست ایجاد شده زمانی حاصل شده است که ماسه سست با ضایعات بتنی دچار درهم قفل شدگی ذرات شده‌اند. این میزان ۴ برابری مقاومت برشی در دو حالت با تراکم کمتر و بیشتر، ناشی از اثر توامان زاویه اصطکاک و نیز چسبندگی ایجاد شده در ماسه سست مسلح شده است. بدون تردید سست بودن اولیه ماسه نیز در این افزایش مقاومت پس از تسلیح موثر بوده است.

استفاده از ضایعات بتنی با دانه بندی۱/۲ تا ۱ اینچ، باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک در نمونه ماسه ای سست تا ۳۲٪ و در نمونه متراکم تا ۵٪ می‌شود. از آنجا که زاویه اصطکاک یک پارامتر متاثر از اصطکاک یعنی پدیده‌ای مکانیکی است، درهم قفل شدگی ذرات ماسه و ضایعات بتنی، موجب این افزایش در ماسه مسلح گردیده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

در نمونه‌های سست (نمونه‌های سری A)، افزایش تنش برشی در ماسه باعث کاهش حجم نمونه می‌شود و با افزایش درصد ضایعات بتنی، مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی، افزایش می‌یابد. در حالت سست (نمونه‌های سری A) درصد بهینه‌ای برای ضایعات بتنی (یعنی آنچه باعث حداکثر زاویه اصطکاک داخلی نمونه می شود) وجود ندارد و نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد ضایعات بتنی به طور مدام زاویه اصطکاک داخلی نمونه افزایش می‌یابد. به طوریکه نمونه A_4 با ۳۰٪ ضایعات بتنی دارای بیشترین مقدار در زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. به عبارت دیگر نتایج نشان داده است با افزایش درصد ضایعات بتنی در مخلوط با ماسه، زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد، اما باید به این نکته اجرایی مهم نیز توجه گردد که در عمل استفاده از این مصالح تا چه حد اجرایی است. به عبارت دیگر، یک نکته بسیار مهم، نحوه تراکم این مصالح در محل پروژه است که احتمالا طراح بهسازی خاک را ملزم به استفاده از درصدهای پایین‌تر از این مصالح خواهد کرد. باید توجه داشت که تراکم آزمایشگاهی ۳۰ درصد وزنی مصالح نیز دارای مشکلاتی بوده است.

در حالت متراکم (نمونه‌های سری B) مقدار بهینه ضایعات بتنی (یعنی آنچه باعث حداکثر زاویه اصطکاک داخلی نمونه می شود) ۱۰٪ می‌باشد که باعث افزایش ۵ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی نمونه می‌شود. این مطلب بسیار مهم است که نمی‌توان انتظار رسیدن به زاویه اصطکاک بالا، در درصدهای وزنی ۲۰ و ۳۰ را داشت. به عنوان نکته اجرایی باید اشاره نمود که تراکم نمونه‌های با متراکم به خصوص به همراه درصدهای وزنی بالای ضایعات بتنی، امر بسیار دشواری است که حتی در شرایط آزمایشگاهی نیز دارای معضلات اجرایی است.

نکته قابل ذکر دیگر این است که نمونه‌های متراکم مقاومت برشی بیشتری نسبت به نمونه‌های سست دارند.

بر اساس رفتار متفاوت ماسه با تراکم کم و ماسه با تراکم زیاد، نتایج آزمایشگاهی نیز نشان دادند که ماسه متراکم در لحظه گسیختگی، دچار افزایش حجم شده و ماسه سست در لحظه گسیختگی، دچار کاهش حجم می‌شود.

در نمونه‌های متراکم (سری B) زاویه اصطکاک داخلی بیشتری نسبت به نمونه‌های سست (سری A) گزارش شده است، در حالیکه اختلاف چندانی در نمونه‌های متراکم (سری B) دیده نمی‌شود. مشاهده شد افزایش درصد ضایعات بتنی در نمونه‌های متراکم (سری B) تأثیر چندانی در زاویه اصطکاک داخلی ندارد، بیشترین زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌های متراکم مربوط به نمونه B_2 با ۱۰ درصد ضایعات بتنی (درجه $\Phi=$ ۴۴) و در نمونه‌های سست در نمونه A_4 با ۳۰ درصد ضایعات بتنی (درجه $\Phi=$ ۳۵) می‌باشد. این مطلب نتیجه مهمی است که درصد ضایعات بتنی بهینه برای دو تراکم مختلف ماسه، مقادیر متفاوتی می‌باشند. البته این انتظار صحیحی است که ماسه با تراکم بیشتر، با مقدار کمتری از مسلح کننده، مقدار بهینه زاویه اصطکاک خاک مخلوط را از خود نشان دهد.

نکته قابل ذکر دیگر در این تحقیق این است که از آنجا که چسبندگی ماهیتی الکتروشیمیایی دارد، نمی‌توان انتظار افزایش چندان زیادی در چسبندگی ماسه مسلح به ضایعات بتنی داشت. همان مقدار افزایش در چسبندگی ماسه مسلح نیز به دلیل اثرات خاک مسلح است که علاوه بر افزایش زاویه اصطکاک خاک، می‌توان آن را در افزایش چسبندگی ماسه مسلح بیان نمود. نتایج این تحقیق گسترده آزمایشگاهی نیز نشان داده است که افزودن ضایعات بتنی به ماسه، بیشترین اثر خود را در افزایش زاویه اصطکاک داشته است و نه بر چسبندگی مصالح مخلوط.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

منابع

صباغ‌گل،م.، توفیق، و. ۱۳۹۸. مطالعه امکان‌سنجی تثبیت خاک ماسه‌ای با ژئوپلیمر بر پایه پوزولان طبیعی و پودر شیشه، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۱ (۱): ۱۸۲-۱۶۹.

بیات، م. ، بحرانیان، م. ۱۳۹۸. تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌ای،مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران ۱۳ (۲): ۸۵-.۹۰

جعفری، م.، یزدی، م. ۱۳۹۷. تأثیر اختلاط دانه‌های ژئوفوم و خاک بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش برش مستقیم ۱۴(۱): ۱۴۸-۱۳۳.

هوشیار،ا.، رستمی، و. ۱۳۹۷. استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک‌های دانه‌ای، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰ (۴): ۷۵۵ - ۷۶۴.

بلوری‌بزاز، ج.، زنجانی، م. ۱۳۸۹. بررسی مقاومت مصالح حاصل از بازیافت نخاله‌های ساختمانی جهت استفاده در لایه‌های روسازی، پژوهشنامه حمل و نقل، ۷ (۲): ۱۳۳-۱۱۹.

دریائی، م. ، کاشفی‌پور، س. ۱۳۸۹. بررسی تغییرات مقاومت محوری خاک رس بهسازی شده با آهک توسط افزودن ماسه بادی، دومین سمینار مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری زهکشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی وزارت جهاد کشاورزی، ۲۳۰-۲۳۹.

عامل سخی، م.، ابراهیمی، آ. ۱۴۰۱. تثبیت خاک ریزدانه با استفاده از خاکستر باگاس، خاکستر پوسته برنج و خاکستر پوسته بادام. نشریه زمین شناسی دانشگاه خوارزمی، ۱۶ (۳): ۵۶-۴۲.

عامل سخی، م.، یوسفی، ر.، عمویی، ا.ع.، کریمی، ع. ۱۴۰۱. مطالعه تجربی تاثیر افزودن الیاف پلیپروپیلن بر خاک تثبیت شده با سیمان و جایگزینی زئولیت. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۴ (۴): ۱۵۷۲-۱۵۵۳.

Amelsakhi, M., 2001. Influence of optimized tire shreds on strength of sand-reinforced with tire shreds, In Partial Fulfillment of the Requirements the Degree of Master of Science, Faculty of Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan.

Babaei, A., Ghazavi, M., Ganjian, N., 2023. Shear strength parameters of clayey sand treated with cement and nano titanium dioxide, Geotechnical and Geological Engineering, 40(1), 133-151.

Ghazavi, M., and Amelsakhi, M., 2005. Influence of optimized tire shreds on shear strength parameters of sand, International Journal of Geomechanics 5 (1), 58-65.

Ghazavi, M., and Amelsakhi, M., 2005. Optimization of aspect ratio of waste tire shreds in sand-shred mixtures using CBR tests, Geotechnical Testing Journal 28 (6), 564-569.

Masaki Kobayashi, Aly Ahmed and Keizo Ugai, 2013. Improvement Properties of Cohesion-Less Soil Using Recycled Bassanite, ‹Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN 1934-7359, USA, Dec. 2013, 7 (12), (Serial No. 73), 1566-1573.

Yousefi, R., Amooei, A.A., Amelsakhi, M., Karimi, A., 2021a. Experimental Study on Influence of Using Urease Enzyme on Stabilized Sandy Soil's Engineering Property by Zeolite and Sawdust, International Journal of Maritime Technology, Volume 15, 17-27.

Yousefi, R., Amelsakhi, M., Karimi, A., 2021b. the effect of adding urease enzyme on uniaxial strength of soil stabilized by cement and zeolite, Iranian Journal of Engineering Geology, 14(32), 43-57.

Miri, M., Amelsakhi, M., Jiryaei Sharahi, M., 2023. the effect of the addition of ethylene-vinyl acetate on granular soil strength parameters, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(1), 41-60.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

Shear Strength Study of Sand Reinforced by Waste Concrete

Masoud Amelsakhi*[1], Elham Tehrani[2]
1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran
2. M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

Received: 01 Oct 2023 Accepted: 26 Dec 2023

Abstract

This research is a laboratory study to improve the geotechnical properties of sandy soils. Concrete waste with a grain size of 1.2 to 1 inch was used for this purpose. The effect of using concrete waste at 0, 10, 20 and 30 weight percent on dry sandy soil in two loose and dense states was investigated. Based on the results of the direct cutting test, the addition of concrete waste has increased the shear strength and the internal friction angle of the soil; The loose samples made with 30% of concrete waste had the greatest effect, so adding 30% of concrete waste to loose sand increased the internal friction angle of the soil by 32% and the shear strength by 42%. Similarly, adding 10% of concrete waste to dense sand increased the internal angle of friction of the soil by 4% and the shear strength by 6%.

Keywords: sand, soil improvement, concrete waste, large-scale direct shear test.

Introduction

The use of waste materials in geotechnics is very important. Waste materials can be harmful to the environment, but they can be useful for reinforcing and also rehabilitating soils. This aspect of geo-environmental engineering has been widely considered in all countries like Iran. Many laboratory and numerical studies and also in a limited area, field studies are being carried out all over the world. Ghazavi and Amelsakhi used scrap tires to reinforce the sand. Their studies show that the use of this waste material can increase the cohesion and also the internal soil friction angle of the mixed sand with different waste tire shreds in percent (Ghazavi and Amelsakhi, 2005). They continue their laboratory study by using 30*30 centimeter direct shear test and CBR test to refine the optimum aspect ratio size of tyre shreds which has the highest effect in strengthening the sand mixed with this waste material (Ghazavi and Amelsakhi, 2005). Kobayashi et al. used the chalk waste material in silt and also in sand. Their study showed that the use of this waste material in sand can be more effective compared to the use of chalk waste material in silt. Another important result obtained in this study showed that the curing time and also the water content are important factors affecting the results (Kobayashi et al., 2013).

Materials and Methods

The waste concrete material is used in this study in order to reinforce the sand in the soil. The effect of this waste material on the cohesion, internal soil friction angle and behavior of sand reinforced

*Corresponding author: mamelsakhi@yahoo.com
DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.101685

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]

with waste concrete material is investigated using the 30*30 centimeter direct shear test. This research is a laboratory study for the improvement of the geotechnical properties of sandy soils. Concrete waste with a grain size of 1.2 to 1 inch was used for this purpose. The effect on dry sandy soils in two loose and dense states was investigated using concrete waste in percentages of 0, 10, 20 and 30 by weight. To investigate the effect of sand density on shear strength parameters, loose and dense sand are used.

Results and Discussion

Based on the results of the direct cutting test, the addition of concrete waste has increased the shear strength and the internal friction angle of the soil; The loose samples made with 30% of concrete waste had the greatest effect, so adding 30% of concrete waste to loose sand increased the internal friction angle of the soil by 32% and the shear strength by 42%. Also, adding 10% of concrete waste to dense sand increased the internal friction angle of the soil by 4% and the shear strength by 6%. The obtained results show that the density of the sand is an important parameter that affects the behavior of the reinforced sand using waste concrete material.

Conclusions

The use of waste concrete material to reinforce the sand has a positive environmental impact. In addition, the use of this waste material can increase the cohesion and internal soil friction angle of the mixed sand-waste concrete. The main reason for the increase in soil parameters is the interlock effect, which we call in two parts; cohesion and internal soil friction angle. The most important aspect of these extensive laboratory tests is that they show that waste concrete materials can be used for soil reinforcement and can be used in many civil engineering projects in the field of geotechnics.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.101685]